

De fysische technologische aspecten van de gas-absorptie in actief-slib installaties

Deel I De Kinetiek

1. Inleiding

Voor de berekening van een oxidatief biologische installatie voor de zuivering van afvalwater dient men te beschikken over gegevens betreffende de snelheid, waarmee de verontreinigingen in het afvalwater worden afgebroken (reactiekinetiek).

De bepaling van deze kinetiek kan op verschillende manieren plaatsvinden. De methode, die hier wordt beschreven, sluit zo nauw mogelijk aan bij de bestaande methoden en begrippen die bij de afvalwaterzuivering gangbaar zijn. Soms waren afwijkingen evenwel onvermijdelijk.

De toepassing van de kinetiek is geïllustreerd aan de berekening van het volume van een goed geroerde, continu doorstroomde, tank met slibrecirculatie. De kinetiek is echter even bruikbaar bij de berekening van andere typen van afvalwaterzuiveringsinstallaties.

2. Theorie

2.1 De berekening van het volume en de belasting van een goed geroerde, continu doorstroomde, tank.

De opstelling is schematisch weergegeven in afb. 1. Φ_V is de volumestroom van het afvalwater (m^3/sec). c_V is de concentratie van de verontreinigingen in het afvalwater (kg/m^3). De slibconcentratie (c_M) in de tank wordt op een constant niveau gehouden. De volumestroom, waarmee het surplusslib wordt afgevoerd, is zeer klein verondersteld ten opzichte van Φ_V .

De massabalans over de tank voor de verontreinigingen luidt:

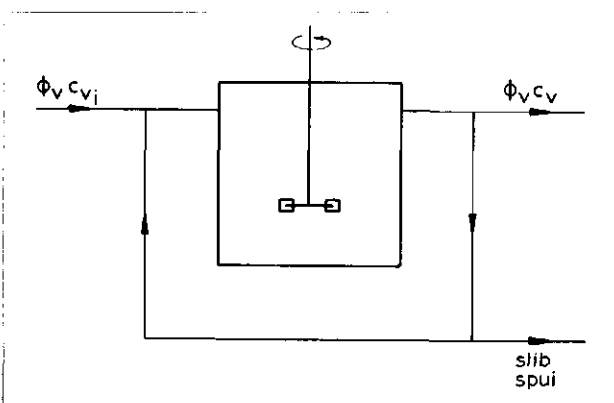
$$\Phi_V c_{V_i} - \Phi_V c_V = R_V V \quad (1)$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 toevoer afvoer omzetting

R_V is de omzetting per eenheid van volume van de tank.

$$\text{Hiervoor geldt: } R_V = \frac{-dc_V}{dt} = \frac{\alpha \mu_m}{K} c_M c_V Y' = \beta c_M c_V \quad (2)$$

Afb. 1



α is de fractie levend materiaal in het slib, μ_m en K zijn constanten uit de zg. Michaelis-Menten vergelijking voor de groei van micro-organismen (zie o.a. Aiba [1]).

Y' is het aantal kg verontreinigingen, dat nodig is voor de productie van 1 kg slib. Uit (1) en (2) volgt:

$$V = \frac{\Phi_V \left(\frac{c_{V_i}}{c_V} - 1 \right)}{\beta c_M} \quad (3a)$$

Φ_V en c_{V_i} zijn door de situatie vastgelegde gegevens. c_V moet aan bepaalde eisen voldoen en ligt dus ook vast. c_M kan worden ingesteld (bv. $c_M \approx 3 \text{ kg/m}^3$) m.b.v. de de slibspui.

$\beta = Y' \frac{\alpha \mu_m}{K}$ is de kinetische parameter. Is deze bekend,

dan kan V worden berekend.

De belasting of „load” van een zuiveringsinstallatie is oorspronkelijk gedefinieerd als het aantal kilogrammen BOD_5 dat per m^3 en per dag aan de installatie wordt toegevoerd. Elders in dit artikel zal blijken, dat de BOD_5 geen betrouwbare maat is voor het biologische zuurstofverbruik. Daarom is voor de belasting een iets andere definitie ingevoerd: de belasting is de toevoer van verontreinigingen per m^3 en per seconde.

Deze toevoer van verontreinigingen is uitgedrukt in kilogrammen zuurstof, nodig voor de volledige biologische afbraak van de verontreinigingen onder de condities, die in de installatie heersen.

Wanneer men het zuurstofverbruik ten gevolge van het basaal metabolisme van de micro-organismen in de installatie ook tot de belasting rekent, geldt:

$$\text{belasting} = \frac{\Phi_V}{V} c_{V_i} \frac{Y}{Y'} + K' c_M$$

Met behulp van vergelijking 3a kan dit worden geschreven als:

$$\text{belasting} = \frac{1}{\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_{V_i}}} \cdot \beta c_M \frac{Y}{Y'} + K' c_M \quad (3b)$$

De vaststelling van de grootte van β is mogelijk met een gemodificeerde uitvoering van de BOD-bepaling.

2.2 Bepaling van de kinetische parameter β

Bij de bepaling van het BOD-gehalte van afvalwater wordt een hoeveelheid van dit water in een goed gesloten fles in contact gebracht met een overmaat aan zuurstofrijk water.

Het zuurstofgehalte van dit mengsel wordt bepaald aan het begin van de proef (c_{Z_0}) en na verloop van een

bepaalde tijd, meestal 5 dagen (c_z). In dimensieloze vorm kan het BOD-gehalte dan worden uitgedrukt als:

$$1 - \frac{c_z}{c_{z_0}} = \text{BOD}'$$

Tijdens deze proef treden drie gekoppelde processen op, nl. de groei van micro-organismen, de afbraak van verontreinigingen en het verbruik van zuurstof. Voor deze processen gelden de volgende vergelijkingen (massabalansen):

micro-organismen

$$\frac{dc_m}{dt} = \frac{\alpha \mu_m}{K} c_m c_v \quad (4)$$

verontreinigingen

$$- \frac{dc_v}{dt} = Y' \frac{dc_m}{dt} \text{ of } c_{v_0} - c_v = Y' (c_m - c_{m_0}) \quad (5)$$

zuurstof

$$- \frac{dc_z}{dt} = Y \frac{dc_m}{dt} + K' c_m = Y \frac{\alpha \mu_m}{K} c_m c_v + K' c_m \quad (6)$$

verbruik verbruik
t.g.v. t.g.v.
groei basaal-metabolisme

Uit de vergelijkingen (4) en (5) kan c_m/c_{m_0} , de verhouding tussen de concentraties van mikro-organismen op een bepaalde tijd en op $t=0$, als functie van t worden bepaald:

$$\ln \frac{c_m}{c_{m_0}} + \ln \frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}} - \ln \left(\frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}} + 1 - \frac{c_m}{c_{m_0}} \right) = \left(1 + \frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}} \right) \beta c_{m_0} \cdot t \quad (7)$$

Uit deze vergelijking blijkt, dat:

$$\frac{c_m}{c_{m_0}} = f \left(\frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}}, \beta c_{m_0} \cdot t \right) \quad (8)$$

of in woorden: $\frac{c_m}{c_{m_0}}$ is een functie van twee dimensieloze

kengetallen:

$\frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}}$ = de concentratietoename van micro-organismen als alle verontreinigingen in micro-organismen zouden zijn omgezet ($\frac{Y'}{c_{v_0}}$), gedeeld door de aanvangsconcentratie van de micro-organismen (c_{m_0}).

$\beta c_{m_0} t$ = de verhouding tussen de reactietijd (t) en een specifieke reactietijd ($\frac{1}{\beta c_{m_0}}$), die een maat is voor de snelheid waarmee de omzetting verloopt.

In afb. 2 is $\frac{c_m}{c_{m_0}}$ als functie van $\beta c_{m_0} t$ uitgezet voor

verschillende waarden van de parameter $\frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}}$.

Wanneer men beschikt over een methode om $\frac{c_m}{c_{m_0}}$ te meten kan met behulp van deze figuur β worden bepaald door op twee tijden, t_1 en t_2 de waarden van $\frac{c_m}{c_{m_0}}$ te meten.

Hierbij moet die curve worden gekozen, en dus die waarde van $\frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}}$, waarvoor de bij de verschillende waarden van $\frac{c_m}{c_{m_0}}$ behorende tijden (afgelezen op de horizontale as) dezelfde verhouding hebben als de werkelijke tijden, waarop $\frac{c_m}{c_{m_0}}$ is bepaald.

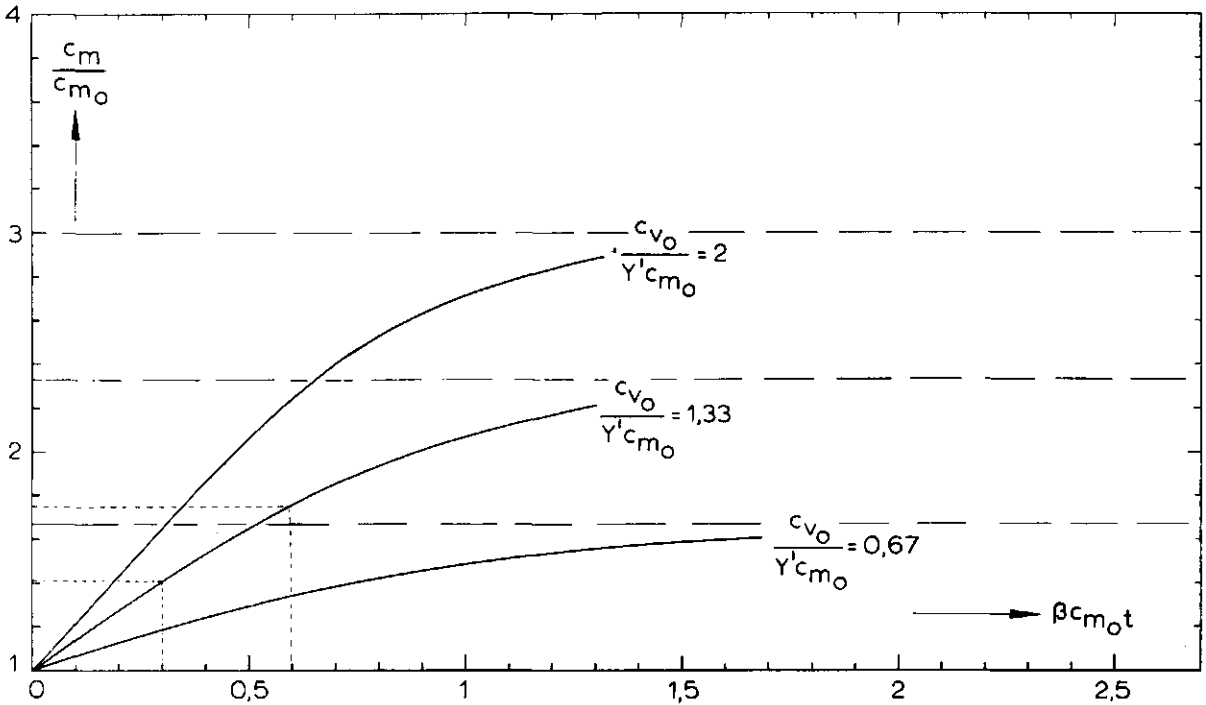
Wil men toch vasthouden aan een zuurstofbepaling, dan kan uit de vergelijkingen (6) en (7) worden afgeleid dat moet gelden:

$$\text{BOD}' = 1 - \frac{c_z}{c_{z_0}} = g \left(\frac{Y}{Y'} \frac{c_{v_0}}{c_{z_0}}, \frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}}, \frac{K'}{\beta c_{z_0}}, \beta c_{m_0} \cdot t \right) \quad (9)$$

In deze vergelijking komen, vergeleken bij vergelijking 8, twee extra parameters voor nl.:

$\frac{Y}{Y'} \frac{c_{v_0}}{c_{z_0}}$ = de verandering in de zuurstofconcentratie, indien alle verontreinigingen in micro-organismen zijn omgezet, zonder dat t.g.v. het metabolisme zuurstof is verbruikt ($-c_{v_0}$) gedeeld voor de zuurstofconcentratie op $t=0$.

$\frac{K'}{\beta c_{z_0}}$ = de verhouding tussen de specifieke reactietijden voor het zuurstofverbruik ten gevolge van de groei ($\frac{1}{\beta c_{m_0} Y}$) en ten gevolge van het basaal metabolisme ($\frac{1}{K'}$), vermenigvuldigd met een concentratiefactor ($\frac{c_{m_0} Y}{c_{z_0}}$).



Afb. 2

In afb. 3 is, voor een aantal waarden van de parameter $\frac{c_{v0}}{Y'c_{m0}}$, de grootte $1 - \frac{c_z}{c_{z0}}$ (= BOD') uitgezet als functie van $\beta c_{m0} \cdot t$.

Hierbij zijn de volgende grootheden constant verondersteld:

$$\begin{aligned} Y &= 0,45 \\ Y' &= 0,30 \\ c_{z0} &= 9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \\ \frac{K'}{\beta c_{z0}} &= 0,1 \end{aligned}$$

Door BOD' te meten op twee tijden (waarbij de omzetting dus nog niet volledig mag zijn) kan, op dezelfde wijze als bij afb. 2, de waarde van β worden bepaald. Een bezwaar van het gebruik van afb. 3 t.o.v. het gebruik van afb. 2 voor de bepaling van β is dat meer parameters bekend moeten zijn. Dit bezwaar zou minder

gelden wanneer $\frac{Y}{Y'}$ en $\frac{K'}{\beta c_{z0}}$ in de praktijk weinig

blijken te variëren (c_{z0} kan altijd op een bepaalde waarde worden ingesteld).

Wil de bepaling van de kinetiek op de bovenbeschreven wijzen zinvol zijn, dan moet aan een aantal voorwaarden worden voldaan:

a. de bij de proef gebruikte micro-organismen moeten dezelfde eigenschappen hebben als de micro-organismen in de grote installatie. Dit kan bereikt worden door, onder omstandigheden die zoveel mogelijk met de praktijk overeenkomen, een populatie zich te laten opbouwen in het te reinigen afvalwater en hiermede de proef te verrichten.

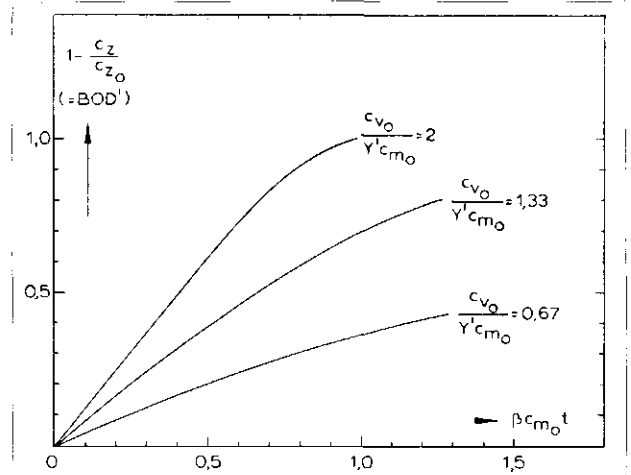
b. De begincondities (c_{m0} en c_{z0}) moeten nauwkeurig bekend zijn. c_{v0} volgt dan automatisch uit de bij de

bepaling gevonden parameter $\frac{c_{v0}}{Y'c_{m0}}$ als Y' bekend is.

c. Bij de afleiding van de vergelijkingen (4) t/m (9) is aangenomen dat, tijdens de bepaling van BOD', de inhoud van het vat, waarin de bepaling plaatsvindt, goed geroerd is. Dit is nodig om twee redenen:

1. de micro-organismen moeten homogeen over het vat verdeeld zijn;
2. de verbruikssnelheid is nog een functie van de vlokafmeting. Deze vlokafmeting moet door roeren van de zelfde orde van grootte worden gemaakt, als in de grote installatie.

Afb. 3



Daar de BOD'-bepaling afgesloten van de lucht moet worden verricht, kan het beste gebruik worden gemaakt van een magnetische roerder.

Bij de klassieke BOD-bepaling wordt de BOD na zo lange tijd gemeten, dat de BOD vrijwel niet meer met de tijd verandert. Men bepaalt dan geen kinetiek, maar slechts het totale zuurstofverbruik t.g.v. de afbraak van de verontreinigingen door micro-organismen. Uit vgl. 9 blijkt, dat dan de volgende dimensieloze groepen een rol spelen.

$$\frac{Y c_{v_0}}{Y' c_{z_0}}, \frac{c_{v_0}}{Y' c_{m_0}} \text{ en } \frac{K'}{\beta c_{z_0}}$$

Dit betekent, dat de BOD-bepaling alleen zin heeft, als deze groepen bij de proef dezelfde waarden hebben als in de grote installatie. Daartoe moet eenzelfde soort micro-organismen worden gebruikt (Y , Y' , K' en β constant) en moeten de uitgangconcentratie van de micro-organismen (c_{m_0}) en van de zuurstof (c_{z_0}) gelijk zijn aan die van de grote installatie.

Bij de klassieke BOD-bepaling wordt hoogstens alleen aan deze laatste voorwaarde voldaan. De omzetting vindt daarbij plaats door middel van de toevallig in het afvalwatermonster aanwezige micro-organismen. Mis-

schien zullen $\frac{Y}{Y'}$ en $\frac{K'}{\beta c_{z_0}}$ niet veel variëren voor ver-

verschillende soorten micro-organismen, maar de waarde van c_{m_0} is geheel onbekend. Deze wijze van BOD-bepaling geeft dan ook geen betrouwbare informatie over het totale zuurstofverbruik.

2.3 De OC/load

De OC/load is gedefinieerd als het aantal kg zuurstof, dat bij $c_z = 0$ per m³ en per dag in een installatie moet worden gebracht, gedeeld door de BOD-belasting (kg BOD/m³ dag).

Voor een goed geroerde continu doorstroomde tank wordt deze belasting gegeven door vergelijking 3b. De zuurstofbalans luidt, als de zuurstofconcentraties in de toe- en afvoerstromen verwaarloosd worden:

$$k \cdot A \cdot c_z^* \left(1 - \frac{c_z}{c_z^*}\right) = \beta c_m c_v \frac{Y}{Y'} + K' c_m \quad (10)$$

Hierin is $OC = kA \cdot c_z^*$.

Uit de vergelijkingen (1) en (10) volgt dan:

$$\frac{OC}{load} = \frac{1 - \frac{c_v}{c_{v_i}}}{1 - \frac{c_z}{c_z^*}} \cdot \frac{1 + \frac{K'Y'}{\beta c_v Y}}{1 + \frac{K'Y'}{\beta c_v Y} \left(1 - \frac{c_v}{c_{v_i}}\right)} \quad (11)$$

In de regel zal $\frac{c_v}{c_{v_i}}$ ca. 0,1 zijn en $\frac{c_z}{c_z^*}$ ca. 0,2, zodat:

$$\frac{OC}{load} = 1,1 \frac{1 + \frac{K'Y'}{\beta c_v Y}}{1 + 0,9 \frac{K'Y'}{\beta c_v Y}}$$

$$\frac{K'}{\beta c_v Y}$$

De waarde van $\frac{K'}{\beta c_v Y}$ bedraagt hooguit enige tienden.

Dit is gemakkelijk in te zien, indien men zich realiseert dat het zuurstofverbruik t.g.v. de groei van de micro-organismen ongeveer vier keer zo hoog is als het zuurstofverbruik t.g.v. het metabolisme. Hieruit volgt namelijk (zie vgl. 6):

$$Y - \beta c_v = 4K' \text{ of } \frac{Y'K'}{Y\beta c_v} = 0,25$$

Het is daarom te verwachten, dat de waarde van de $\frac{OC}{load}$ steeds in de buurt van 1 à 1,5 zal liggen.

De OC/load geeft de mogelijkheid om, als Φ_v , c_{v_i} en V bekend zijn, aan te geven aan welke waarde de OC moet voldoen.

3. Procedure voor de berekening van de apparatuur

De gang van zaken bij de berekening van de continu doorstroomde, goed geroerde, tank voor de oxidatief biologische zuivering van afvalwater is dus als volgt:

1. In een monster van het gegeven afvalwater wordt een stabiele populatie opgebouwd.
2. Van deze populatie wordt een afgemeten hoeveelheid in een fles gedaan, samen met een bepaalde hoeveelheid van het afvalwater. De fles wordt voorzien van een roermechanisme en afgevuld met zuurstofrijk water.

3. Op twee verschillende tijden worden $\frac{c_m}{c_{m_0}}$ of $\frac{c_z}{c_{z_0}}$ bepaald. Met behulp van de afb. 2 of 3 kan dan β worden bepaald.

4. Als β bekend is, kan met vgl. 3a het benodigde tank-volume V worden berekend en met vgl. 3b de load.

5. Als de load bekend is, kan bij een bekende $\frac{OC}{load}$ waarde van 1 à 1,5 de OC worden berekend. Rest de vraag op welke wijze deze OC waarde in de apparatuur kan worden gerealiseerd. Dit zal worden behandeld door prof. Beek.

4. Samenvatting en conclusies

1. Door de huidige wijze, waarop de BOD wordt bepaald, is de BOD₅ geen betrouwbare maat voor de hoeveelheid zuurstof, die nodig is voor de biologische afbraak van de verontreinigingen.
2. Door enige wijzigingen aan te brengen in de BOD-bepaling is deze geschikt te maken als methode voor de bepaling van de kinetiek van de omzetting in een afvalwaterzuiveringsinstallatie.
3. Als de kinetiek bekend is, kan de grootte van de zuiveringsinstallatie worden berekend, en de zogenaamde „load”. Daar voor de OC/load op theoretische gronden een waarde van 1 à 1,5 verwacht moet worden, is de benodigde OC te berekenen.

Literatuur

1. Aiba, S., Humphrey, A. E. and Millis, N. F., *Biochemical Engineering* (Academic Press, New York, 1965) pag. 101.

● zie voor lijst met symbolen pag. 508, 2e kolom.

Lijst van symbolen

| | | |
|----------|--|--------------------------|
| A* | specifiek grensvlak water/lucht | m^{-1} |
| C | concentratie | $kg\ m^{-3}$ |
| c* | evenwichtconcentratie | $kg\ m^{-3}$ |
| k | stofoverdrachtscoëfficiënt | $m\ sec^{-1}$ |
| K | systeemconstante | $kg\ m^{-3}$ |
| K' | systeemconstante | sec^{-1} |
| R | omzetting per volume-eenheid | $kg\ m^{-3}\ sec^{-1}$ |
| t | tijd | sec |
| V | volume | m^3 |
| Y | conversiefactor zuurstof/micro-organismen | |
| Y' | conversiefactor verontreinigingen/micro-organismen | |
| α | fractie levend slib | |
| β | kinetische parameter | $m^3\ kg^{-1}\ sec^{-1}$ |
| Φ_v | volumestroom | $m^3\ sec^{-1}$ |
| μ_m | systeem constante | sec^{-1} |

Indices:

| | |
|---|--------------------------|
| i | bij de ingang |
| m | van de micro-organismen |
| o | op het tijdstip $t=0$ |
| v | van de verontreinigingen |
| z | van de zuurstof |