

Eenvoudig model voor de zuurstofbehoefte bij het actief slibproces

1. Inleiding

Om te komen tot een zorgvuldig ontwerp voor het actief-slibproces is het noodzakelijk dat men een beschrijving ter beschikking heeft van de processen van zuurstofoverdracht en menging in het beluchtingsbassin; Pöpel en Ottengraf hebben dat hiervóór al duidelijk gemaakt. Evenzeer is het bij het zoeken naar optimale procescondities natuurlijk van belang een hanteerbare formulering te bezitten voor de behoefte aan zuurstof, waarin ook de samenhang tussen procesvorming en zuurstofverbruik



IR. H. VAN DEN BELD
Wetenschappelijk medewerker
TH Twente

goed tot uiting komt.

Nu is er over de zuurstofbehoefte — en de modellering daarvan — aanzienlijk meer te zeggen dan in dit bestek mogelijk is.

We zullen ons dan ook beperken tot een eenvoudig model — de Monod-formulering — en een schets geven van het gebruik van dit model bij het ontwerpen van het actief-slibproces. Daarnaast wordt nog geprobeerd de grenzen aan te geven van de toepasbaarheid van dit eenvoudige model, door omstandigheden te vermelden waarbij het tekort schiet.

De hier bedoelde ontwerpmethode komt sedert een jaar of tien in de buitenlandse literatuur voor. In dit artikel gaat het vooral om het kweken van bredere belangstelling voor een procedure, die bepaalde voordelen heeft boven de meer traditionele, vooral op ervaring gebaseerde vuistregels.

2. De Monod-formulering

Monod (1949) stelde een vergelijking op voor de groei en het substraatverbruik van een reinkultuur van bacteriën in een voedingsmilieu, waarin het bedoelde substraat de groei-limiterende factor is. Hij gebruikt de uit 1914 stammende Michaelis-Menten-vergelijking voor een enzymreactie $\text{Enzym} + \text{Substraat} \rightleftharpoons \text{Enzym-substraat-complex} \rightarrow \text{Enzym} + \text{Produkt}$.

Door anderen (bijv. Benedek (1967), Eckhoff (1966), Pearson (1966), Tench (1962), later vele anderen) is de formulering toegepast op de groei van actief-slib, waarbij de substraat-koncentratie werd uitgedrukt in BOD- of COD-termen.

Het model geeft een redelijke beschrijving van het verloop van de substraatcon-

centratie (BOD, COD) bij batchproeven.

In afb. 1 is het patroon van zo'n concentratieprofiel getekend. We zien dat de snelheid van substraatopname in het begin konstant is en dat bij een bepaalde concentratie die snelheid begint af te nemen; de afnemende wordt steeds sterker naar mate het substraatgehalte verder daalt. De Monod-formulering geeft deze snelheidsveranderingen goed weer:

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{V_{\max}}{y} \cdot X \cdot \frac{S}{K_{MS} + S}$$

Uit afb. 1 is de betekenis van de gebruikte symbolen af te leiden. Het invoeren van de faktor y is niet essentieel. De bedoeling ervan is aansluiting te houden bij de gangbare benaderingswijze, waarbij de groei van de bacteriën wordt gegeven door

$$\frac{dX}{dt} = V_{\max} \cdot X \cdot \frac{S}{K_{MS} + S}$$

terwijl wordt aangenomen dat uit 1 kg substraat altijd y kg slib ontstaat: $X = -y dS$, y heet daarom de yield-factor. Van groter belang is de faktor K_{MS} , de Monod-konstante. K_{MS} wordt uitgedrukt in dezelfde eenheden als S , in ons geval dus als BOD of COD.

Als de substraatconcentratie gelijk is aan K_{MS} is de snelheid van substraatopname de helft van de maximale verwijderings-snelheid: vul voor S maar de waarde K_{MS} in. Op deze manier kan dus ook uit het opgemeten profiel de grootte van K afgeleid worden.

Beter is de zgn. Lineweaver Burke plot

uit te voeren door $\frac{1}{dS/dt}$ tegen $\frac{1}{S}$ uit te

zetten, waarbij we een rechte krijgen met

een helling gelijk aan $\frac{K_{MS}}{V_{\max} X}$ en die $\frac{1}{V_{\max}}$ afsnijdt van de verticale as.

Bij de formulering van het zuurstofverbruik gaat men er meestal van uit, dat de zuurstofopname evenredig verloopt met de substraatverwijdering. Verder wordt aangenomen dat de endogene ademhaling (per kg slib) een onveranderlijke intensiteit heeft en voor het O_2 -verbruik r wordt dus gevonden:

$$r = a - b X$$

Zo'n formulering is alleen geldig als de zuurstofconcentratie géén invloed heeft op de ademhalingsintensiteit: dus als het O_2 -gehalte hoog genoeg is. Is dat niet het geval dan wordt weer de Monod-vergelijking

* Voordracht voor de Nederlandse Vereniging voor Afvalwaterzuivering, op 22 oktober 1974.

toegepast, nu met zuurstof als het substraat:

$$\frac{dC}{dt} = -V'_{max} X \frac{C}{K_{MC} + C} - bX \frac{C}{K_{MC} + C}$$

Deze vergelijking heeft echter alleen betrekking op een situatie waarin de voedingsconcentratie zo groot is dat de zuurstofbehoefte maximaal en dus konstant is.

De batchproef houdt niet meer in dan het stopzetten van de beluchting en het opnemen van de O₂-uitputtingskromme (e.g. afb. 1). Frederickson en Tsuchiya (1970) hebben de Monod-formules voor respectievelijk substraatverwijdering en zuurstofopname gekombineerd tot

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{V_{max}}{y} \cdot X \cdot \frac{S}{K_{MS} + S} \cdot \frac{C}{K_{MC} + C};$$

$$\frac{dC}{dt} = -\left(a \frac{V_{max}}{y} \cdot X \cdot \frac{S}{K_{MS} + S} + bX \right) \frac{C}{K_{MC} + C}$$

De tot nu toe besproken formuleringen hebben betrekking op batchproeven, terwijl we juist behoefte hebben aan beschrijvingen van het continue proces. De uitbreiding in die richting komt straks in een voorbeeld aan bod, eerst willen we ingaan op het proces van de biologische oxydatie en bekijken of we voldoende vertrouwen kunnen opbrengen voor het besproken model.

3. Het proces van biologische oxydatie

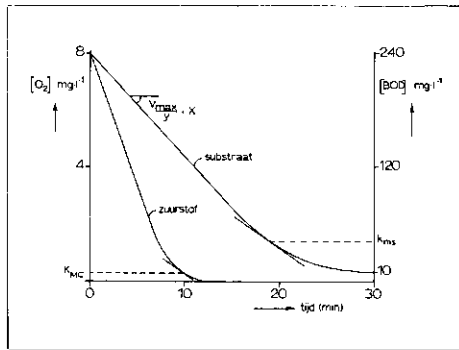
De organische stoffen uit het afvalwater en de opgeloste zuurstof komen via transport in de vloeistof, moleculaire diffusie in de slibvlok en passage van de celwandmembraan de bacteriecellen binnen.

Daar wordt het substraat voor een deel als reservemateriaal opgeslagen (óók bij continue processen) en voor het overige direkt verwerkt. Deze verwerking houdt ook weer een tweedeling in: het substraat wordt óf geoxydeerd óf gebruikt voor de opbouw van nieuwe cellen. Alleen voor de oxydiestap is zuurstof nodig.

De samenstelling en de activiteit van de slibvlok reflecteren de groeiomstandigheden en variëren dus met de procesomstandigheden. Protozoën en andere 'grazers' voeden zich met bacteriën, terwijl afgestorven mikro-organismen als voedsel dienen voor andere, nog levende soortgenoten.

Komen deze zaken in de Monod-formulering tot uiting? Het antwoord op die vraag is natuurlijk: neen.

We moeten het zo zien, dat het model betekenis heeft voor slib, dat gegroeid is onder omstandigheden (soort afvalwater, belasting, zuurstofhuishouding) die in de buurt liggen van de omstandigheden waar



Afb. 1 - Uitputtingskrommen voor zuurstof en substraat, in aparte experimenten opgenomen. Beide kunnen met de Monod-formulering worden

beschreven: $\frac{dZ}{dt} = -V_{max} X \frac{Z}{K_{MZ} + Z}$; Z is de variabele (substraat of zuurstof).

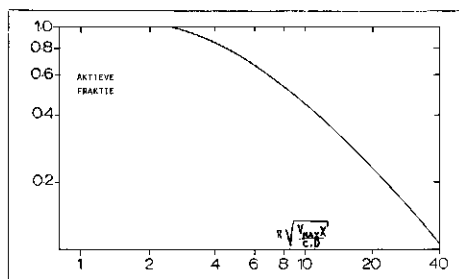
we in de praktijk ook in zijn geïnteresseerd. Bij de bepaling van de konstanten uit het model moet daar ook degelijk rekening mee worden gehouden. Het zal steeds nodig zijn het slib te laten groeien onder condities die de toekomstige praktijksituatie weerspiegelen en met dat slib de batchproeven uit te voeren voor de parameter-evaluatie. Zou het gebruik van het model leiden tot een ontwerp, dat erg ver af ligt van het systeem dat we aanvankelijk op het oog hadden, dan moeten de experimenten en de ontwerpprocedure (met de nieuwe parameters) worden herhaald. Dat wil overigens niet zeggen dat bijvoorbeeld voor normaal huishoudelijk afvalwater en een ideaal gemengd beluchtingsbassin niet met steeds hetzelfde model kan worden volstaan. Door zorgvuldig te werk te gaan, kunnen we dus foutieve toepassingen van het model vermijden. Anders ligt de zaak ten aanzien van de volgende onderwerpen:

- diffusielimitering in de vlok;
- reservemateriaalvorming in de bacteriecellen;

Afb. 2 - Actieve fractie van een bolvormige vlok als functie van de zgn. Thiele-modulus

$$\left(R \sqrt{\frac{V_{max} X}{C \cdot D}} \right); R \text{ straal vlok, } D \text{ diffusie-}$$

coëfficiënt in de vlok), bij nul-de orde reactie. (Ontleend aan Sattersfield: Mass transfer in heterogenous catalysis).



— de complexe samenstelling van het afvalwater.

Deze verschijnselen komen onder alle omstandigheden in de Monod-formulering niet of niet goed tot uiting. Het is hier niet de plaats daar erg uitvoerig op in te gaan, maar we moeten de problematiek toch even noemen.

Diffusielimitering in de vlok

In de literatuur (Wuhrmann (1964), Mueller (1966), Balloid (1970) wordt diffusielimitering in de vlok aangewezen als de oorzaak van de vertraagde zuurstofopname als het O₂-gehalte beneden een bepaalde waarde daalt. Deze stelling wordt afgeleid uit de waarneming, dat bij lage concentraties aan zuurstof de ademhalingsintensiteit weer de vroegere, maximale, waarde terugkrijgt als de vlokken worden stukgeslagen, waarmee de diffusieweerstand dus tot nihil wordt gereduceerd. Gesteld wordt dat tot zeer lage zuurstofconcentraties de ademhaling van losse cellen niet door de O₂-concentratie wordt beïnvloed (nul-de orde in zuurstof, of beter: zeer lage K_{MC}-waarde). Als de cellen tot vlokken zijn geagglomereerd moet de zuurstofconcentratie in de omringende vloeistof voldoende groot zijn om ook de binnenste cellen van de vlok nog van zuurstof te voorzien.

Daalt de concentratie beneden een bepaalde minimumwaarde dan lukt dat niet meer: er ontstaat binnen in de vlok een zuurstofloze kern, die zich vervolgens verder uitbreidt naarmate het zuurstofgehalte verder daalt. De chemische technologie kent goede beschrijvingsmogelijkheden voor deze situatie, het resultaat van één daarvan is als illustratie gegeven in afb.2.

De formule van Monod komt niet met deze modellen overeen. We moeten daar rekening mee houden als we uit de zuurstofconcentratie wat willen afleiden over de zuurstofbehoefte en als die concentratie erg klein is. We denken daarbij aan de toepassing van procesregeling.

Reservemateriaalvorming in de bacteriecellen

Het feit, dat substraat tijdelijk als reservemateriaal wordt opgeslagen en dus pas later wordt geoxydeerd, houdt in dat het zuurstofverbruik niet steeds parallel loopt aan de substraatverwijdering. De eerder genoemde betrekking

$$r = a \frac{dS}{dt}$$

impliceert dat echter wél.

De substraatverwijdering kan al op een laag pitje staan, terwijl de ademhalingsintensiteit nog betrekkelijk groot is.

We zouden in het model een soort vertragingfactor moeten inbouwen, maar dat compliceert de zaak geducht. Uit metingen, waarin het substraatverbruik en de zuurstofopname tegelijk zijn bepaald, zal moeten blijken of de ademhaling zo weinig bij de substraatverwijdering achterblijft dat het gegeven model toch goed genoeg is.

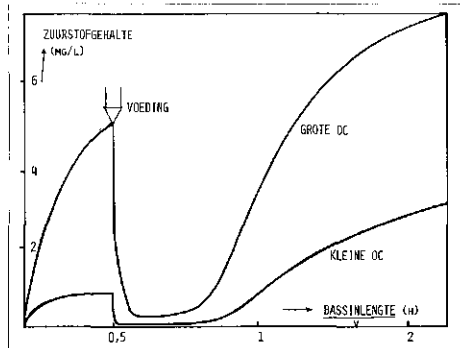
De complexe samenstelling van het rioolwater

We moeten alle experimenten ter vaststelling van de modelparameters natuurlijk doen met het afvalwater waarvoor de installatie gebouwd gaat worden. We doelen hier dan ook niet op het verschil in samenstelling van diverse soorten afvalwater, maar op het feit, dat elk afvalwater uit een — meestal groot — aantal componenten is samengesteld. Door de concentratie uit te drukken in een 'overall variabele' als COD of BOD etc., doen we net of we met één stof te maken hebben en of de concentratie van die stof maatgevend is voor de substraatsopnamesnelheid.

Door Wuhrmann (1964), Chudoba (1967) en Tischler en Eckenfelder (1968) is echter vastgesteld dat de verschillende stoffen uit het afvalwater (vaak) met een konstante snelheid worden verwijderd, tot ze 'op' zijn (d.w.z. tot de concentratie vrijwel 0 is geworden, helemaal nulde orde is theoretisch niet mogelijk). We moeten de zaak kennelijk zo opvatten, dat de afname van de BOD/COD-verwijderingssnelheid bij lage concentraties ontstaat doordat sommige stoffen uit het voedingsmedium zijn verdwenen.

Maar dat heeft ook consequenties voor de formulering van het proces! Bij een tweemaal zo hoge beginkoncentratie in een batchproef is ook die concentratie tweemaal zo hoog, waarbij zoveel stoffen net 'op' zijn dat de BOD/TOC-verwijderingssnelheid de helft is geworden van de beginsnelheid. (Dit is gemakkelijk in te zien, door de BOD-uitputtings-'kromme' te konstrueren uit een klein aantal rechten). Maar dat betekent dan ook, dat de K_{MC} -waarde (daarbij is immers de snelheid de helft van de maximale waarde) een functie is van de beginkoncentratie en zelfs evenredig daarmee verloopt als de componenten helemaal via een nulde orde proces zouden worden verwijderd. Naar ons gevoel is dit bezwaar het meest beperkend voor de toepassing van het eenvoudige Monod-model, dat dan ook oorspronkelijk niet voor de slijbgroei op rioolwater werd opgesteld.

We gaan er echter toch nog maar — in navolging van de hoofdstroming van de Engelstalige literatuur — van uit dat onder vele omstandigheden deze formulering voldoende bestaansrecht heeft en willen



Afb. 3 - Simulatie zuurstofgehalte beluchttingsbassin met propstroming bij kleine en grote OC (vereenvoudigd model).

nu de toepassing ervan in de praktijk aan de hand van een voorbeeld demonstreren.

4. Een toepassing

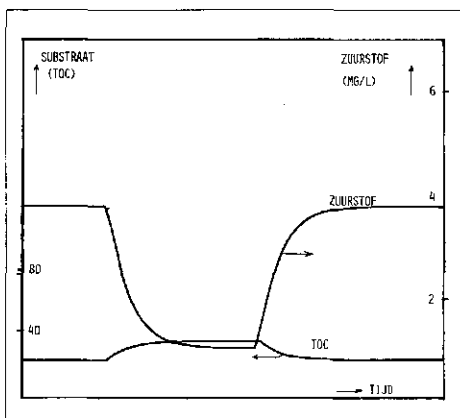
Stel, dat we denken aan de bouw van een traditioneel, langgerekt beluchttingsbassin, terwijl we streven naar een optimale zuurstoftoevoer. We bedenken dat de zuurstofbehoefte op de plaats van rioolwatertoevoer maximaal is en willen daaraan tegemoet komen door het toepassen van step loading of tapered aeration.

Op de eerste plaats moet vastgesteld worden, dat het gebruik van de OC/load-verhouding hier niet zo goed werkt, omdat daarmee een (tijd- en) plaatsgemiddelde zuurstofbehoefte wordt uitgerekend.

De OC/load-verhouding is immers opgebouwd uit factoren die we als een soort gemiddelde over het hele beluchttingsbassin moeten opvatten:

- zuiveringspercentage;
- verhoudingsgetal maximum/gemiddelde dagelijkse belasting;
- geoxydeerde fraktie van de toegevoerde BOD_{∞} ;
- het te handhaven relatieve zuurstofdeficit $C_s - C$;
- de α -faktor.

Afb. 4 - Simulatie O_2 -tijd profiel in ideaal gemengd beluchttingsbassin + substraatprofiel. Blokverstoring.



Er is bijv. ook maar sprake van één bepaalde waarde voor het zuurstofgehalte C, terwijl we juist geïnteresseerd zijn in de grootte van C op elke plaats in het beluchttingsbassin met het oog op de toepassing van step loading of tapered aeration.

We willen liever een formulering hebben, waarin tot uiting komt dat de zuurstofbehoefte samenhangt met de substraatconcentratie en kiezen dus de Monod-formulering. Deze komt als reaktieterm voor in materiaalbalansen voor substraat, slijb en zuurstof, bij elkaar leveren deze balansen het model op waarmee we het optimale procesontwerp denken te kunnen realiseren.

Voor de doorzichtigheid van de methode gaan we van een tweetal aannames uit, die in de praktijk meestal niet gerechtvaardigd zijn: volmaakte propstroming en een konstant slijbgehalte. We moeten dus eerst met een model waarin wél slijbgroei voorkomt het slijbgehalte en de spuislijbstream hebben berekend, maar we kunnen nu, gebruik makend van dat slijbgehalte de verdeling van de zuurstofbehoefte in het beluchttingsbassin uitrekenen.

De propstroming betekent, dat een volumelement van het slijb/watermengsel ('prop') bij de passage door de aeratietank geen substraat uitwisselt met zijn omgeving en onder stationaire omstandigheden zijn dan ook het substraat- en het zuurstofprofiel in het bassin overeenkomstig met de tijdprofielen bij een batchproef. De OC, het slijbgehalte en de recirculatieverhouding moeten in beide gevallen natuurlijk gelijk zijn (recirculatieverhouding bij de batchproef = volume slijb vóór de rioolwatertoevoering/volume toegevoerde rioolwater). Onder stationaire omstandigheden (voorwaarde: konstante belasting), en met $x = v \cdot t$ schrijven we dus voor het zuurstofprofiel in het beluchttingsbassin:

$$\frac{dC}{dx} = k_L a (C_s - C) - \left(a \frac{V_{max}}{y} \cdot X \cdot \frac{S}{M_{MC} + S} + bX \right) \frac{C}{K_{MC} + C}$$

een formule die we ook kunnen toepassen als de rioolwatertoevoer niet vóór in het bassin plaatsvindt, maar meer in de richting van de afloop of als het rioolwater over meerdere toevoerplaatsen verdeeld wordt. We verdelen dan het bassin in secties en rekenen voor elke sectie het profiel uit. Daarbij berekenen we het slijbgehalte en de substraatconcentratie aan het begin van elke sectie met behulp van het verhoudingsgetal slijbflow: rioolwaterflow. Het slijb verdunt het rioolwater en omgekeerd. We nemen daarbij aan dat het rioolwater geen slijb bevat en dat het retourslijb uit de

nabezinking geen verwijderbaar substraat meer meevoert.

N.B. Vele van de hier genoemde vereenvoudigingen zijn voor de uitvoering van de berekeningen niet noodzakelijk, maar zijn alleen ingevoerd om de zaak zo weinig mogelijk gekompliceerd te maken.

Een voorbeeld van het resultaat van een berekening met het model geeft afb. 3. Met dezelfde aanpak kan de respons van een ideale menger op een tijdelijke piekbelasting worden doorgerekend, zij het dat natuurlijk de materiaalbalansen een andere vorm hebben. In het voorbeeld van afb. 4 is zo'n berekende respons geschetst. Het doel van deze en dergelijke simulaties is de omstandigheid zo te kiezen, dat we het gewenste zuiveringsresultaat tegen minimale kosten inderdaad bereiken. Voor de zuurstofhuishouding betekent dat net zoveel zuurstof geven als nodig is en overcapaciteit vermijden (hoewel het coûte que coûte tegengaan van elke mg overschot aan zuurstof, bijv. door toepassing van dure, ingewikkelde regelingen, soms nog duurder is).

Zorgvuldig kan worden bepaald wat het effect is van het aanbrennen van procesmodificaties als step-loading en tapered aeration, zowel op de zuurstofhuishouding als op het zuiveringseffect. Gegeven de aard van het rioolwater en de te bereiken zuiveringsgraad en andere mogelijke eisen aan het effluent kunnen de optimale procescondities op die manier worden vastgelegd. Zo'n optimalisering is wel wat ingewikkelder dan in dit verhaal tot uiting komt, ons oogmerk was echter de aandacht op de methode te vestigen, waarbij tevens een schets kon worden gegeven van de samenhang tussen zuurstofbehoefte en procescondities van het actief-slibproces, wat ook de opzet was van de NVA-lezing die in dit artikel is weergegeven.

5. Slotbeschouwing

De bedoeling van dit artikel is een inzicht te verschaffen in de zuurstofbehoefte van het actief-slibproces. Dat kan op verschillende manieren gedaan worden, afhankelijk van wat men precies van die zuurstofbehoefte wil weten. Wij hebben voorbij gezien aan de berekeningen van de gemiddelde zuurstofbehoefte, zoals die uit de OC/load-verhouding naar voren komt en wat meer gekeken naar variaties in zuurstofbehoefte naar tijd en plaats. Dit kon goed gebeuren door het niet bij een kwalitatieve beschouwing van variaties in de O_2 -behoefte te laten maar tegelijk een model te geven, waarmee het verloop van het zuurstofgehalte in het beluchtingsbassin kan worden gesimuleerd. Vluchtig kon ook aangegeven worden hoe het proces van de biologische

Symbolenlijst

[kg O_2 /kg S]	substraatverademingscoëfficiënt	a
[kg O_2 /kg X.h]	endogene ademhalingsconstante	b
[kg m^{-3}]	zuurstof concentratie	C
[kg m^{-3}]	zuurstof verzadigingsconcentratie	C_s
[m^2sec^{-1}]	diffusiecoëfficiënt voor O_2 in de slibvlok	D
[h^{-1}]	zuurstof overdrachtscoëfficiënt	k_{1a}
[kg m^{-3}]	Monod-konstante voor zuurstof	K_{MC}
[kg m^{-3}]	Monod-konstante voor substraat	K_{MS}
[m]	straal van de vlok	R
[kg $m^{-3} h^{-1}$]	ademhalingsintensiteit	r
[kg m^{-3}]	substraatconcentratie	S
[$m h^{-1}$]	stroomsnelheid in het beluchtingsbassin	v
[h^{-1}]	maximale substraatverwijderingssnelheid	V_{max}
[h^{-1}]	maximale zuurstofopnamesnelheid	V'_{max}
[m]	lengte koördinaat in beluchtingsbassin	x
[kg m^{-3}]	slibconcentratie	X
[kg X/kg S]	yield coëfficiënt	y

oxydatie verloopt en hoe de samenhang is tussen zuurstofconcentratie en zuurstofaanvoer naar de mikro-organismen.

Hierbij is dieper ingegaan op de zuurstofbehoefte dan nodig is voor het uitleggen van het model, maar dat heeft het voordeel dat een beeld gegeven wordt van de eigenlijke processen, die tot het uiteindelijke zuurstofverbruik aanleiding geven.

Elk model geeft een vereenvoudigd beeld van de werkelijkheid. Ook in ons geval moeten we ons steeds afvragen of het model nog wel voldoende betekenis heeft om de antwoorden te kunnen geven waarin we geïnteresseerd zijn. Het is daarom van belang niet alleen het model te kunnen hanteren, maar ook de grenzen van het gebruik goed te kennen. Van tevoren weet men die grenzen nooit precies, maar altijd geeft verificatie door experimenteel onderzoek de mogelijkheid na te gaan of onze veronderstellingen over de toepasbaarheid van een bepaald model wel juist waren.

We vragen wel begrip voor de omstandigheid, dat we in dit bestek noch het zuurstofverbruik en -transport, noch het gebruik van het simulatiemodel sekuur en uitputtend hebben kunnen behandelen; daarvoor zij verwezen naar de aangehaalde literatuur.

Literatuur

- Baillod, C. R. en Boyle, W. C. (1970), *Mass transfer limitations in substrate removal*. J. of the San. Div., ASCE, 525-545.
- Benedek, P. en Horvath, I. (1967), *A practical approach to activated sludge kinetics*. Water research, 1, 663-682.
- Chudoba, J. (1967), *Residual organic matter in activated sludge process effluents*. Serie artikelen in Scientific papers of the Inst. of Chem. Techn., Prague.
- Eckhoff, D. W. en Jenkins, D. (1966), *Transient loading effects in the activated sludge process*. In Proc. 3rd Int. Conf. Wat. Poll. Res., München.

- Frederickson, A. G., Megee, R. D. en Tsuchiya, H. M. (1970), *Mathematical models for fermentation processes*. Adv. in Appl. Microbiol., 13, 419.
- Monod, J. (1949), *The growth of bacterial cultures*. Ann. Rev. Microbiol. 3, 371-394.
- Mueller, J. A., Boyle, W. C. en Lightfoot (1966), *Oxygen diffusion through a pure culture floc of Zoogloea ramigera*. Proc. 21st Ind. Waste Conf., Purdue Univ., 964-995.
- Pearson, E. A. (1966), *Kinetics of biological treatment*. Adv. in Water Qual. Imp., Univ. Texas, Austin.
- Tench, H. B. en Morton, A. Y. (1962), *The application of enzyme kinetics to activated sludge research*. J. Inst. Sewage Pur. 5, 478-486.
- Tischler, L. F. en Eckenfelder, W. W. (1968), *Linear substrate removal in the activated sludge process*. 4th Int. Conf. on Wat. Poll. Res., Praag.
- Wuhrmann, K. (1964), *Microbial aspects of water pollution control*. Advances in Appl. Microbiol., 6, 119-150.

