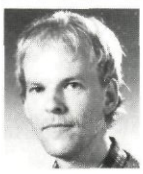
Sturen van de beluchting op basis van de respiratiesnelheid. Een verkennend experiment

Samenvatting
Respirometrie lijkt een veelbelovende techniek om de beluchting in actief-slibinrichtingen te optimaliseren. Het belangrijkste voordeel ten opzichte van conventionele PI(D)-regelaars is dat er een directe relatie bestaat met de effluentkwaliteit. Door rekening te houden met de effluentkwaliteit bestaat de mogelijkheid om bij lage actuele belastingen op de beluchtingskosten te besparen.
Omdat het volledig ontbreekt aan praktijkervaring op het gebied van beluchtingsturingen die gebaseerd zijn op respirometrie is een eerste verkennend experiment uitgevoerd in een eenvoudige actief-slibinrichting met een volledig gemengde aëratietank. Uit dit experiment is gebleken dat de gemeten respiratiesnelheid direct reageert op variaties in de belasting en de geïmplementeerde sturing, op een kleine systematische afwijking na, goed voldoet.
Voor toepassing in praktijk is nader onderzoek noodzakelijk. Dit onderzoek zal zich moeten richten op de meting van de respiratiesnelheid bij lage zuurstofconcentraties en modelvorming van het zuurstofverbruik in propstromers.


D. WIERSEMA,
Landbouwuniversiteit
Wageningen,
Vakgroep Milieutechnologie


H. TEMMINK,
Landbouwuniversiteit
Wageningen,
Vakgroep Milieutechnologie


A. KLAPWIJK,
Landbouwuniversiteit
Wageningen,
Vakgroep Milieutechnologie

1. Inleiding

Voor een optimale bedrijfsvoering van actief-slibinrichtingen is een goede sturing van de beluchting essentieel. Doel van deze sturing is het realiseren van de gestelde effluentkwaliteit terwijl de kosten voor beluchting worden geminimaliseerd. In de praktijk wordt meestal een beperkter doel gerealiseerd. De zuurstofconcentratie wordt geregeld door het luchtdebiet aan te sturen met een conventionele PI(D)-regelaar.

De ingestelde zuurstofconcentratie is hoog genoeg om te voorkomen dat de biologische, aërobe omzettingsprocessen door zuurstof worden gelimiteerd. Deze methode heeft echter een aantal regeltechnische en economische bezwaren. Bij lage zuurstofconcentraties is de meetnauwkeurigheid van zuurstofsensoren vaak onvoldoende en omdat de karakteristiek van het actief slib verandert zullen de instellingen van de PI(D)-regelaar op den duur ontoereikend zijn [Holmberg *et al.*, 1989]. Belangrijker dan deze regeltechnische bezwaren is het ontbreken van een directe relatie tussen de ingestelde zuurstofconcentratie en de effluentkwaliteit.

De snelheid van de aërobe omzettingsprocessen wordt zowel bepaald door de zuurstofconcentratie als door de substraatconcentratie (CZV voor heterotrofe bacteriën en ammonium voor nitrificerende bacteriën):

$$r_S = \frac{C}{K_c + C} \frac{S}{K_s + S} r_{Smax} \qquad (1)$$

Hierin zijn C en S de heersende zuurstof- en substraatconcentraties, K_c en K_s zijn halfwaarde verzadigingsconcentraties en r_{Smax} is de maximale omzettingssnelheid als C en S niet limiterend zijn. Uit vergelijking (1) valt af te leiden dat als de zuurstofconcentratie geregeld wordt de substraatconcentratie in het effluent S volledig wordt gedomineerd door de actuele belasting van de actief-slibinrichting. Bij belastingen die lager zijn dan de ontwerpbelasting zal S lager zijn dan volgens de norm strikt noodzakelijk is. We spreken in dit geval van 'Quality Give Away' [Van Straten *et al.*, 1993]. Het luchtdebiet zou in deze situatie in principe verlaagd kunnen worden zodat de zuurstofconcentratie C lager wordt dan de ingestelde waarde en de substraatconcentratie S gelijk wordt aan de norm. Uit economische overwegingen zou dit zeer aantrekkelijk zijn omdat zo op de beluchtingskosten wordt bespaard. In een actief-slibinrichting waar in één tank nitrificatie en denitrificatie wordt nagestreefd bestaat zelfs de noodzaak voor een zeer lage zuurstofconcentratie omdat deze anders een nadelig effect zou hebben op de denitrificatie.

In tegenstelling tot de zuurstofconcentratie heeft de snelheid waarmee actief slib de aërobe omzettingsprocessen uitvoert (de respiratiesnelheid) wel een directe relatie met de effluentkwaliteit. De respiratiesnelheid kan sinds enige tijd on-line gemeten worden [Spanjers en Klapwijk, 1990; Klapwijk *et al.*, 1991] zodat er diverse mogelijkheden ontstaan om sturing van de beluchting te optimaliseren. Hoewel er diverse simulatiestudies op dit gebied zijn uitgevoerd ontbreekt het aan praktische ervaring.
Daarom is een verkennend experiment uitgevoerd waarin één van de vele varianten van een sturing op basis van respirometrie is geïmplementeerd en getest in een eenvoudige actief-slibinrichting. Bij de uitvoering van het experiment ligt de nadruk in eerste instantie op de vraag of sturing op basis van respirometrie mogelijk is. De vraag of een dergelijke sturing ook daadwerkelijk beter functioneert dan een conventionele PI(D)-regelaar zal in een later stadium met aanvullende experimenten beantwoord moeten worden.

2. Sturing

In dit experiment wordt de sturing uitgevoerd in een actief-slibinriching met een volledig gemengde aëratietank.
De respiratiesnelheid in de tank wordt on-line gemeten en uit de massabalans voor zuurstof wordt vervolgens het luchtdebiet berekend. Als de zuurstofconcentratie in het influent en retourslib verwaarloosbaar klein zijn ziet de massabalans er als volgt uit:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{Q}{V} C + k_L a\,(C_v - C) - r \qquad (2)$$

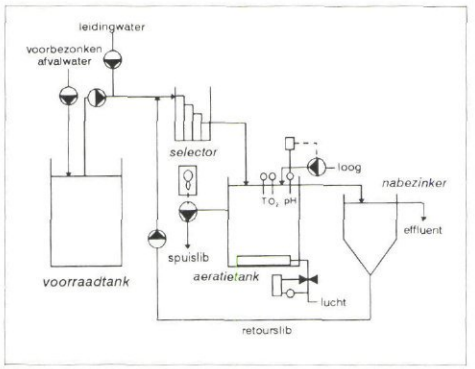
Hierin is Q het debiet door de aëratietank, V het volume van de tank, C de zuurstofconcentratie in de tank, C_v de zuurstofconcentratie bij verzadiging en r de respiratiesnelheid. De zuurstofoverdrachtscoëfficiënt $k_L a$ is een lineaire functie van het luchtdebiet F_L volgens [Bocken *et al.*, 1989]:

$$k_L a = \alpha F_L + \beta \qquad (3)$$

Het luchtdebiet dat nodig is om de zuurstofconcentratie op een waarde C_i te regelen kan uit vergelijkingen (2) en (3) afgeleid worden:

$$F_L = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\frac{Q}{V} C_i + r}{C_v - C_i} - \beta \right) \qquad (4)$$

Om de sturing uit te kunnen voeren moeten naast de gemeten respiratiesnelheid r de beluchtingsconstanten α en β bekend zijn, evenals het volume van de aëratietank, het debiet door deze tank en de zuurstofverzadigingsconcentratie C_v.



Afb. 1 - Actief-slibinrichting.

3. **Materiaal en methode**

3.1. *Actief-slibinrichting*

De actief-slibinrichting (afb. 1) wordt tijdens het experiment vanuit een voorraadtank van 500 liter gevoed met voorbezonken huishoudelijk afvalwater.

Het afvalwater kan worden verdund met leidingwater. Het al dan niet verdunde afvalwater wordt in een selector van 10 liter gemengd met het retourslib om vorming van lichtslib te voorkomen. Het mengsel stroomt naar een volledig gemengde beluchtingstank van 475 liter die is voorzien van twee fijne bellenbeluchters die zorgen voor de beluchting en menging. In een nabezinker van 300 liter wordt het actief slib gescheiden van het gezuiverde afvalwater en teruggevoerd naar de selector. Tabel I geeft een overzicht van de belangrijkste operationele parameters.

TABEL I – *Operationele parameters actief-slibinricting.*

parameter	waarde
influentdebiet ($luur^{-1}$)	30
retourslibdebiet ($luur^{-1}$)	30
slibconcentratie ($gDSl^{-1}$)	3-4
CZV belasting ($kgCZVkg^{-1}DSd^{-1}$)	0,21
N belasting ($kgNkg^{-1}DSd^{-1}$)	0,02
slibleeftijd (d)	15
pH (geregeld) (-)	7,5 ± 0,1
temperatuur (°C)	20-24

3.2. *Metingen en procescontrole*

De respiratiesnelheid, de zuurstofconcentratie en de temperatuur in de beluchtingstank worden on-line gemeten en elke minuut geregistreerd met behulp van een modulaire I/O processor. De methode die is gevolgd voor het meten van de respiratiesnelheid wordt elders uitvoerig beschreven [Spanjers, 1993]. De pH wordt eveneens on-line gemeten en met een loogdosering op 7,5 geregeld. Het afvalwaterdebiet, het leidingwaterdebiet en een klep voor de beluchting worden met de I/O processor aangestuurd.
Naast de normale standaardanalyses van het afvalwater (CZV, N_{kj}-N, NH_4-N, NO_3-N en NO_2-N) en actief slib (droogrest en gloeirest) wordt in het laboratorium regelmatig het zogenaamde kortetermijn biochemisch zuurstofverbruik (BZV_{kt}) van het afvalwater gemeten [Spanjers, 1993].

4. **Experimenteel**

4.1. *Meting parameters*

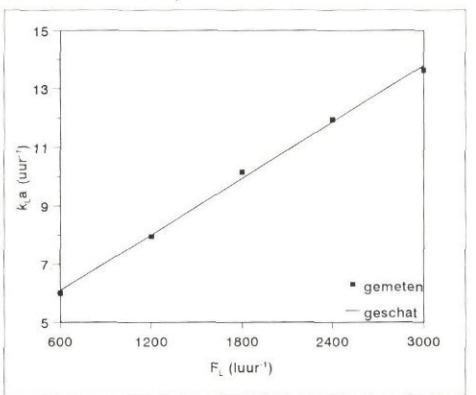
Om de sturing uit te kunnen voeren moeten eerst de beluchtingsconstanten α en β en de zuurstofverzadigingsconcentratie C_v bepaald worden.
De zuurstofverzadigingsconcentratie C_v wordt bepaald door bij een vast luchtdebiet door verdunning met leidingwater twee extreem verschillende waarden in te stellen voor de substraatconcentratie in het influent. Zodra een evenwichtstoestand is bereikt worden de zuurstofconcentratie en de respiratiesnelheid gemeten. De k_La kan nu uit de massabalans voor zuurstof (vergelijking 2) geëlimineerd worden zodat de zuurstofverzadigingsconcentratie C_v berekend kan worden:

$C_v = 9{,}55\ mgl^{-1}$ (bij 20,2 °C , 105% van de waarde in schoon water bij dezelfde temperatuur)

De beluchtingsconstanten α en β worden bepaald door een aantal verschillende luchtdebieten in te stellen en telkens zodra een evenwichtstoestand is bereikt de zuurstofconcentratie en de respiratiesnelheid te meten. Voor elk luchtdebiet kan vervolgens uit de massabalans voor zuurstof (vergelijking 2) de zuurstofoverdrachtscoëfficiënt k_La berekend worden met de inmiddels bekende zuurstofverzadigingsconcentratie. De relatie tussen deze twee grootheden is uitgezet in afbeelding 2. De beluchtingsconstanten α en β kunnen door lineaire regressie worden geschat:

$\alpha = 2{,}9 \cdot 10^{-3}\ l^{-1}$, $\beta = 3{,}59\ uur^{-1}$

Afb. 2 - Zuurstofoverdrachtscoëfficiënt k_La als functie van het luchtdebiet F_L.



4.2. *Sturing beluchting*

Om de sturing onder extreme omstandigheden te kunnen testen is de substraatconcentratie van het influent gedurende een periode van 12 uur gevarieerd volgens een zogenoemd Random Binair Signaal (RBS) [Norton, 1986]. De substraatconcentratie heeft volgens dit RBS elke 3 minuten een optionele schakelkans tussen twee extreme waarden door manipulatie van het leidingwater- en afvalwaterdebiet. Het totale influentdebiet blijft gelijk. De kans dat werkelijk geschakeld wordt is 0,1.
De respiratiesnelheid r wordt elke minuut gemeten. Elke 3 minuten wordt het gemiddelde over de afgelopen 3 minuten gebruikt voor de berekening van het luchtdebiet. De te regelen zuurstofconcentratie C_i is 5 mgO_2l^{-1}. Het luchtdebiet mag niet onder een bepaalde minimale waarde komen om voldoende menging in de aëratietank te garanderen. Ook kan het luchtdebiet niet boven een maximale waarde komen die wordt bepaald door de capaciteit van de compressor.

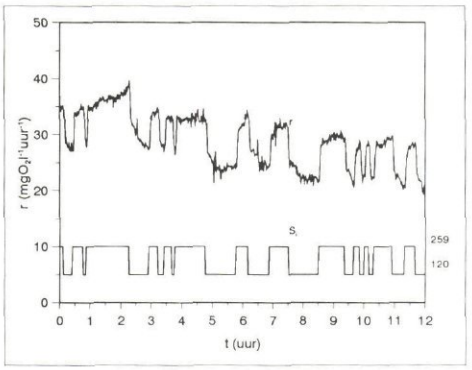
5. **Resultaten**

Afbeeldingen 3, 4 en 5 geven achtereenvolgens de gemeten respiratiesnelheid, het luchtdebiet en de zuurstofconcentratie tijdens het experiment. In deze afbeeldingen is ook het verloop weergegeven van het influent BZV_{kt} als maat voor de belasting van de actief-slibinrichting.

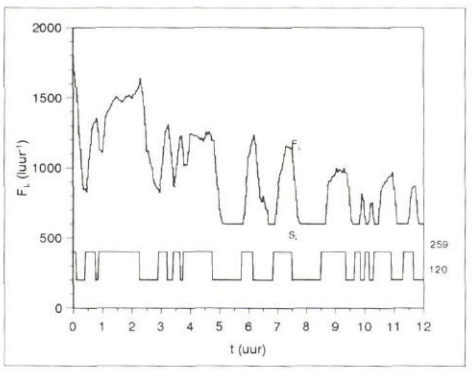
De respiratiesnelheid reageert direct op een veranderende aanvoer van substraat. Gemiddeld neemt de respiratiesnelheid af in de tijd wat waarschijnlijk een gevolg is van een gemiddeld lagere belasting tijdens het experiment en daardoor een dalende basisrespiratiesnelheid.

Logischerwijs reageert ook het luchtdebiet direct op een veranderende belasting. In een aantal gevallen wordt de ondergrens bereikt die nodig is om voldoende menging in de aëratietank te kunnen krijgen. Het zou, achteraf gezien, dan ook beter zijn geweest om de menging onafhankelijk van de beluchting plaats te laten vinden, bijvoorbeeld door installatie van een roerder.

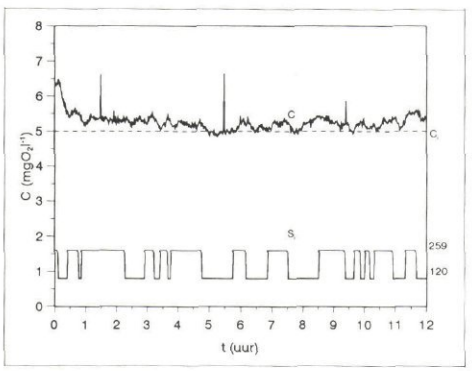
Na ongeveer een uur wordt de zuurstofconcentratie in de tank redelijk stabiel. De gemiddelde zuurstofconcentratie is dan 5,22 ± 0,17 mgO_2l^{-1}. De systematische afwijking van 0,22 mgO_2l^{-1} ten opzichte van de ingestelde concentratie van 5 mgO_2l^{-1} is waarschijnlijk een gevolg van een fout in de gemeten parameters α, β of C_v.



Afb. 3 - Respiratiesnelheid (r) en $BZVk_t$ (S_t).



Afb. 4 - Luchtdebiet (F_L) en BZV_{kt} (S_t).



Afb. 5 - Gemeten zuurstofconcentratie (C), ingestelde zuurstofconcentratie (C_t) en BZV_{kt} (S_t).

6. Discussie en conclusie

Om praktijkervaring op te doen met het sturen van de beluchting op basis van de gemeten respiratiesnelheid, is een verkennend experiment uitgevoerd in een eenvoudige actief-slibinrichting met een volledig gemengde aëratietank. De zuurstofconcentratie in de tank wordt geregeld door de respiratiesnelheid in de tank on-line te meten en vervolgens het benodigde luchtdebiet te berekenen uit de massabalans voor zuurstof. Omdat de gemeten respiratiesnelheid direct reageert op een veranderende belasting blijkt het inderdaad mogelijk de zuurstofconcentratie op deze manier te regelen. Wel treedt een systematische afwijking op (3%) ten opzichte van de gewenste concentratie.

Om sturingen die gebaseerd zijn op respirometrie geschikt te maken voor de praktijk is aanvullend onderzoek nodig. Met de beschreven sturing wordt, net als met een conventionele PI(D)-regelaar, geen rekening gehouden met een mogelijke besparing op beluchtingskosten bij lage belastingen. Hiertoe zal, analoog aan vergelijking (1), niet de zuurstofconcentratie maar de respiratiesnelheid geregeld moeten worden en zal de meting van de respiratiesnelheid zo opgezet moeten worden dat ook het effect van zuurstoflimitatie op de respiratiesnelheid wordt gemeten. Ook zal de nodige aandacht moeten worden besteed aan de in te stellen waarde voor de respiratiesnelheid. Deze wordt bepaald door de kinetische parameters van vergelijking (1) en een bijkomende vraag is dan ook hoe frequent deze parameters moeten worden gemeten.

De beschreven sturing is getest in een actief-slibinrichting met een volledig gemengde aëratietank. In praktijk zullen andere mengkarakteristieken voorkomen. Een sturing als in dit artikel wordt beschreven is dan niet mogelijk omdat de bemonsteringsplaats voor de respiratiesnelheid niet willekeurig gekozen kan worden. In propstromers is een andere methodiek vereist. Op basis van metingen aan het te behandelen influent wordt door een model voorspeld wat de benodigde aërobe verblijftijd in de propstromer moet zijn om aan de effluenteis te kunnen voldoen. Er is reeds onderzoek uitgevoerd naar het hiervoor benodigde model [Bernardes *et al.*, 1994].

Tenslotte moet opgemerkt worden dat als een besparing op de beluchtingskosten wordt nagestreefd terdege rekening moet worden gehouden met de eis dat een bepaalde minimale menging op moet treden om het slib in suspensie te houden. De noodzaak kan bestaan om te voorzien in mechanische menging bij lage luchtdebieten.

Literatuur

Bernardes, R. S., Spanjers, H. en Klapwijk, A. (1994). *Modelling respiration rates in a nitrifying SBR treating domestic wastewater.* In bewerking.
Bocken, S. M., Braae, M. en Dold, P. L., (1989). *Dissolved oxygen control and oxygen utilization rate estimation: extension of the Holmberg/Olsson method,* Wat. Sci. Tech., 21, 1197-1208.
Holmberg, U., Olsson, G., Andersson, B. (1989). *Simultaneous DO control and respiration estimation.* Wat. Sci. Tech., 21, 1185-1195.
Klapwijk, A., Spanjers, H. en Temmink, H. (1991). *Regeling van actief-slibinstallaties op basis van respiratiemetingen.* H_2O, 24, 548-553.
Norton, J. P. (1986). *An introduction to identification. Academic Press.*
Spanjers, H. (1993). *Respirometry in activated sludge. Dissertatie.* Vakgroep Milieutechnologie, Landbouwuniversiteit, Wageningen.
Spanjers, H. en Klapwijk, A. (1990). *On-line meter for respiration rate and short-term biochemical oxygen demand in the control of the activated sludge process. Advances in Water Pollution Control, Proc.* 5th IAWPRC Workshop, 26 juli-3 augustus, Yokohama and Kyoto, Japan.
Straten, G. van, Keesman K. J. en Klapwijk, A. (1993). *Basic analysis of activated sludge process dynamics and control.* In: Proc. 7th Forum for Applied Biotechnology, Gent.

● ● ●

LASSA-lezingenmiddag

De C. T. de Wit onderzoekschool Productie-Ecologie organiseert een seminar-reeks op het gebied van modellen. Het eerste seminar, dat op 31 oktober 1995 wordt gehouden, betreft statistiek en modellen en wordt gezamenlijk met de LASSA ('Landelijke Studiegroep Statistiek in de Aardwetenschappen') georganiseerd. Het vindt plaats in de collegezaal van het scheikundegebouw, De Dreijen, in Wageningen, met aanvang 14.00 uur. Omdat er drie sprekers zijn en er ruim tijd is voor discussie, wordt er een iets ander programma gevolgd dan gebruikelijk bij de LASSA-lezingenmiddagen. De voordrachten worden in het Engels gegeven.

Het programma luidt:
- prof. R. Thompson (IACR Rothamsted): 'Probability and risk approaches to modelling';
- dr. P. H. M. Jansen (RIVM): 'Sensitivity analysis applied to models';
- dr. A. K. Ersbøll (Technical University Lyngby, Denmark); 'Variability in space and time';
Discussie.

Nadere inlichtingen: de voorzitter van de LASSA, de heer Alfred Stein, telefoon 08370 - 8 24 20 of de secretaris, de heer Paul Baggelaar, telefoon 03402 - 6 96 31.

Overzicht STOWA-rapporten

In de periode maart 1994 tot en met augustus 1995 werden door de STOWA de volgende rapporten uitgebracht.

94-01 Ecologische beoordeling en beheer van oppervlaktewater

Beoordelingssysteem voor kanalen op basis van macrofyten, macrofauna, epifytische diatomeeën en fytoplankton. Dit beoordelingssysteem is bruikbaar in alle Nederlandse regio's en biedt een valide vergelijkingsmaat voor de toetsing van de ecologische normdoelstellingen. Het systeem stelt de waterbeheerder in staat gemotiveerde maatregelen te nemen om gewenste verbeteringen te bewerkstelligen, waarvan het effect weer met het systeem kan worden beoordeeld. Het