

NN31085.92-07

1

11-02-07

minist

VR

EZ

L&

1/8

IRK

RSYS

VAN

se l: Verkenne landerze

en airt

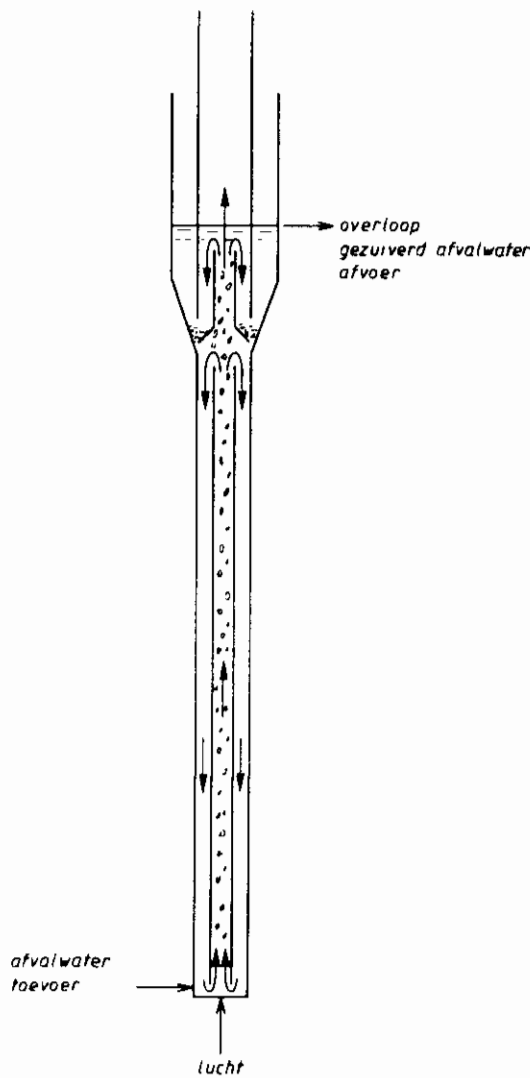
NR 11003, 32-0711

CA1

BIBLIOTHEEK STARINGGEBOUW

ONTWIKKELING VAN EEN SLIB-OP- DRAGERSYSTEEM VOOR DE AEROBE ZUIVERING VAN STEDELIJK AFVALWATER

Fase I: Verkennend onderzoek in een
drie-fasen airliftreactor



Werkrapport februari 1987

STOWA
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 8090
3503 RB Utrecht
tel. 030-321199
fax 030-321766

Publikaties en het publikatieoverzicht
kunt u uitsluitend bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079-611188
fax 079-613927
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.

Ing R. Kampf
Ir D.H. Eikelboom
Ir J.F. de Kreuk

08 SEP. 1997

11/10/97

<u>INHOUD</u>	blz.
TEN GELEIDE	4
SAMENVATTING	6
1. INLEIDING	10
1.1 Algemeen	10
1.2 De drie-fasen airliftreactor	12
1.3 Opzet van het onderzoek	15
2. MATERIALEN EN METHODEN	18
2.1 Stedelijk afvalwater	18
2.2 Proefinstallaties	19
2.3 Dragermaterialen	21
2.4 Experimenteel	25
2.5 Microscopisch onderzoek	29
3. RESULTATEN	31
3.1 Vooronderzoek	32
3.1.1 Vooronderzoek - experiment 1	32
3.1.2 Vooronderzoek - experiment 2	36
3.1.3 Conclusies uit het vooronderzoek	40
3.2 Selectie van dragermateriaal	41
3.2.1 Procesgegevens drageronderzoek	42
3.2.2 Onderzoek met zirkoonzand, zilverzand, biogrog, puimsteen en elektrografiet (serie 1)	44
3.2.3 Onderzoek met zilverzand, biogrog en puimsteen (serie 2)	46
3.2.3.1 Aangroei biomassa	48
3.2.3.2 Verkennend onderzoek naar onthechting van biomassa	48
3.2.3.3 Zuiveringsresultaten	52
3.2.3.4 Conclusies serie 2	54
3.2.4 Onderzoek met lava en puimsteen (serie 3)	54
3.2.4.1 Aangroei biomassa	57
3.2.4.2 Zuiveringsresultaten	58
3.2.4.3 Conclusies serie 3	59
3.2.5 Conclusies drageronderzoek	59

3.3	Verkennd onderzoek bij langere verblijftijden (serie 5)	60
3.3.1	Procesgegevens	60
3.3.2	Aangroei biomassa	61
3.3.3	Zuiveringsresultaten	64
3.3.4	Conclusies serie 5	69
3.4	Onderzoek 25 l schaal (serie 4)	70
3.4.1	Procesgegevens	70
3.4.2	Aangroei biomassa	71
3.4.3	Zuiveringsresultaten: CZV-omzetting	74
3.4.4	Zuiveringsresultaten: stikstofomzettingen	78
3.4.5	Conclusies serie 4	79
4.	BIOFILMVORMING IN EEN AIRLIFTREACTOR	81
4.1	Microscopisch onderzoek	81
4.1.1	Hechting van microorganismen aan een vast oppervlak	81
4.1.2	Hechting en biofilmvorming tijdens de diverse experimenten	82
4.1.3	Onthechtingsproeven	101
4.1.4	Groei van draadvormende organismen	101
4.1.5	Signalen voor een instabiele situatie	104
4.1.6	Groei van protozoën	106
4.2	Kwantitatieve aspecten van biofilmvorming	107
4.2.1	AangroEIFase	108
4.2.2	Stabilisatie en uitspoeling	113
5.	ZUIVERINGSTECHNISCHE ASPECTEN	115
5.1	Hoeveelheid biomassa	115
5.2	CZV-reductie	118
5.3	Nitrificatie	123
5.4	Slibproductie	124
6.	EVALUATIE	128
6.1	Biofilmvorming en processtabiliteit	128
6.2	De zuivering van stedelijk afvalwater in een drie-fasen airliftreactor	131
6.3	Punten voor nader onderzoek	134
7.	LITERATUUR	139

TEN GELEIDE

Door het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne) werd aan de Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie TNO, met Gist-brocades als participant, onderzoek opgedragen naar het ontwikkelen en vaststellen van de toepassingsmogelijkheden van een nieuw ruimtebesparend zuiveringssysteem met goed bezinkbaar slib voor de aërobe biologische zuivering van stedelijk afvalwater. De basis van het te ontwikkelen zuiveringssysteem is de aërobe slib-opdragertechnologie, zoals die door Gist-brocades is ontwikkeld voor haar bedrijfsafvalwater.

Het onderzoek werd financieel gedragen door de overheid vanuit de subsidie-regeling Schone Technologie-Water (samenwerkingsverband van de ministeries Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Economische Zaken, Landbouw en Visserij en Verkeer en Waterstaat), de Stichting Toegepast Onderzoek Reiniging Afvalwater (STORA) en de beide opdrachtnemers.

Reeds eerder werd een literatuuronderzoek "Mogelijkheden van slib-op-drager-systemen voor de aërobe biologische zuivering van stedelijk afvalwater" uitgevoerd. Hierin wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken bij de ontwikkeling van slib-op-dragersystemen voor de oxidatief-biologische zuivering van stedelijk afvalwater. De drie-fasen airliftreactor, door Gist-brocades voor het eigen industriële afvalwater ontwikkeld, kwam in de literatuurstudie als een mogelijk alternatief voor de huidige aërobe behandeling van stedelijk afvalwater naar voren.

In dit werkrapport worden de eerste ervaringen op laboratoriumschaal met de drie-fasen airliftreactor voor stedelijk afvalwater besproken. Naast deze versie is nog een samenvattend rapport* verschenen met de hoofdlijnen van dit onderzoek.

Het onderzoek werd begeleid door een commissie bestaande uit:

Ir A.E. van Giffen (voorzitter, Hoogheemraadschap West-Brabant),
Ing. M.M.J. Allessie (VROM-DGMH), (tot november 1986, daarna
Ir A.J. van der Vlugt),

* Het rapport is verkrijgbaar bij STORA, Postbus 80200, 2508 GE 's-Gravenhage.

Dr Ir G. Schraa (Landbouw Universiteit Wageningen),
Ir P.C. Stamperius (STORA),
Ir W. van Starckenburg (DBW/RIZA),
Ir K. Visscher (RIVM/LAE),
Ir T.W.M. Wouda (Gemeenschappelijke Technologische Dienst Oost-Brabant).

Gist-brocades was in het onderzoek vertegenwoordigd door:

Dr Ir J.J. Heijnen,
Ir H. Hols

Naast de auteurs namen van TNO-zijde deel:

Dr Ir W.H. Rulkens (projectleider),
Ir B.A. Heide
Dr Ir J.M.A. Janssen
Ing F. v. Voorneburg

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft verkennend onderzoek op laboratoriumschaal aan een drie-fasen airliftreactor met slib-op-drager voor de aërobe zuivering van stedelijk afvalwater. Een dergelijk zuiveringssysteem is door Gist-brocades ontwikkeld voor het eigen afvalwater.

De huidige, oxidatief biologische zuiveringsinrichtingen voor stedelijk afvalwater hebben een geringe hoeveelheid actieve biomassa per m^3 beluchtingsruimte. Dit heeft tot gevolg dat het benodigde apparaatvolume en dus het vereiste terreinoppervlak per m^3 te zuiveren afvalwater groot is.

Toepassing van een slib-op-dragersysteem, waarbij de actieve biomassa op een inerte drager is aangebracht en waarbij de concentratie aan biomassa per m^3 apparaatvolume hoog is, kan hier in beginsel een oplossing bieden.

Het zuiveringsproces berust op hetzelfde biologische principe als dat van de conventionele zuiveringsprocessen. Een groot contactoppervlak en hoge biomassaconcentratie resulteren echter in een compactere bouwwijze en lagere bouwkosten.

Het onderzoek is uitgevoerd in reactoren van 2 l en 25 l bij hydraulische verblijftijden van 0,5 - 1 uur. De CZV-belasting bedroeg 15 - 30 kg CZV/ m^3 .dag. Op 2 l schaal zijn enkele experimenten uitgevoerd met langere (gesommeerde) hydraulische verblijftijden tot 3,5 uur.

In de experimenten is voornamelijk aandacht geschonken aan de keuze van geschikte dragermaterialen, de vorming van een stabiele biofilm op het dragermateriaal, het verkrijgen en handhaven van een hoge biomassaconcentratie, het zuiveringsrendement en aan nitrificatie. Er werd overeenkomstig de ervaringen bij Gist-brocades geen geregelde slibafvoer toegepast.

dragermateriaal en biofilmvorming

Turbulente omstandigheden in een drie-fasenreactor verhinderen de vorming van een biofilm niet, tenzij het luchtdebiet wordt opgevoerd tot een extreem niveau, zeer veel hoger dan nodig om in de O_2 -behoefte te voorzien.

De biofilmvorming wordt vooral bepaald door de CZV-volumebelasting, het beschikbare hechtingsoppervlak (m^2/m^3) en de systeemtemperatuur. De combinatie van een hoge CZV-volumebelasting, een relatief klein hechtingsoppervlak en een vrij hoge systeemtemperatuur leidt tot een zeer snelle ontwikkeling van

de biofilm. De filmvorming verloopt trager, maar lijkt beter controleerbaar, als van deze combinatie wordt afgeweken.

Bij een snelle groei van de biofilm blijken de microorganismen zich niet alleen in de poriën, maar ook op gladde "buitenoppervlakken" te hechten. Bij een langzame ontwikkeling start de hechting preferent op beschutte plaatsen, wat betekent dat dragermaterialen die poreus zijn of over een ruw oppervlak beschikken beter bruikbaar zijn. De hechting van de biomassa aan poreuze, ruwe drager is onder de zeer turbulente condities in de airliftreactor zeer stevig; in de regel vormt zich een concentrische biolaag om de korrel.

Bij lagere aangroei snelheden en weinig poreus dragermateriaal ontstaat niet-concentrische, pluksgewijze begroeiing; onder deze omstandigheden wordt slechts een deel van het beschikbare oppervlak effectief benut.

Van de onderzochte dragermaterialen zilverzand, zirkoonzand, biogrog, electrografiet, puimsteen en lava - alle met korreldiameter 0,1 - 0,3 mm, kwamen het poreuze puimsteen en het ruwe lava als de meest geschikte naar voren. Ook met biogrog werden echter goede resultaten behaald.

De aangroei snelheid en de duur van de aangroei periode waren goed reproduceerbaar. De hoeveelheid biomassa neemt bij verblijftijden van ≥ 1 uur vrijwel lineair toe. Na de aangroei periode fluctueerde de biomassaconcentratie aanmerkelijk, waardoor de processtabiliteit te wensen liet. Bij enkele proeven, met verblijftijden van 0,4 - 0,8 uur, verliep de toename van gehechte biomassa volgens een logaritmisch patroon. Dit leidde in die gevallen tot een instabiele situatie, waarbij begroeide drager na verloop van tijd massaal uitspoelde. Steeds bleek hierbij een massale groei van draadvormende organismen en/of het samenballen van begroeide deeltjes te zijn opgetreden. Deze massale ontwikkeling van draadvormende organismen zou kunnen worden toegeschreven aan de zeer korte reële waterverblijftijd. Een groot deel van de inhoud van de reactor wordt dan door biomassa + draadvormende organismen ingenomen.

De droogrest van drager + biomassa bedroeg 100 - 250 g/l. Het korrelvolume (van de schone, onbegroeide) drager was 4 - 12%. Uitgaande van een bolvormige, gladde dragerkorrel bedroeg het specifiek drageroppervlakte 1000 - 4000 m²/m³.

De hoeveelheid biomassa aan de drager, na de aangroeiperiode, bedroeg bij een verblijftijd van 0,5 - 1 uur 10 - 40 g CZV-biomassa/l. Bij verkennend onderzoek met langere verblijftijden bleef de hoeveelheid biomassa aan de drager beperkt tot 3 - 5 g CZV-biomassa/l.

De dikte van de biolaag bedroeg maximaal 200 μm . Een groter hechtingsoppervlak leidt tot een dunnere biofilm. Er zijn aanwijzingen dat een biolaag met een dikte van 25 - 50 μm optimaal is. Niet alleen de hoeveelheid biomassa is van belang, maar ook de dikte van de biolaag.

zuiveringsrendement

De biolaag in een drie-fasen slib-op-dragersysteem zet voornamelijk opgelost materiaal om. De hoeveelheid gesuspendeerd materiaal in effluent en influent is globaal gelijk. In hoeverre de aard van het gesuspendeerde materiaal in influent en effluent hetzelfde is, is niet bekend. Het rendement is daarom alleen aan de verwijdering van opgeloste bestanddelen beoordeeld. De CZV-reducties bedragen globaal 60 tot 80% voor hydraulische verblijftijden van 0,5 tot respectievelijk 2 uur. Bij optimalisatie van de bedrijfsvoering mogen verwijderingsrendementen op basis van het CZV van gefiltreerd influent en effluent worden verwacht van 70 tot 90%.

Bij de toepassing van de drie-fasen airliftreactor voor de zuivering van stedelijk afvalwater zal gesuspendeerd materiaal op andere wijze uit het effluent moeten worden verwijderd.

Bij een vloeistofverblijftijd van 1 uur ontwikkelt zich na ongeveer 80 dagen een nitrificerende populatie. Bij langere verblijftijden is dit aanzienlijk korter. Bij een verblijftijd van $\geq 1,5$ uur is volledige nitrificatie gecombineerd met CZV-verwijdering mogelijk.

Door de kleine schaal waarop is gewerkt, konden geen betrouwbare cijfers worden verkregen van de slibproductie.

conclusies

Zuivering van stedelijk afvalwater in een drie-fasen airliftreactor met slib-op-drager biedt goede perspectieven. Bij een verblijftijd van 0,5 uur is op basis van gefiltreerd effluent een CZV-verwijdering van 70 tot 80% haalbaar.

Bij een verblijftijd van 1 uur kan een rendement van 80 - 85% worden bereikt. Nitrificatie treedt op bij een verblijftijd van ≥ 1 uur. Het is mogelijk gebleken om hoge gehalten (10 - 30 g droogrest/l) aan actieve biomassa te verwezenlijken.

In verder onderzoek dient aandacht te worden gegeven aan de processtabiliteit, de slibproductie, de aard en het gedrag van gesuspendeerd materiaal, hechtingsmechanismen, biomassa-samenstelling en substraatopname.

1. INLEIDING

1.1 ALGEMEEN

De huidige, oxidatief biologische zuiveringsinrichtingen (actief-slib- en oxidatiebedinstallaties) voor stedelijk afvalwater hebben een geringe hoeveelheid actieve biomassa per m³ beluchtingsruimte. Dit heeft tot gevolg dat de hoeveelheid "afvalstoffen" die per m³ beluchtingsruimte en per tijdseenheid kan worden behandeld gering is, waardoor het benodigde volume en dus het vereiste terreinoppervlak per m³ te zuiveren afvalwater groot is.

Toepassing van een slib-op-dragersysteem, waarbij de actieve biomassa op een inerte drager, bijvoorbeeld zand, is aangebracht en waarbij de concentratie aan biomassa per m³ apparaatvolume hoog is, kan hier in beginsel een oplossing bieden. Het zuiveringsproces berust op hetzelfde principe als dat van de conventionele zuiveringsprocessen. Een groot contactoppervlak en een hoge biomassaconcentratie resulteren echter in een compacte bouwwijze en lagere bouwkosten.

Deze voordelen zijn overigens pas echt van belang, indien een slib-op-dragersysteem ongeveer dezelfde zuiveringstechnische "prestaties" kan leveren als conventionele zuiveringsinrichtingen. Bij de ontwikkeling, of beoordeling van een slib-op-dragersysteem moet aandacht worden geschonken aan een groot aantal aspecten, zoals:

- *hechting van micro-organismen*

Onder welke omstandigheden hechten micro-organismen zich aan dragermateriaal, welke dragermaterialen kunnen worden gebruikt, is het proces reproduceerbaar, is de filmvorming beheersbaar, welk gehalte aan biomassa kan worden bereikt, wat is de activiteit/kwaliteit van de biomassa;

- *dragermateriaal*

Eigenschappen van dragermateriaal: vorm en grootte van korrel, ruwheid, porositeit, dichtheid, mechanische sterkte, kostprijs;

- *influent*

De invloed van fluctuaties in samenstelling, hoeveelheid en temperatuur van het te zuiveren afvalwater op het functioneren van de installatie.

Welke eisen moeten worden gesteld aan de voorbezinking of voorbehandeling;

- *effluent*

De te behalen effluentkwaliteit in fysische, chemisch-biochemische en microbiologische zin;

- *slibproductie*

Drogestofgehalte, hoeveelheid gevormd slib, noodzaak en wijze van slibafvoer, afvoer van begroeide drager en terugvoer van onthechte drager, waarvan de biolaag is verwijderd;

- *aëratie*

Het rendement van de zuurstofoverdracht;

- *ontwerp en functioneren van de reactor*

De technische uitvoering van het proces, complexiteit van de installatie, bedrijfszekerheid, en energiekosten.

Door Gist-brocades zijn de toepassingsmogelijkheden van zowel aërobe als anaërobe slib-op-dragersystemen voor de zuivering van het eigen industrieel afvalwater onderzocht. Dit heeft geleid tot de bouw van twee praktijkinstallaties, bestaande uit een anaërobe verzuringsreactor en een methaanreactor, waarmee het CZV van het afvalwater van Gist-brocades wordt verminderd. Een aërobe drie-fasen airliftreactor voor de toepassing van de ontwikkelde aërobe fluïdbed-techniek voor nitrificatie wordt in 1987 gerealiseerd.

In de literatuurstudie over de mogelijkheden van slib-op-dragersystemen voor de aërobe biologische zuivering van stedelijk afvalwater [1] wordt vermeld, dat de bruikbaarheid van het drie-fasen (airlift) slib-op-dragersysteem van Gist-brocades voor de zuivering van stedelijk afvalwater zich nog moet bewijzen. De drie-fasen airliftreactor kon hierin bij gebrek aan informatie nog niet worden besproken. Het onderhavige rapport behandelt de resultaten van verkennend onderzoek op laboratoriumschaal met een drie-fasen (airlift) slib-op-dragersysteem voor de aërobe zuivering van stedelijk afvalwater.

Het hoofddoel van het hier gerapporteerde onderzoek was om op laboratoriumschaal (2 l en 25 l schaal) na te gaan of de drie-fasen airliftreactor in principe bruikbaar is voor de aërobe behandeling van stedelijk afvalwater. Hierbij stonden de volgende vragen centraal:

- ontwikkelt zich onder de turbulente omstandigheden in een airliftreactor een stabiele biofilm op het dragermateriaal bij de behandeling van stedelijk afvalwater. De CZV-waarde van stedelijk afvalwater is veel lager (factor 5 - 10 lager) dan die van het industriële afvalwater van Gist-brocades. Ook de temperatuur ligt met 5 - 20°C op een lager niveau;
- welke methoden zijn geschikt voor de karakterisering van een biofilm, monsterneming uit een airliftreactor;
- welke dragermaterialen verdienen de voorkeur;
- is het mogelijk een hoge biomassaconcentratie (15 - 30 kg/m³) in de reactor te verkrijgen (en te handhaven) bij een korte hydraulische verblijftijd (0,5 - 1 uur) en een CZV-volumebelasting van 15 - 30 kg/m³·dag;
- wat is hierbij het zuiveringsrendement;
- vindt onder deze omstandigheden nitrificatie plaats;
- wat is het effect van een meer-tapsconfiguratie?

1.2 DE DRIE-FASEN AIRLIFTREACTOR

In het literatuuronderzoek naar de mogelijkheden van slib-op-dragersystemen [1] is aandacht geschonken aan de ontwikkeling van het drie-fasen (airlift) slib-op-dragersysteem. Het systeem wordt hierin vergeleken met twee-fasen systemen (bijv. Dorr-Oliver) en conventionele actief-slibsystemen. Nadere informatie over de ontwikkeling en toepassing van de drie-fasen airliftreactor bij Gist-brocades voor de behandeling van het eigen industriële afvalwater is onder meer vermeld in [2, 3]. Kenmerkend voor een dergelijke reactor zijn het airliftsysteem en het drie-fasensysteem van water, drager + biomassa en lucht.

In de twee-fasen reactor van Dorr-Oliver wordt zuurstof buiten de reactor in een waterstroom opgelost. Met deze waterstroom wordt in de reactor het dragermateriaal gefluïdiseerd. De waterstroom heeft dus twee functies: zuurstofinbreng en fluïdisatie. De begroeide dragerkorrels zweven eigenlijk in een opwaartse waterstroom. De turbulentie rond de korrels is betrekkelijk gering. Er vindt een classificatie plaats op korreldiameter (dus op dikte van de biofilm). De minst begroeide korrels bevinden zich onderin en de dikst begroeide bovenin de kolom.

De drie-fasen airliftreactor van Gist-brocades is eigenlijk geen fluidbed-reactor zoals in [1] is vermeld. Figuur 1.1 geeft een principeschets. De beluchtingsruimte A bestaat uit twee concentrische buizen. In de benodigde zuurstof wordt voorzien door lucht onderin de binnenbuis van de reactor in te leiden. De reactor is hoog ten opzichte van zijn diameter (hoogte/diameter verhouding = 10 à 30). Per oppervlakte-eenheid wordt veel lucht ingebracht. Er ontstaat hierdoor een sterk turbulente opwaartse stroom van lucht, water en (begroeide) drager in de binnenbuis. Door de buitenbuis gaat de stroom naar beneden. De ingebrachte lucht wordt in de gasafscheider B afgescheiden. Het in de bezinker C afgescheiden begroeide dragermateriaal stroomt terug naar de beluchtingsruimte.

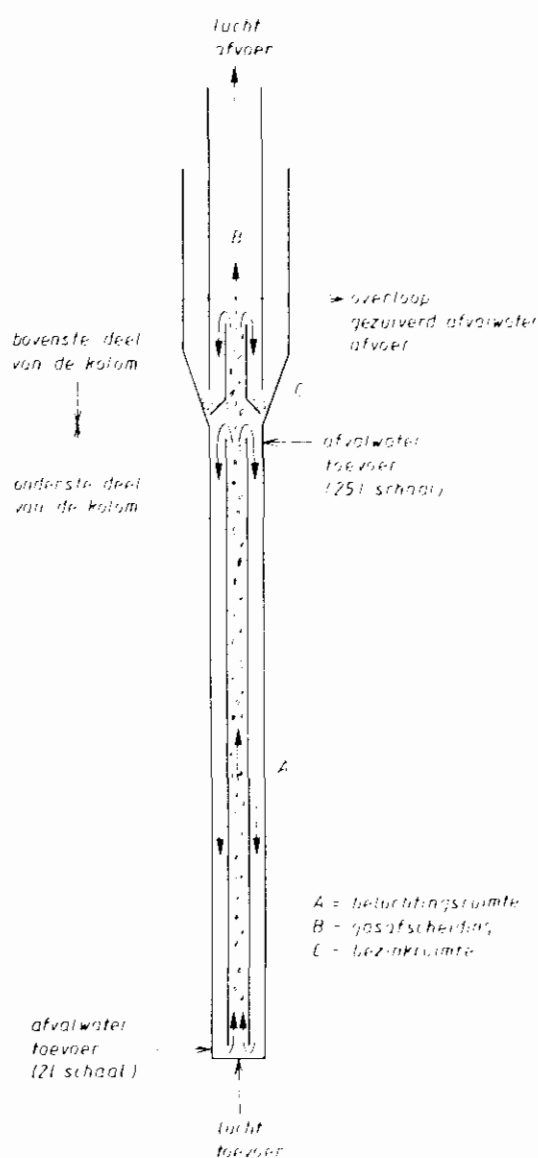


Fig. 1.1. Principeschets van de airliftreactor

De opwaartse stroming in de binnenbuis van de airliftreactor is groter dan voor fluïdisatie nodig is. Door de sterke pompwerking is de menging in een airliftreactor veel intensiever dan in een fluïdbedreactor. De turbulentie rond de begroeide dragerkorrels is eveneens veel groter; daarnaast vindt er geen of nauwelijks classificatie van korrels op diameter plaats. De voornaamste technologische uitgangspunten zijn samengevat in tabel 1.1.

Tabel 1.1 Technologische uitgangspunten van de drie-fasen airliftreactor

Biomassaconcentratie	:	15-30 kg d.s./m ³
Volume ingenomen door drager (= korrelvolume)	:	5-12%
Dragerconcentratie	:	100-250 kg/m ³
Dragermateriaal, bijvoorbeeld	:	zand/lava/puimsteen
Dragerdiameter	:	0,1-0,3 mm
Slibbelasting	:	1-2 kg CZV/kg d.s.dag
Volumebelasting	:	15-30 kg CZV/m ³ .dag
Verblijftijd	:	0,5-1 uur
Geen controle van de dikte van de biolaag		

Uitgaande van een bolvormige, gladde drager bedraagt de specifiek drageroppervlakte 1000 - 4000 m²/m³ (dit is bij een oxidatiebed \leq 100 m²/m³). Door het grote specifieke drageroppervlakte kan een dunne, actieve biolaag resulteren in een hoog gehalte aan biomassa. Een biolaag ter dikte van 50 - 100 μ m neemt een specifiek volume in van 50 - 400 l/m³. Deze biomassa komt overeen met een droogrest van 5 tot 40 kg per m³ beluchtingsruimte.

1.3 OPZET VAN HET ONDERZOEK

In figuur 1.2 is een chronologisch overzicht van het uitgevoerde onderzoek gegeven. De volgende stappen kunnen hierbij worden onderscheiden:

2 l schaal

- vooronderzoek (twee experimenten, waarbij gedurende korte tijd een 7 l reactor is gebruikt)
- selectie van dragermateriaal (series 1, 2 en 3)
- verkennend onderzoek bij langere verblijftijden.

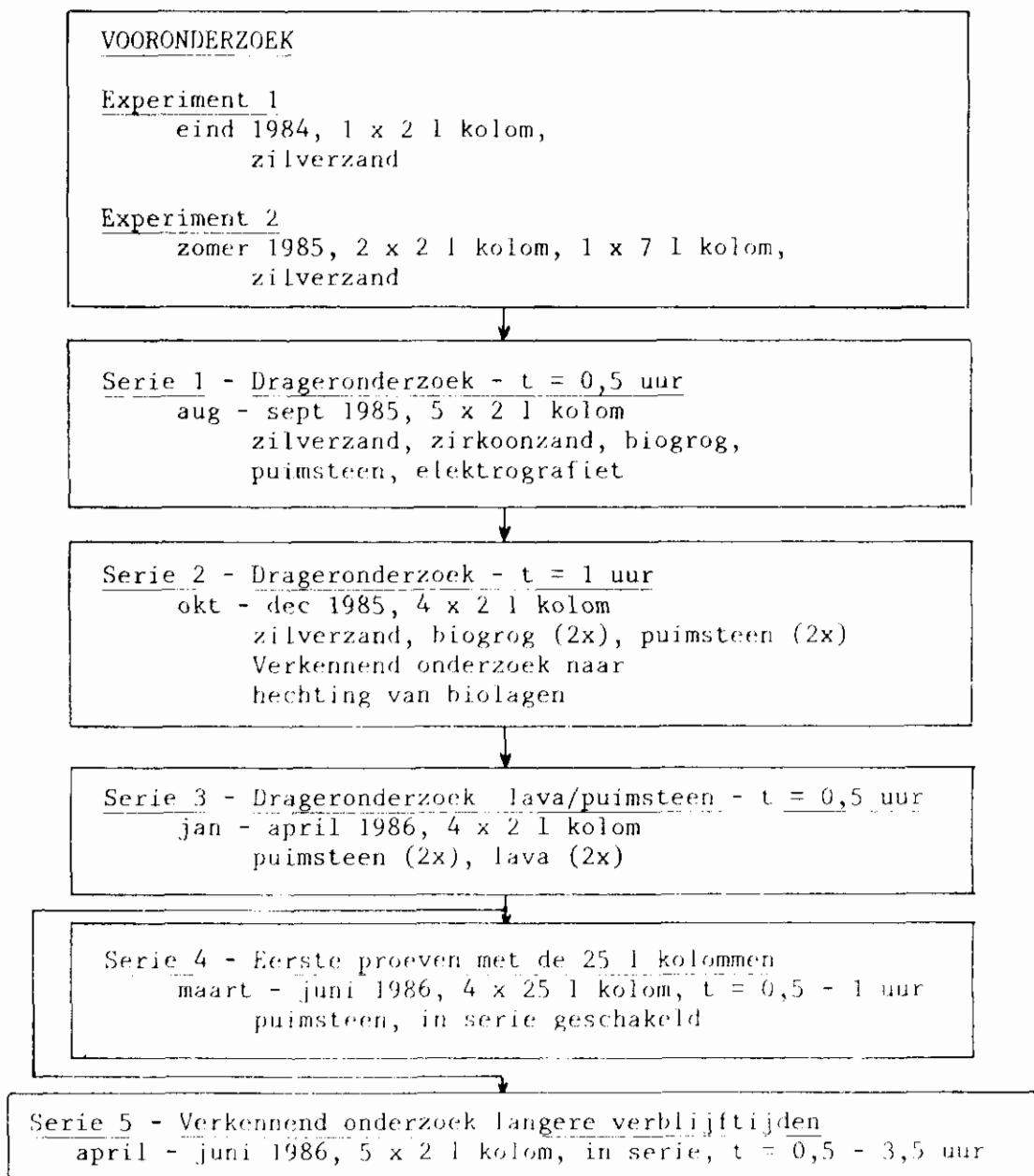


Fig. 1.2. Chronologisch overzicht.

In series 1 en 2 van het voortgezette onderzoek was de aandacht vooral gericht op de hechting van biomassa aan de drager, op de selectie van geschikte dragermaterialen en op de eisen die aan dragermateriaal zouden moeten worden gesteld.

Serie 1 (Drageronderzoek - $t = 0,5$ uur) werd uitgevoerd met zilverzand, zirkoonzand, biogrog, puimsteen en elektrografiet als dragermaterialen. Uit dit onderzoek werd geconcludeerd dat zirkoonzand (te zwaar) en elektrografiet niet geschikt waren om als dragermateriaal te fungeren. Overigens ging de combinatie van proefomstandigheden bij dit experiment gepaard met een zeer snelle ontwikkeling van de biofilm in de meeste kolommen. De systemen waren niet beheersbaar, door een massale uitspoeling van begroeide drager.

Het onderzoek met de overige dragermaterialen werd voortgezet bij een langere hydraulische verblijftijd (1 uur), een hogere dragerconcentratie (korrelvolume circa 8%) en een grotere dragerdiameter (0,2 - 0,3 mm): *Serie 2 - Drageronderzoek - $t = 1$ uur*. De proeven met biogrog en puimsteen werden in tweevoud uitgevoerd. De biofilmontwikkeling was nu beter beheersbaar. Tijdens deze proevenserie werd tevens een *verkennend onderzoek naar de stevigheid van de hechting van biolagen* uitgevoerd. Hierbij bleek dat de hechting op een ruwe drager (puimsteen en biogrog) in het turbulente milieu van de drie-fasen airliftreactor bijzonder stevig is. Puimsteen bleek een geschikte drager, met als nadelen een betrekkelijk laag soortelijk gewicht en een geringe mechanische sterkte.

In *serie 3 (Drageronderzoek lava/puimsteen - $t = 0,5$ uur)* werden lava (aanbevolen door Cist-brocades) en puimsteen als drager vergeleken, vooral ten behoeve van het voorgenomen onderzoek in de 25 l kolommen. Er werd toen de voorkeur gegeven aan puimsteen, hoewel lava ook een geschikte drager bleek te zijn.

De proefnemingen waren tot dat moment allemaal op 2 l schaal uitgevoerd. Deze kleine schaal is voor oriënterende studies geschikt (werkt het?; hoe verloopt de initiële aangroei?). Nadelen van de 2 l schaal bleken echter aangroei van biomassa aan de reactorwand (verstoppingen!) en een minder goede scheiding van dragermateriaal uit het effluent.

Serie 4 (met 25 l kolommen) is uitgevoerd bij verblijftijden van 0,5 en 1 uur, waarbij twee kolommen met een verblijftijd van 0,5 uur in serie waren

geschakeld. Deze serie was gericht op een meer gedetailleerde bestudering van de toepassingsmogelijkheden van de geselecteerde drager, de vorming van een redelijke hoeveelheid biomassa (tot 30 kg droogrest/m³), de reductie van CZV en de mogelijkheden voor nitrificatie bij korte hydraulische verblijftijden.

De kleine kolommen zijn tegelijkertijd gebruikt voor Serie 5 (*Verkennd onderzoek langere verblijftijden*). Uit de eerdere proeven was gebleken dat bij een lagere CZV-volumebelasting, of bij een langere verblijftijd of bij een geringere CZV van het afvalwater, nitrificatie mogelijk is. In serie 5 zijn verblijftijden van 0,5 - 2 uur toegepast bij twee strengen van in serie geschakelde kolommen. De totale verblijftijden waren respectievelijk 2,5 en 3,5 uur.

2. MATERIALEN EN METHODEN

2.1 STEDELIJK AFVALWATER

Het "stedelijk" afvalwater is afkomstig van een woonwijk in Delft met ongeveer 1500 inwoners. Het afvalwater, uit een gemengd rioolstelsel is voornamelijk van huishoudelijke aard. Het rioolwater wordt met een versnijdende pomp in een geroerde voorraadkelder (verblijftijd van circa 10 uur) gepompt. Afvalwater werd voorbezonden in twee in serie geschakelde tanks. Uit de tweede tank werd de voeding voor de slib-op-drager reactoren betrokken.

De gemiddelde samenstelling van het afvalwater tijdens het onderzoek is opgenomen in tabel 2.1.

Andere gegevens van het afvalwater tijdens het onderzoek zijn: pH = 7 - 8, temperatuur 5 - 20°C. Het gehalte aan P-totaal bedraagt 15 - 20 mg/l.

Het gebruikte afvalwater is representatief voor stedelijk afvalwater in Nederland.

Tabel 2.1 Samenstelling voorbezonden afvalwater

	CZV (mg/l)		N-Kj (mg/l)	
	Niet gefiltreerd	Gefiltreerd	Niet gefiltreerd	Gefiltreerd
Vooronderzoek				
- experiment 1 ¹⁾	595	-	-	-
- experiment 2	455	-	76	-
Serie 1	590	-	-	-
Serie 2	505/315 ²⁾	-	-	-
Serie 3	685	540	-	-
Serie 4	640	415	77	70
Serie 5	590	420	79	72

1) Vanaf dag 109 (zie figuur 3.6).

2) Voor/na dag 31 (zie figuur 3.29).

2.2 PROEFINSTALLATIES

Het onderzoek is op 2 l schaal en op 25 l schaal uitgevoerd (zie voor gegevens van de gebruikte reactoren, tabel 2.2). De vijf 2 l reactoren (zie fig. 2.1) zijn door Gist-brocades ter beschikking gesteld, vier 25 l reactoren (zie fig. 2.2) werden op aanwijzingen van Gist-brocades door TNO gebouwd. De constructie van de overloop van de nabezinkers werd aangepast aan de aard van het stedelijk afvalwater.

Voor dosering van een anti-schuimmiddel tijdens de opstart waren bovenin de 2 l kolommen vaatjes met anti-schuimmiddel gehangen. Eventueel gevormd schuim kwam met het middel in contact en werd aldus neergeslagen. Op 25 l schaal werd anti-schuimmiddel met een meer-kanaals slangenpomp gedoseerd.

Tabel 2.2 Gegevens van de drie-fasen (airlift) reactoren

Schaal (l)	2	25
Constructiemateriaal	Glas	Glas en perspex
Volume - totaal (l)	2	26,3
- beluchtingsruimte (l)	1,6	17
- bovenste deel, incl. bezinkruimte (l)	0,4	9,3
Onderste deel (beluchtingsruimte)		
- hoogte (m)	0,94	2,15
- diameter binnenbuis (m)	0,034	0,07
- diameter buitenbuis (m)	0,054	0,10

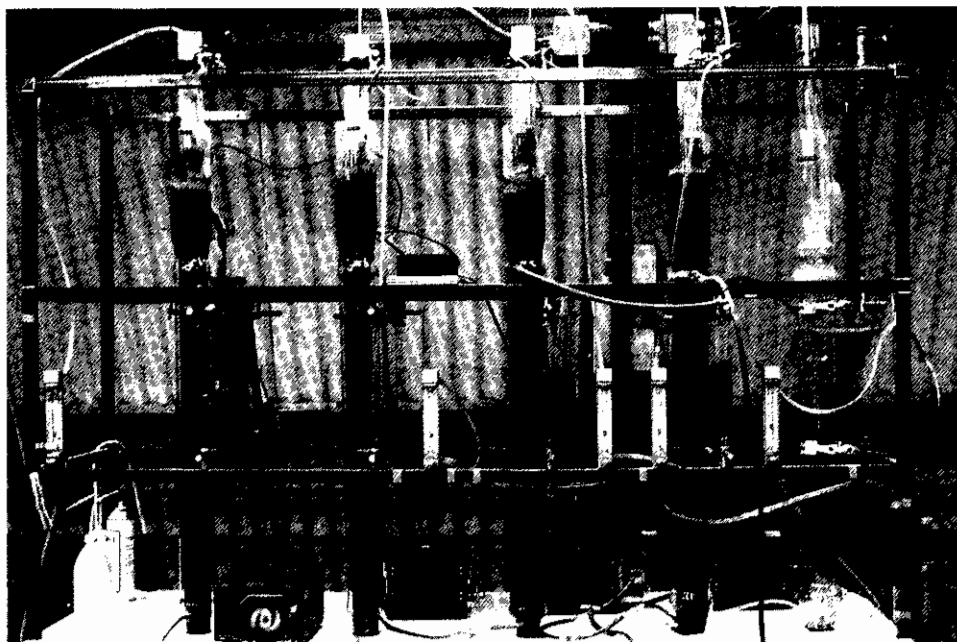


Fig. 2.1 Opstelling op 2 l schaal, kolommen 1 t/m 5

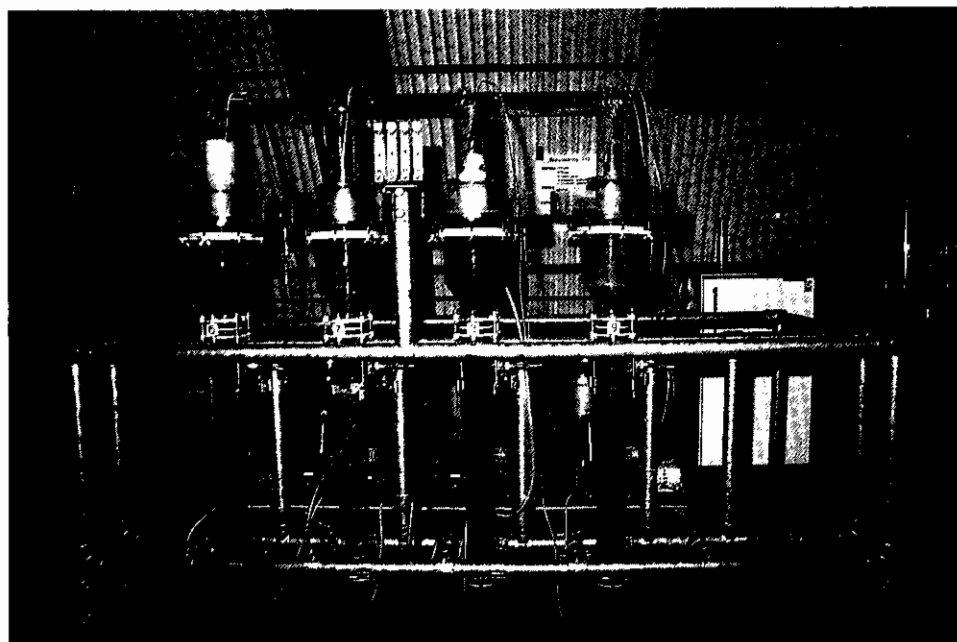


Fig. 2.2 Opstelling op 25 l schaal, kolommen 6 t/m 9

2.3 DRAGERMATERIALEN

Er is met zes dragermaterialen gewerkt. Enkele eigenschappen hiervan zijn in tabel 2.3 vermeld. De figuren 2.3 t/m 2.8 zijn rasterelektronenmicroscopische opnamen van de dragers (zie ook § 2.5).

Tabel 2.3 Enkele eigenschappen van de toegepaste dragermaterialen

Drager	Globale samenstelling	Gloeirest (%)	Dichtheid (kg/m ³)	Vorm	Ruwheid oppervlak 1)	Poriën
Zilverzand	silicaat	100	2600	rond/hoekig	± ²⁾	weinig
Zirkoonzand	Zr-silicaat	100	4400	rond	-	incidenteel
Biogrog	Al-silicaat	96	2200	hoekig	+	weinig ³⁾
Puimsteen	K-Al-silicaat	96	1600	rond/staven ⁴⁾	++++	zeer veel ⁴⁾
Lava	silicaat	96	2400	rond/hoekig	++	weinig
Elektrografiet	koolstof	86	2000	rond/plaatvormig	+++	veel

1) - = glad oppervlak; ++++ = zeer ruw oppervlak.

2) Lokaal.

3) Circa 20% van de korrels bevat wel veel, ondiepe poriën.

4) Circa 20% van de korrels bestaat uit langwerpige deeltjes. De zijvlakken hiervan zijn gladder en veel minder poreus dan de kopse uiteinden.

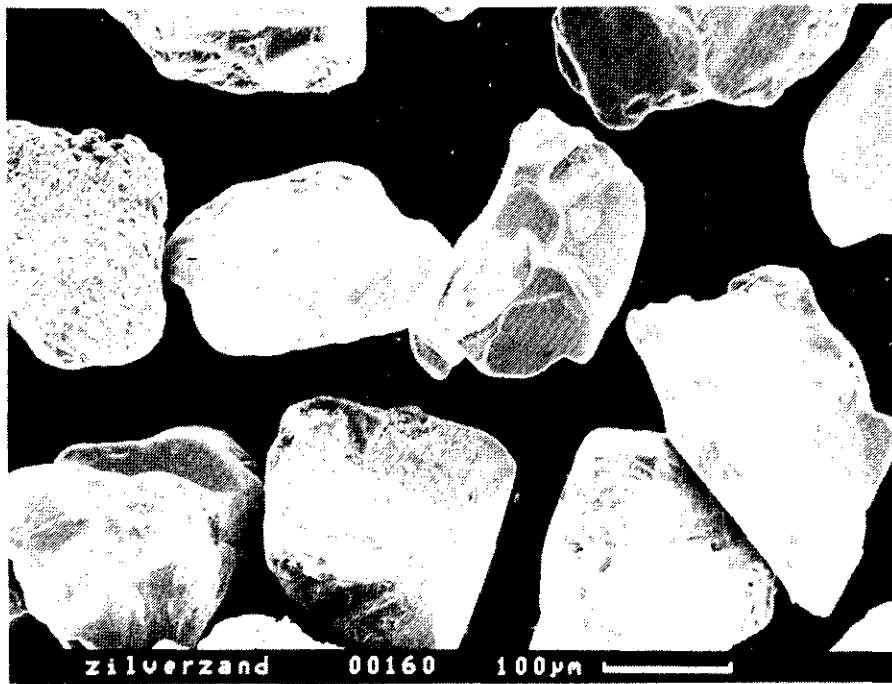


Fig. 2.3 Zilverzand (160x)

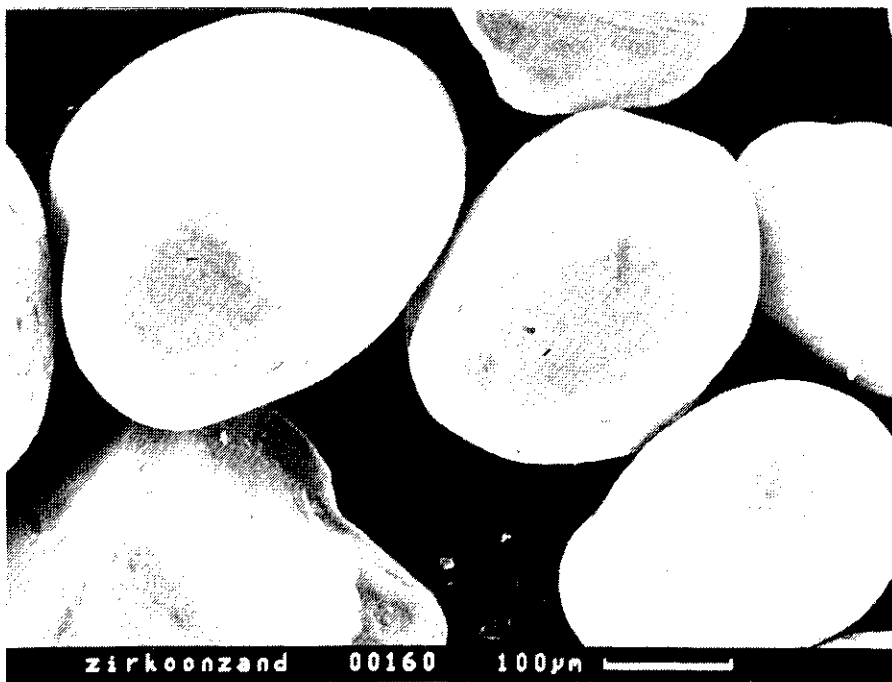


Fig. 2.4 Zirkoonzand (160x)

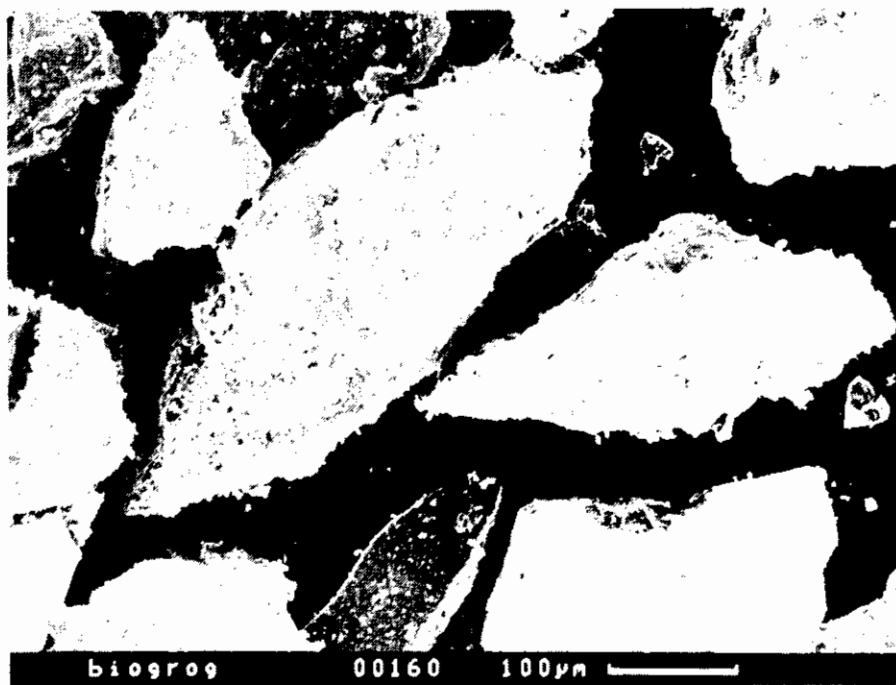


Fig. 2.5 Biogrog (160x)

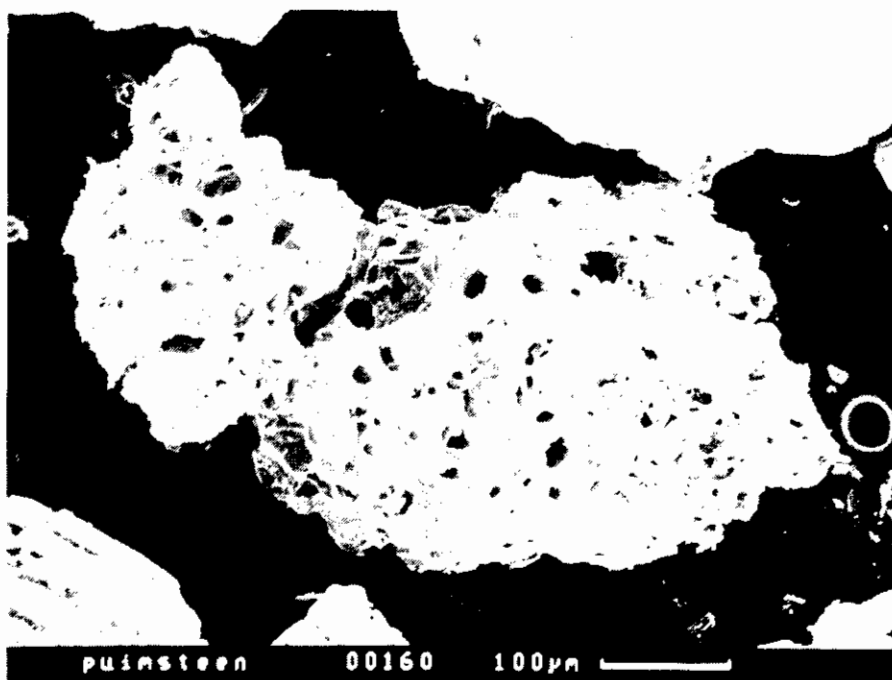


Fig. 2.6 Puimsteen (160x)

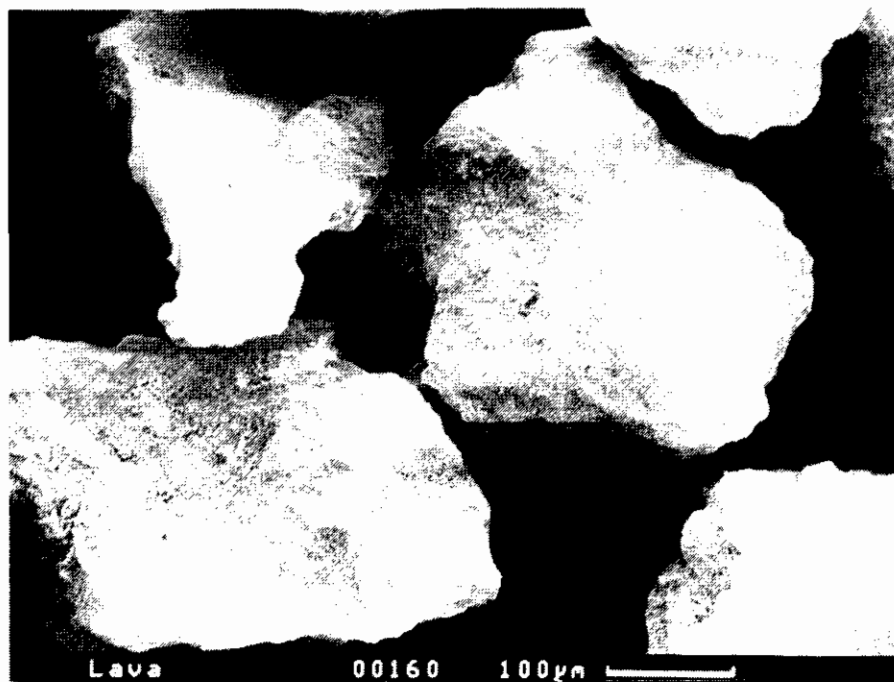


Fig. 2.7 Lava (160x)

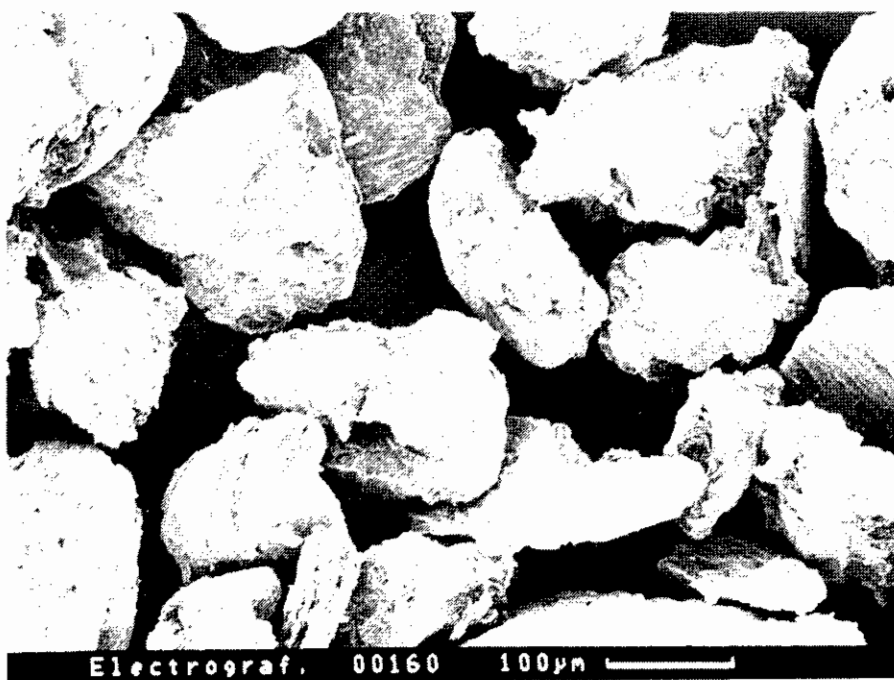


Fig. 2.8 Elektrografiet (160x)

2.4 EXPERIMENTEEL

Monsterneming

De waterstromen werden met een frequentie van 1 - 3 maal per week bemonsterd. Gefiltreerde monsters werden verkregen door direct na monsterneming te filtreren over een vouwfilter (Schleicher en Schüll 585, diameter 240 en 385 mm). In de regel werd direct geanalyseerd, zo niet dan werden de monsters direct geconserveerd volgens NEN 6600.

Het nemen van een representatief monster van begroeide drager uit een drie-fasen airliftreactor bleek, vooral op 2 l schaal, niet eenvoudig. Hiervoor werd een monsternemingsapparaat ontwikkeld, dat van boven af in de binnenbuis van de kolom werd gestoken. Aldus kon een monster uit de beluchtingsruimte worden genomen. Het volume hiervan was met circa 5 ml zo gering dat de hoeveelheid dragermateriaal in de kolom niet te sterk werd beïnvloed. Op 25 l schaal werd het dragermateriaal bemonsterd door uit een kraan aan de neergaande buis circa 250 ml vloeistof te laten lopen. Uit de "vallende" stroom werd een monster van circa 10 ml genomen. De overblijvende drager werd opgevangen en weer in de kolom gebracht.

(Chemische) analyses

De chemische analyses van de parameters CZV, N-NH₄, N-NO₂, N-NO₃, alsmede droogrest, gloeirest, zijn op basis van NEN-voorschriften uitgevoerd. Meestal werden nitriet en nitraat als somparameter (N-NO_x) bepaald. Incidenteel werd ter controle het gehalte aan nitriet bepaald.

In de tabellen 2.4 en 2.5 worden de gebruikte afkortingen en bepalingswijzen nader verklaard en verantwoord. Er wordt nog verwezen naar de voetnoot onder tabel 2.4 voor de berekening van reducties van CZV en N-Kjeldahl.

Bij slib-op-dragersystemen vindt groei van biomassa voornamelijk plaats op de drager, maar ook vrij in suspensie. Bij de eerste experimenten werd de aangroei van biomassa gekwantificeerd op basis van het gloeiverlies van drager + biofilm. Deze methode voldoet uitstekend indien het gloeiverlies van het dragermateriaal zelf vrijwel nihil is (bij zilverzand). Door introductie van dragers met een gloeirest van 96% (puimsteen, lava) is deze eenvoudige bepalingswijze minder geschikt.

Tabel 2.4 Gebruikte afkortingen en eenheden

Grootheid	Eenheid	Omschrijving
CZV-inf	(mg/l)	CZV van influent
CZV-inf-F	(mg/l)	CZV van gefiltreerd influent
CZV-inf-S	(mg/l)	gesuspendeerd CZV in influent = CZV-inf - CZV-inf-F
CZV-eff	(mg/l)	CZV van effluent
CZV-eff-F	(mg/l)	CZV van gefiltreerd effluent
CZV-eff-S	(mg/l)	gesuspendeerd CZV in effluent
CZV-%	(%)	CZV-reductie ¹⁾ = $\frac{\text{CZV-inf} - \text{CZV-eff-F}}{\text{CZV-inf}} \times 100$
CZV-F-%	(%)	CZV-reductie ¹⁾ = $\frac{\text{CZV-inf-F} - \text{CZV-eff-F}}{\text{CZV-inf-F}} \times 100$
N-Kj-inf	(mg/l)	Kjeldahlstikstofgehalte influent
N-Kj-inf-F	(mg/l)	idem in gefiltreerd influent
N-Kj-eff	(mg/l)	idem in effluent
N-Kj-eff-F	(mg/l)	idem in gefiltreerd effluent
N-NH ₄ -eff-F	(mg/l)	ammoniumstikstofgehalte in gefiltreerd effluent
N-NO ₂ -eff-F	(mg/l)	nitrietstikstofgehalte in gefiltreerd effluent
N-NO ₃ -eff-F	(mg/l)	idem nitraat
N-NO _x -eff-F	(mg/l)	idem som van nitriet en nitraat
N-Kj-%	(%)	N-Kj-reductie ¹⁾ = $\frac{\text{N-Kj-inf} - \text{N-Kj-eff-F}}{\text{N-Kj-inf}} \times 100$
N-Kj-F-%	(%)	N-Kj-reductie ¹⁾ = $\frac{\text{N-Kj-inf-F} - \text{N-Kj-eff-F}}{\text{N-Kj-inf-F}} \times 100$
CZV-volumebelasting (kg CZV/m ³ ·d)		kg CZV van niet gefiltreerd influent per m ³ beluchtingsruimte per dag

1) CZV-% is de reductie van gefiltreerd effluent t.o.v. niet gefiltreerd influent, CZV-F-% heeft betrekking op gefiltreerde influenten en effluenten. Bij in serie geschakelde kolommen zijn CZV-% en CZV-F-% berekend t.o.v. het influent van de eerste kolom, tenzij expliciet vermeld staat dat de reductie per kolom is berekend. De reductie van de gehalten aan Kjeldahlstikstof zijn analoog berekend. Voor een nadere motivatie van wat in feite een "verwaarlozing" van het gesuspendeerde materiaal is, wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Tabel 2.5 Toelichting bij de karakterisering van drager en biomassa

Term	Eenheid	Omschrijving
Droogrest	(g/l)	droogrest van de onopgeloste bestanddelen van drager + biomassa + gesuspendeerd materiaal per l beluchtingsruimte
Gloeirest	(%)	gloeirest van de droogrest
Gloeiverlies	(g/l)	het gloeiverlies van de onopgeloste bestanddelen per l beluchtingsruimte ¹⁾
Organische stof	(g/l)	het gehalte aan organische stof van de onopgeloste bestanddelen per l beluchtingsruimte; de bijdrage aan het gloeiverlies van de drager is verrekend ¹⁾
Korrelvolume	(%)	het korrelvolume is dat deel van de beluchtingsruimte, dat wordt ingenomen door dragermateriaal. Bij begroeide puim steen en lava is het korrelvolume als volgt berekend: berekend korrelvolume = $(\text{droogrest} - \text{gloeiverlies}) \times \frac{100}{96} \cdot \frac{100}{\text{dichtheid drager}}$ De gloeirest van de biomassa (10 - 20%) is hierbij verwaarloosd.
Korreloppervlakte (m ² /m ³)		De oppervlakte in m ² aan dragermateriaal per m ³ beluchtingsruimte. Bij de berekening werd uitgegaan van gladde, ronde en niet poreuze dragerkorrels
CZV-biomassa	(g/l)	het CZV van biomassa aan de drager bepaald na 3x achtereenvolgens uitspoelen van gesuspendeerd materiaal. Uitgedrukt in g CZV per l beluchtingsruimte
CZV-biomassa	(mg/g)	idem, uitgedrukt in mg CZV per g droogrest

1) Als de gloeirest van de drager 100% zou zijn, komt het gloeiverlies overeen met het gehalte aan organische stof. Puimsteen en lava hebben echter een gloeirest van 96%. Het totale gloeiverlies bevat dan tevens een bijdrage van het gloeiverlies van de drager.

Vanaf serie 3 werd het CZV van gewassen dragermateriaal (CZV-biomassa) en het CZV van niet-gewassen dragermateriaal bepaald*. Uit het verschil kon het CZV van biomassa in suspensie - niet gebonden aan dragermateriaal - worden berekend. Deze laatste methode geeft een veel beter kwantitatief inzicht in de biomassa aan de drager (zie tabel 2.6).

Tabel 2.6 Aangroei van biomassa

Aangroeisnelheid	Eenheid
Berekend uit het gloeiverlies van niet gewassen drager per l beluchttingsruimte	mg gloeiverlies/l·dag
Berekend uit CZV-biomassa van gewassen drager per g droogrest van drager + biomassa	mg CZV-biomassa/g·dag
Idem, per l beluchttingsruimte	g CZV-biomassa/l·dag

Bij de berekening van de aangroeisnelheid is niet gecorrigeerd voor verliezen aan begroeide drager uit de reactor. De werkelijke aangroeisnelheid is altijd hoger geweest dan de waarden die in dit rapport worden genoemd. Overigens zal het verschil tussen de gemeten en de werkelijke waarde klein zijn in de perioden met een stabiele bedrijfsvoering, in de regel spoelde er dan minder dragermateriaal uit.

Behalve in de weekenden werden in de kolommen de temperatuur, de pH en het zuurstofgehalte gemeten. Met uitzondering van serie 2, werd de temperatuur niet geregeld. Het luchtdebiet werd in het begin van elk experiment zo ingesteld, dat de airlift goed functioneerde. Bij een grotere zuurstofbehoefte door aangroei van biomassa werd een zuurstofgehalte van minimaal 3 mg/l aangehouden.

* Door driemaal achtereenvolgens schudden met demi-water. Het bovenstaande water werd, na bezinking van de drager, afgezogen.

2.5 MICROSCOPISCH ONDERZOEK

De microscopische waarnemingen aan de biofilm op de slib-op-dragerkorrel werden uitgevoerd om na te gaan of:

- een biofilm met behulp van microscopische technieken kan worden gekarakteriseerd en de aldus verzamelde informatie kan worden gerelateerd aan het functioneren van een slib-op-dragersysteem;
- het type drager invloed heeft op het soort biofilm dat hierop ontstaat.

De volgende microscopische methoden werden toegepast:

a. Stereomicroscopie

Maximale vergroting: 200 x.

Door gebruik te maken van een microscoop met een donkerveldinstelling kon de vorming van een biofilm reeds in een vroeg stadium worden waargenomen. Het onderscheid tussen drager en film bleef ook bij toeneming van de filmdikte redelijk goed zichtbaar.

De volgende parameters werden beoordeeld:

- kolonisering van het oppervlak van de drager;
- dikte van de biofilm;
- rand van de biofilm (glad, onregelmatig, uitgesproken rafelig);
- groei van draadvormige bacteriën;
- kolonisering van het oppervlak door sessiele *Ciliaten*;
- de aanwezigheid van "vrije" slibvlokjes tussen de korrels.

b. Fase-contrastmicroscopie

Vergroting: 500 - 1000 x.

Deze techniek leverde informatie over:

- draadvormige bacteriën;
- protozoën;
- aard van de uitlopers bij rafelige randen om de korrels;
- mate waarin vrije cellen tussen de korrels aanwezig zijn.

c. Rasterelektronenmicroscopie (REM)

Rasterelektronenmicroscopie (REM) biedt de mogelijkheid van micro-morfologisch onderzoek van het oppervlak van een dragerkorrel of een biolaag bij vergrotingen van 10 tot 100.000 x.

De (begroeide) dragerkorrels werden voorbehandeld door:

- Kleuring met kristalviolet ten behoeve van lichtmicroscopie
Door het aanbrengen van een contrastkleur kan de hechting van micro-organismen in een vroeg stadium worden gesignaleerd. Het kristalviolet adsorbeert nauwelijks aan het oppervlak van de tot nu toe geteste dragers.
- Kritisch-punt-drogen ten behoeve van Rasterelectronenmicroscopie
Bij REM wordt om de structuur van biomassa te behouden het monster eerst kritisch-punt-gedroogd. Eerst wordt hierbij het water in de biomassa geleidelijk vervangen door aceton en vervolgens door vloeibaar CO₂, dat bij zijn kritisch-punt zonder fase-overgang wordt verwijderd. Vervolgens wordt ter verkrijging van een elektrisch geleidbaar preparaat het monster in vacuüm overdekt met een laagje Au/Pd van circa 0,05 µm.

3. RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek op 2 l schaal (3.1, 3.2 en 3.3) en op 25 l schaal (3.4) gepresenteerd en besproken.

In dit hoofdstuk zijn die gegevens opgenomen, die nodig zijn voor een volledig beeld van de resultaten.

Voor de gebruikte afkortingen en definities wordt verwezen naar hoofdstuk 2 (tabellen 2,4, 2.5 en 2.6). Expliciet wordt hier nog vermeld:

- dat de CZV-volumebelastingen, tenzij anders vermeld, berekend zijn uit CZV-waarden van niet gefiltreerde monsters;
- dat bij de berekening van de CZV- en de N-Kj-reductie, vanwege de hoge gehalten aan gesuspendeerd materiaal in het effluent, wordt uitgegaan van waarden in gefiltreerd effluent. De CZV-reductie, CZV-%, heeft dan ook betrekking op gefiltreerd effluent ten opzichte van niet gefiltreerd influent. Het rendement CZV-F-% is gebaseerd op het CZV van de opgeloste stof (gefiltreerd) influent en effluent.

Gegevens over de biofilmvorming (microscopisch onderzoek, kwantitatieve aspecten) zijn in hoofdstuk 4 opgenomen. De resultaten die betrekking hebben op het zuiveringstechnische deel van het onderzoek worden nader toegelicht in hoofdstuk 5.

3.1 VOORONDERZOEK

Experiment 1 van het vooronderzoek is uitgevoerd met één 2 l kolom. Experiment 2 van het vooronderzoek met twee 2 l kolommen en één 7 l kolom. Daar de 7 l kolom alleen in experiment 1 is gebruikt, wordt volstaan met de volgende beschrijving: totaal volume = 7 l, volume reactor = 3,5 l, diameter = 7 cm.

3.1.1 Vooronderzoek - experiment 1

Tijdens experiment 1 zijn de proefomstandigheden vrij veel veranderd. De CZV-volumebelasting was in dit vooronderzoek de belangrijkste variabele. Zie tabel 3.1, figuren 3.1 en 3.2.

Tabel 3.1 Proefomstandigheden vooronderzoek (start 24 juli 1984)

	Proefperiode (dagen)	Hydraulische verblijftijd (uur)	Afvalwater- samenstel- ling	CZV-volumebelasting (kg CZV/m ³ ·dag)
A	1 - 21	1,1	normaal	ca 5
B	21 - 43	3,2	normaal	ca 5
C	43 - 77	0,4	normaal	ca 25
D	77 - 107	0,4	verdund	ca 10
E	107 - 233	0,4	normaal	30 - 60

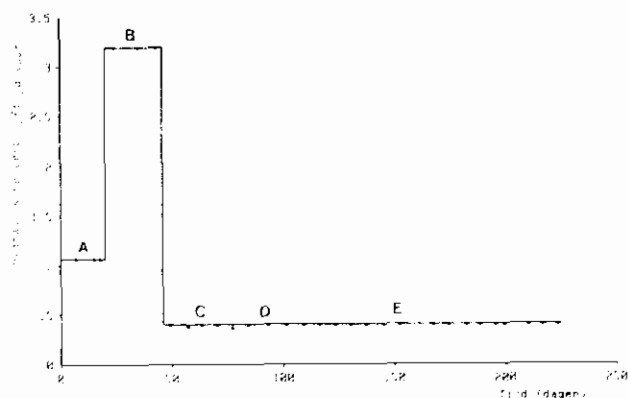


Fig. 3.1 Hydraulische verblijftijd

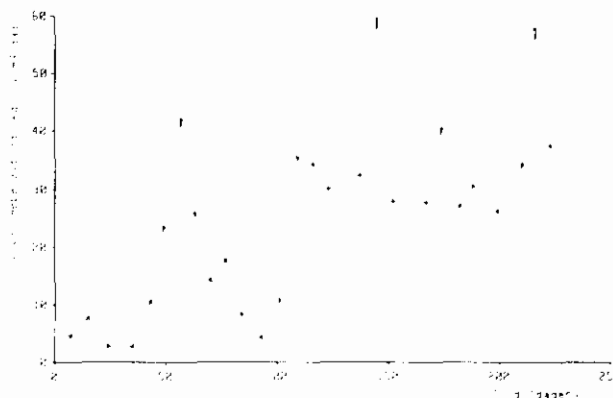


Fig. 3.2 CZV-volumebelasting

Het luchtdebiet is gevarieerd tussen ruim 50 tot bijna 400 l/uur. De temperatuur in de kolom liep terug van aanvankelijk 18°C tot minder dan 10°C.

Het dragermateriaal was zilverzand (korreldiameter 0,1-0,2 mm). Bij de start bedroeg het korrelvolume 6% van het reactorvolume. Aanvankelijk liep dit terug tot 3-4%, waarna door toevoeging van zilverzand op de dagen 123, 145, 162 en 167 het korrelvolume werd gehandhaafd op 6% (toegevoegd werd in totaal 375 g per 1 reactorvolume aan zilverzand, wat overeenkomt met 15% korrelvolume; fig. 3.3, 3.4).

De hoeveelheid organische stof (= gloeiverlies) bedroeg in de tijdvakken A-B 5 g/l. In deze perioden was de CZV-volumebelasting met circa 5 kg CZV/m³·dag laag. In periode E, bij een CZV-volumebelasting van meer dan 30 kg/m³·dag groeide de biomassa aan tot meer dan 15 g org.stof/l (gloeirest van drager + biomassa 85%; fig. 3.5). Het aandeel van de biomassa op de droogrest van drager + biomassa is ook dan nog gering (zie fig. 3.3, hierin zijn de droogrest van de drager en drager + biomassa ingetekend). De biomassa draagt, door het hoge gehalte aan drager slechts in geringe mate bij aan de droogrest.

De invloed van de CZV-volumebelasting (fig. 3.2) op de CZV-waarden van het gefiltreerde effluent was gering tijdens dit experiment: CZV-eff-F = ca 200 mg/l. De CZV-reductie bedroeg ongeveer 70% (zie fig. 3.6 en 3.7). De invloed van de CZV-volumebelasting op de N-Kj-reductie was groter (zie fig. 3.8). Bij een "lage" CZV-volumebelasting van < 10 kg CZV/m³·dag (langere verblijftijd of verdund afvalwater) trad vergaande nitrificatie op (> 70% N-Kj-verwijdering). Bij hogere CZV-volumebelasting bedroeg de N-Kj-reductie ca 20%.

In de proefperiode E waren van dag 130-199 de proefomstandigheden betrekkelijk constant. De dragerconcentratie werd hoog gehouden door bijvoegen van schone drager. Het gehalte aan organische stof in de kolommen liep op van 8 - 16 g/l (zie tabel 3.2). Het gehalte aan gesuspendeerd materiaal in het effluent, verschil tussen het CZV van ongefiltreerd en gefiltreerd effluent (350 - 170 = 180 mg CZV/l), was hoog.

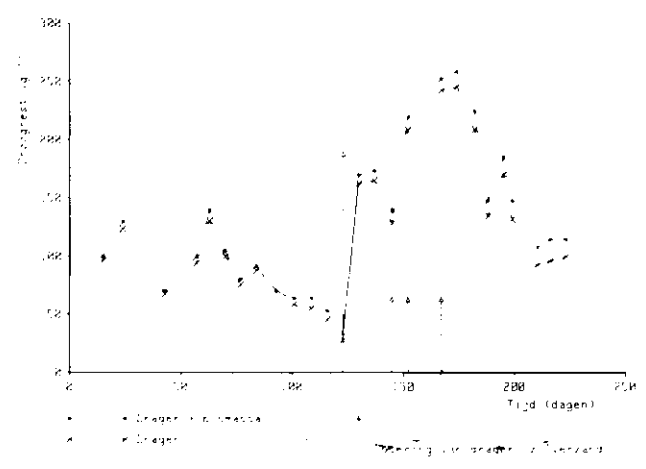


Fig. 3.3 Droogrest van drager + biomassa

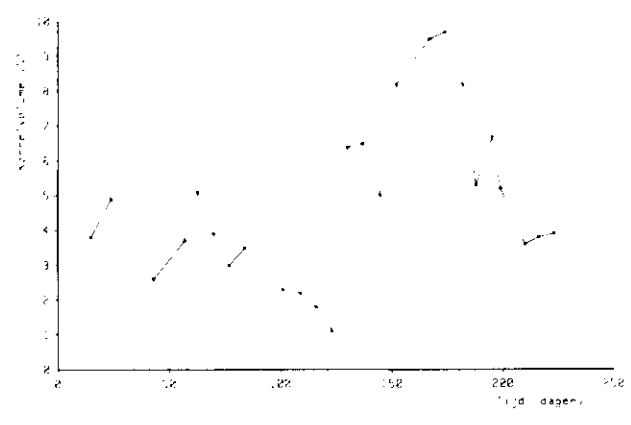


Fig. 3.4 Berekend korrelvolume

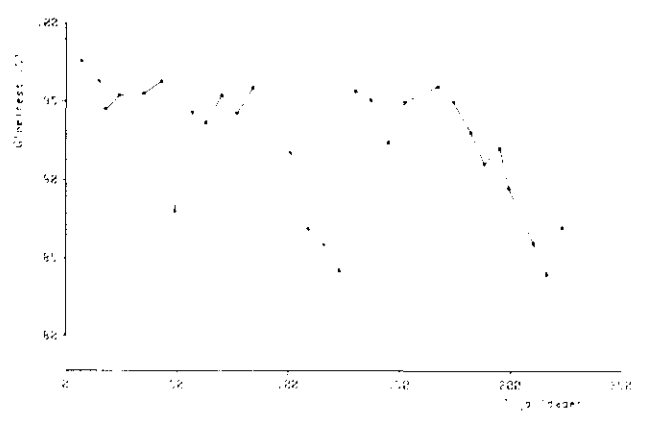


Fig. 3.5 Gloeirest van drager + biomassa

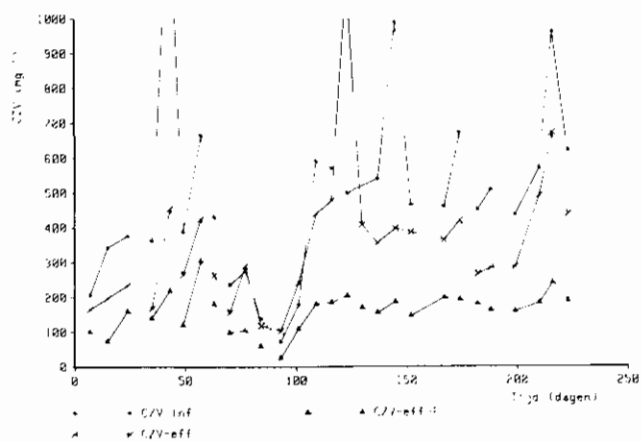


Fig. 3.6 CZV-waarden van influent en effluent

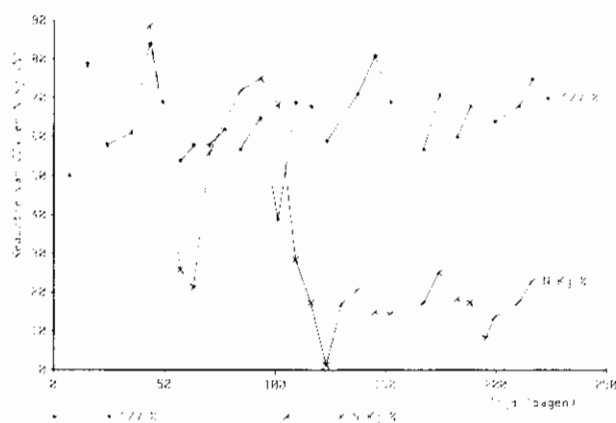


Fig. 3.7 CZV- en N-Kj-reductie

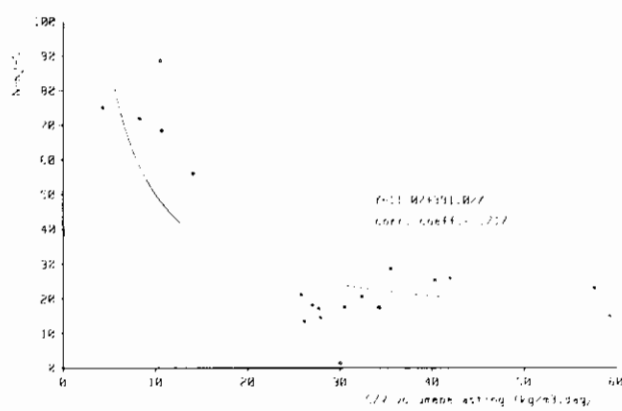


Fig. 3.8 N-Kj-reductie als functie van de CZV-volumebelasting

Tabel 3.2 Gegevens van experiment 1 over de periode E, dag 130 tot 199.
De gemiddelde waarden zijn gegeven.

Verblijftijd	0,4 uur	CZV-inf	565	mg/l
Waterdebiet	4 l/uur	CZV-eff	350	mg/l
Luchtdebiet	370 l/uur	CZV-eff-F	170	mg/l
pH-inf	7,6	CZV-%	69,7	%
pH-eff	7,6			
Zuurstofgehalte	5,2 mg/l	N-Kj-inf	76	mg/l
Temperatuur	11,8 °C	N-Kj-eff-F	63	mg/l
Korrelvolume	7,1%	N-NH ₄ -eff-F	47	mg/l
Droogrest	192 g/l	N-NO ₃ -eff-F	7,0	mg/l
Gloeirest	93,5%	N-Kj-%	17	%
Organische stof	12 g/l	CZV-volumebelasting	34	kg CZV/m ³ ·dag

3.1.2 Vooronderzoek - experiment 2

Experiment 2 van het vooronderzoek is uitgevoerd bij hydraulische verblijftijden van 0,5, 0,8 en 1,6 uur. Als drager is zilverzand met een diameter van 0,1 - 0,2 mm toegepast. Kolom 1, verblijftijd 0,5 uur, is gestart met begroeide drager uit experiment 1. Voor de overige twee kolommen is schoon zand gebruikt. Gegevens over de (begroeide) drager zijn weergegeven in de figuren 3.9 t/m 3.12. De temperatuur liep op van 12 °C naar 20 °C in de loop van experiment 2.

Gedurende de eerste 50 dagen bedroeg het korrelvolume 6%. Daarna spoelde de begroeide drager snel uit. Door toevoeging van schone drager rond dag 70 werd het korrelvolume (fig. 3.10) op > 10% gebracht. De proef is stopgezet toen na meer dan 100 dagen door de vorming van "golfballen" (zie hoofdstuk 4) de bezinkruimten van de reactoren verstopten.

Uit figuur 3.14 blijken de schommelingen in de hoeveelheid organische stof in de kolommen. De beïnvloeding door verlies aan dragermateriaal was groot.

De CZV-waarde van het influent bedroeg gemiddeld 450 mg/l. De CZV-volume-belastingen bij verblijftijden van 0,5, 0,8 en 1,6 uur waren respectievelijk 22, 14 en 7 kg CZV/m³·dag (fig. 3.13).

In het begin van de proef was het zuiveringsrendement bij 0,5 uur verblijftijd beter dan bij 0,8 en 1,6 uur. Dit wordt veroorzaakt doordat de kolom met een verblijftijd van 0,5 uur was opgestart met begroeide drager. In de overige kolommen nam het zuiveringsrendement in de loop van de tijd toe (fig. 3.14). De invloed van de hoeveelheid en ook van de aard van de biomassa aan de drager op het zuiveringsrendement komt in hoofdstuk 5 ter sprake.

Het verloop van de stikstofreductie (N-Kj-%) in de tijd is opgetekend in figuur 3.15, de gehalten aan nitraat in figuur 3.16. De nitrificatie vertoonde een sterke stijging aan het eind van de onderzoeksperiode bij verblijftijden van 0,8 en 1,6 uur. De stikstofverwijdering bij 0,5 uur tussen dag 30 en 60 verliep beter dan bij langere verblijftijden. Mogelijk werd dit veroorzaakt door een hogere slibleeftijd van de biomassa aan de drager bij het hogere gehalte aan organische stof.

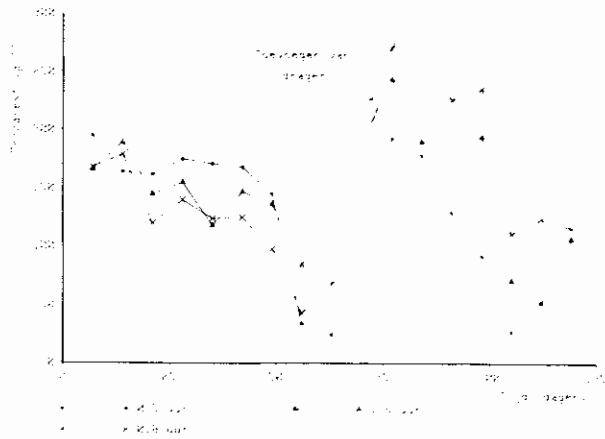


Fig. 3.9
Droogrest van drager + biomassa

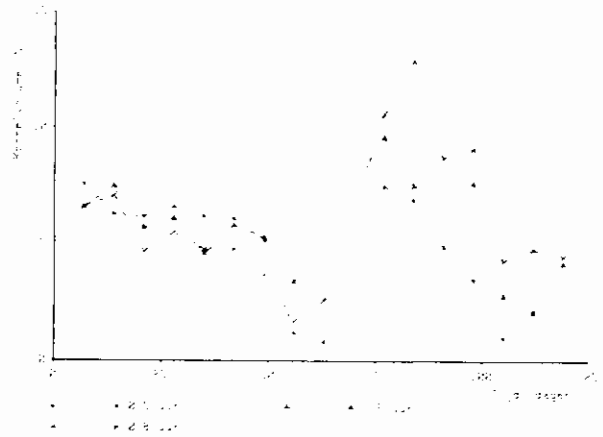


Fig. 3.10
Berekend korrelvolume

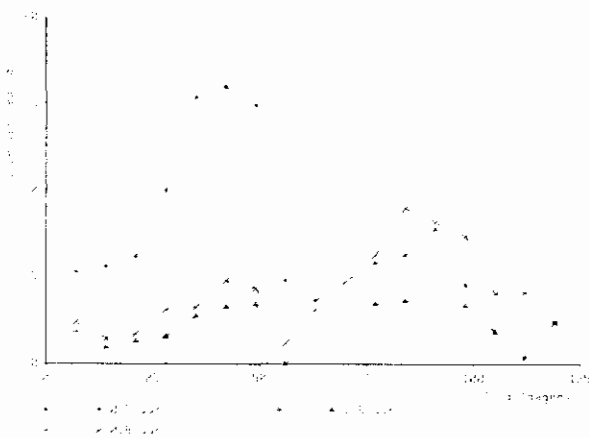


Fig. 3.11
Berekend gloeiverlies
(= "organische" stof)

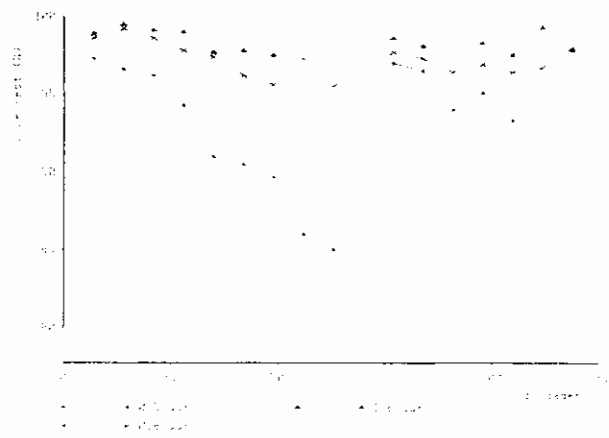


Fig. 3.12
Gloeirest van drager + biomassa

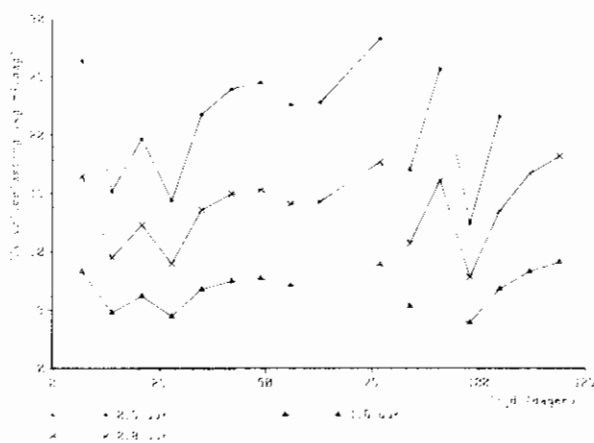


Fig. 3.13
CZV-volumebelasting

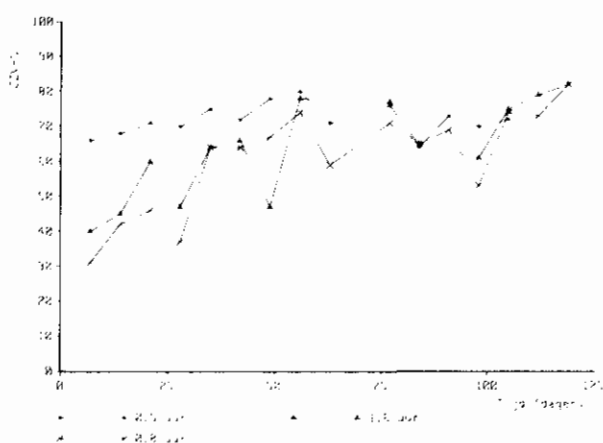


Fig. 3.14
CZV-reductie

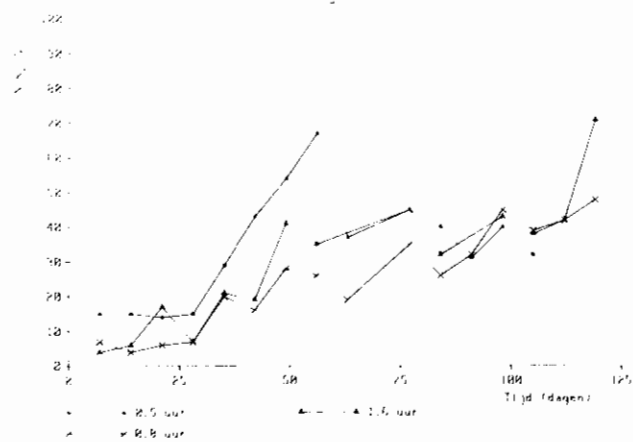


Fig. 3.15
Stikstofreductie

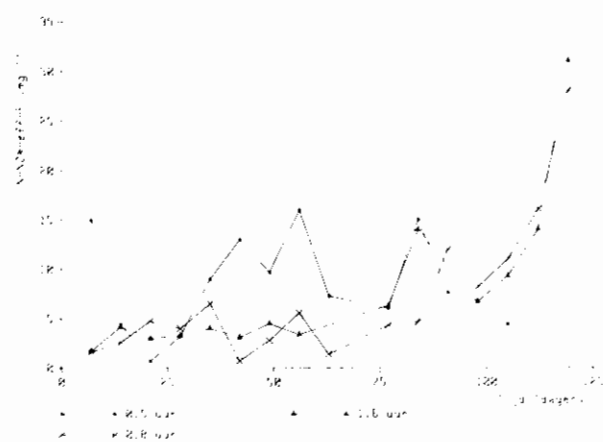


Fig. 3.16
Nitraatgehaltes in gefiltreerd effluent

3.1.3 Conclusies uit het vooronderzoek

De belangrijkste bevindingen waren:

- Biomassa groeide op zilverzand. De aangroei duurde enkele weken. Bij een verblijftijd van 0,5 uur werden hoge gehalten aan biomassa bereikt (> 15 g/l). Bij langere verblijftijden blijft de aangroei op zilverzand beperkt.
- Er was weinig verschil in aangroeisnelheid op schone korrels bij het begin van de proef en op schoon zilverzand dat aan een werkende reactor werd toegevoegd.
- Bij het begin van de proeven trad schuimvorming op. Tot de eerste aangroei van biomassa was gebruik van een antischuimmiddel noodzakelijk.
- Het effluent bevatte veel nauwelijks bezinkend zwevend materiaal. Bij 0,4 - 0,5 uur hydraulische verblijftijd was het CZV-eff = 300 - 400 mg/l en na filtreren was het CZV-eff-F = 150 - 200 mg/l.
- Bij lagere CZV-volumebelastingen (langere verblijftijd of verdund afvalwater) treedt nitrificatie op. Het kan lang duren (> 100 dagen) eer het systeem gaat nitrificeren. De hoeveelheid biomassa, en daarmee de slibleeftijd, heeft hierop invloed.
- Onderzoek op 2 l schaal is geschikt om de groei van slib op drager na te gaan en de invloed van een groot aantal parameters af te tasten, zoals de hydraulische verblijftijd en de temperatuur. Het systeem blijkt op deze schaal gevoelig te zijn voor storingen. Er treedt aangroei op aan de wand van de bezinkruimte. Bij hoge gehalten aan biomassa (> 30 kg/m³) wordt de recirculatie in de airlift-reactor verstoord en zelfs uiteindelijk verhinderd door verstoppingen en slijmvormige aangroei. Voor langeduuronderzoek is een grotere reactor vereist.
- Het blijkt moeilijk om de drager bij de kleine korreldiameter van 0,1 - 0,2 mm in de 2 l kolom te houden. Drager met biomassa wordt uitgespoeld doordat de bezinker minder goed functioneert (o.a. door ontsnappen van luchtbellen), doordat de biolaag te dik wordt en/of begroeid raakt met draadvormende organismen.

3.2 SELECTIE VAN DRAGERMATERIAAL

De aard van het dragermateriaal is van wezenlijke invloed op het functioneren van een drie-fasen airliftreactor. Op basis van de ervaring van Gist-brocades werd besloten onderzoek hiernaar uit te voeren op 2 l schaal.

Bij de keuze van de verschillende dragers is gestreefd naar verschillen in soortelijk gewicht, gladheid en porositeit. Op basis hiervan is een aantal dragers geselecteerd. Zie voor nadere gegevens § 2.3.

Belangrijke gegevens van dragermaterialen zijn:

- diameter (0,1 - 0,3 mm)
- dichtheid (1,6 - 4,4 kg/l)
- vorm (rond - onregelmatig)
- ruwheid oppervlak (glad - ruw)
- poriën (geen tot poreus)
- mechanische sterkte (slijtage)
- kostprijs (ca. f 200,-/ton).

De concentratie (50 - 300 g/l), de diameter en de dichtheid van de drager bepalen het totale oppervlak van de drager dat theoretisch beschikbaar is voor aangroei van biomassa en voor het gedrag van de drager in de reactor en in de bezinker. Dit is nader weergegeven in tabel 3.3.

Tabel 3.3 Schema van beïnvloeding van enkele parameters door de diameter en dichtheid van de drager (++ positieve, -- negatieve beïnvloeding van het functioneren van de airliftreactor)

	Klein	Groot	Klein	Groot
Diameter drager	Klein	Groot	Klein	Groot
Dichtheid drager	Laag	Laag	Hoog	Hoog
Totaal oppervlakte	++	-	++	-
Werking airlift	+	+	-	-
Uitspoeling uit reactor	-	--	++	+

Een ruwe, poreuze dragerkorrel met een onregelmatige vorm heeft vanzelfsprekend een groter oppervlakte dan een ronde gladde dragerkorrel. Een hoge concentratie aan drager vergroot het totale oppervlakte, maar bemoeilijkt de werking van de airlift en de afscheiding van de drager in de bezinker. Om dragers onderling te kunnen vergelijken, is bij de selectie van dragermaterialen het korreloppervlakte op ca 2000 m²/m³ gesteld. Het korrelvolume bedroeg hierbij 5 - 8% (zie tabel 3.4).

In drie series experimenten werd onderzoek uitgevoerd speciaal gericht op de selectie van geschikt dragermateriaal:

- serie 1 - Onderzoek met zilverzand, zirkoonzand, biogrog, puimsteen, lava en elektrografiet
(hydraulische verblijftijd = 0,5 uur).
- serie 2 - Onderzoek met zilverzand, biogrog en puimsteen
(hydraulische verblijftijd = 1 uur).
- serie 3 - Onderzoek met lava en puimsteen
(hydraulische verblijftijd = 0,5 uur).

De invloeden van de in deze paragraaf genoemde parameters op de aangroei-snelheid en de microbiologische aspecten worden besproken in hoofdstuk 4 en op het zuiveringsrendement in hoofdstuk 5.

3.2.1 Procesgegevens drageronderzoek

In tabel 3.4 zijn de voornaamste procesgegevens vermeld. Het korreloppervlakte was in deze experimenten aanvankelijk in alle kolommen gelijk. In serie 1 was de korreldiameter 0,1 - 0,2 mm. Doordat in de series 2 en 3 was gekozen voor eenzelfde korreloppervlakte bij een korreldiameter van 0,2 - 0,3 mm, was hier een groter korrelvolume noodzakelijk. Bij de berekening van het korreloppervlakte is uitgegaan van ronde, gladde dragerkorrels.

Tabel 3.4 Dragermateriaal en voornaamste procesgegevens

Serie		Serie 1	Serie 2	Serie 3
Dragermateriaal		zilverzand zirkoonzand biogrog puimsteen elektrografiet	zilverzand (1x) puimsteen (2x) biogrog (2x)	puimsteen (2x) lava (2x)
<u>Gegevens bij start</u>				
Korrelgrootte	(mm)	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3
Korrelvolume	(%)	ca 5	8	8
Korreloppervlakte	(m ² /m ³)	ca 2000	2000	2000
Aantal korrels per m ³ (berekend)		ca 30·10 ⁹	10·10 ⁹	10·10 ⁹
<u>Gegevens tijdens experiment</u>				
Tijdsduur proef	(dag)	14 - 38	70	70
Korrelvolume	(%)	4	8 → 4	4 - 5
Korreloppervlakte	(m ² /m ³)	1600	2000 → 1000	1000 - 1250
Luchtdebiet	(l/uur)	240 ¹⁾	240	180 - 240
Hydr.verblijftijd	(uur)	0,5	1	0,5
Temperatuur	(°C)	20	18 → 13	11 ²⁾
CZV-influent	(mg/l)	590	500/300 ³⁾	330/680 ⁴⁾
CZV-volumebelasting	(kg/m ³ ·dag)	28	12/7	16/33

1) bij zirkoonzand 1400 l/uur

2) temperatuur 10 - 12 °C, na dag 15 twee kolommen 15 - 18 °C

3) voor/na dag 30

4) voor/na dag 15

3.2.2 Onderzoek met zirkoonzand, zilverzand, biogrog, puimsteen en elektrografiet (serie 1)

De experimenten in serie 1 hebben slechts kort geduurd. De combinatie van een hoge temperatuur (20°C), een korte verblijftijd ($t = 0,5$ uur), een hoge CZV-volumebelasting ($28 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{dag}$) en een betrekkelijk gering korreloppervlakte van ca $2000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ hadden een snelle groei van de biomassa aan de drager (behalve aan zirkoonzand) tot gevolg. Dit leidde uiteindelijk tot verlies van de begroeide drager. De aangroei aan de drager is samengevat in de figuren 3.17 t/m 3.20. De vijf dragers konden op basis hiervan in drie groepen worden verdeeld:

1 Zirkoonzand

Door de hoge dichtheid was een hoog luchtdebiet (1400 l/h) noodzakelijk. Bij de hoge turbulentie die hierbij ontstond, begroeide de relatief gladde drager nauwelijks.

2 Zilverzand en biogrog

Tot dag 15 trad er een snelle aangroei op gevolgd door uitspoeling als gevolg van een massale aangroei van draadvormende organismen na dag 15.

3 Puimsteen en elektrografiet

Deze dragers spoelden binnen 10 dagen volledig uit door groei van slib in suspensie.

De invloed van de biomassa op de CZV-verwijdering wordt aangegeven in de figuren 3.21 en 3.22. De zeer geringe hoeveelheid biomassa bij zirkoonzand bewerkstelligde een CZV-eff-F van 300 - 400 mg/l en de overige dragers een CZV-eff-F van ongeveer 200 mg/l.

Met deze experimenten kon worden vastgesteld dat:

- zirkoonzand en in mindere mate elektrografiet minder geschikte dragers zijn;
- de gekozen omstandigheden minder geschikt waren. (Om die redenen werd serie 2 bij een verblijftijd van 1 uur uitgevoerd);
- de hoeveelheid biomassa op de drager invloed heeft op het zuiveringsrendement.

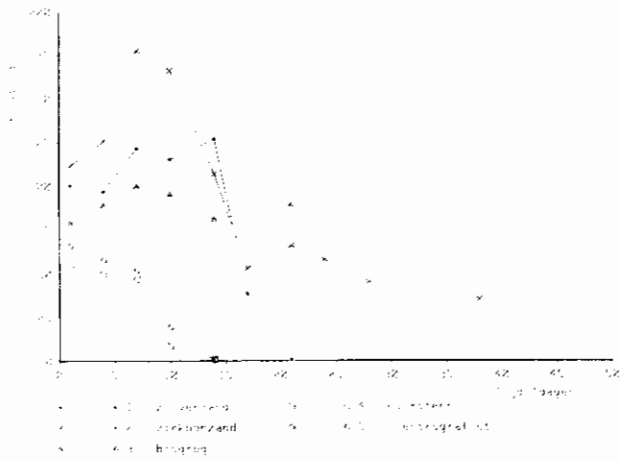


Fig. 3.17
Droogrest van drager + biomassa

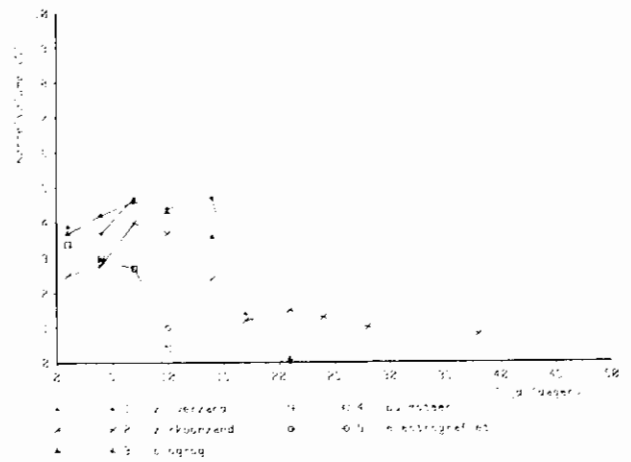


Fig. 3.18
Berekend korrelvolume

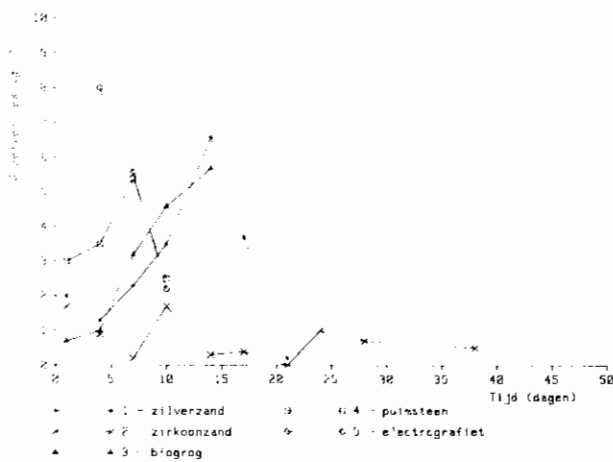


Fig. 3.19
Berekend gloeiverlies
(= "organische" stof)

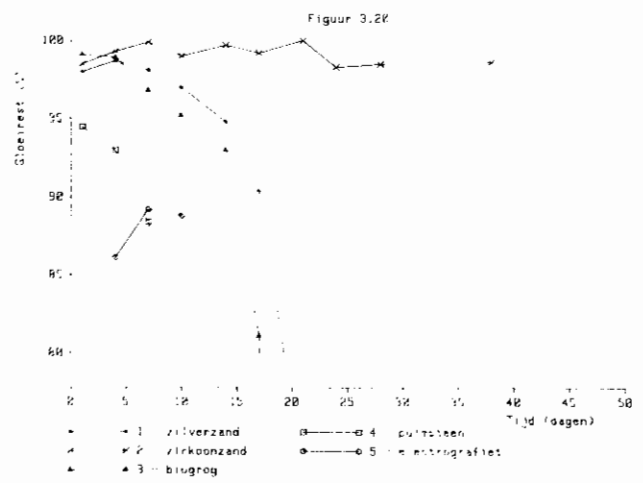


Fig. 3.20
Gloeirest van drager + biomassa

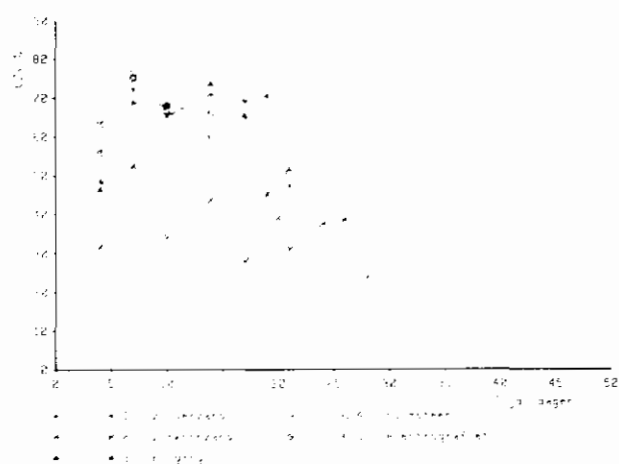
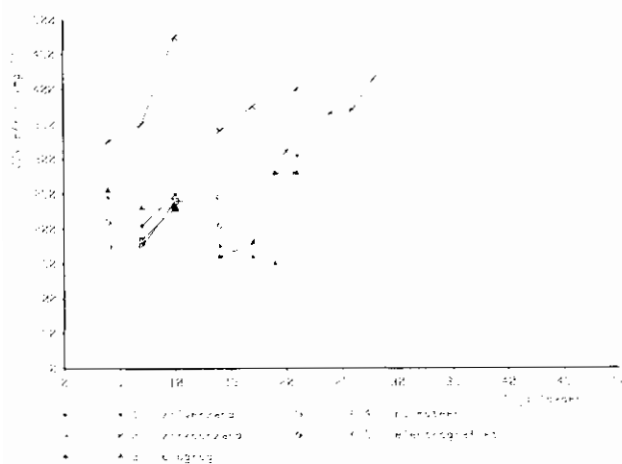


Fig. 3.21 CZV van gefiltreerd effluent

Fig. 3.22 CZV-reductie

3.2.3 Onderzoek met zilverzand, biogrog en puimsteen (serie 2)

Om een lagere aangroeijsnelheid te verwezenlijken dan in serie 1, is serie 2 uitgevoerd bij een twee maal langere verblijftijd (1 uur) en een tweemaal zo hoog korrelvolume (zie tabel 3.4). Voor de droogrest, het korrelvolume, het gloeiverlies en de gloeirest wordt naar de figuren 3.23 t/m 3.26 verwezen. De interpretatie van de gegevens wordt bemoeilijkt door de vrij sterke wisselingen in de afvalwaterconcentratie en temperatuur tijdens serie 2. Aanvankelijk was de temperatuur 17 - 19 °C. Na dag 15 was deze echter gedaald tot 12 - 15 °C.

Als dragers werden zilverzand, puimsteen en biogrog gebruikt. De experimenten met de laatste twee werden in duplo uitgevoerd om de reproduceerbaarheid van de proeven na te gaan.

Serie 2 had tot doel om één dragermateriaal te kunnen selecteren op basis van:

- aangroei van de biomassa aan de drager;
- mogelijkheden van onthechting van biomassa;
- onthechting en aangroei van biomassa in de kolommen.

Hierbij had het onthechtingsonderzoek slechts een oriënterend karakter.

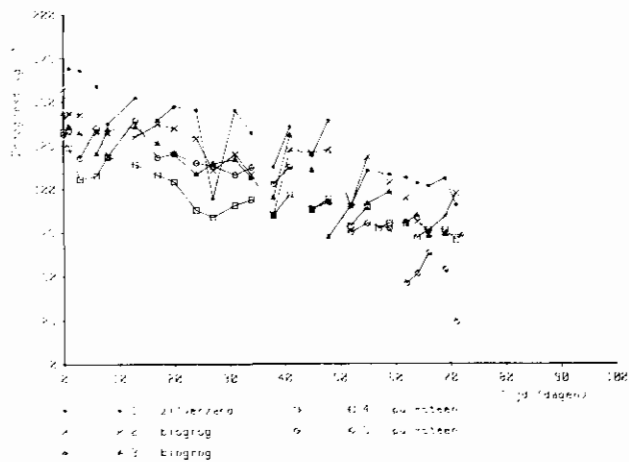


Fig. 3.23
Droogrest van drager + biomassa

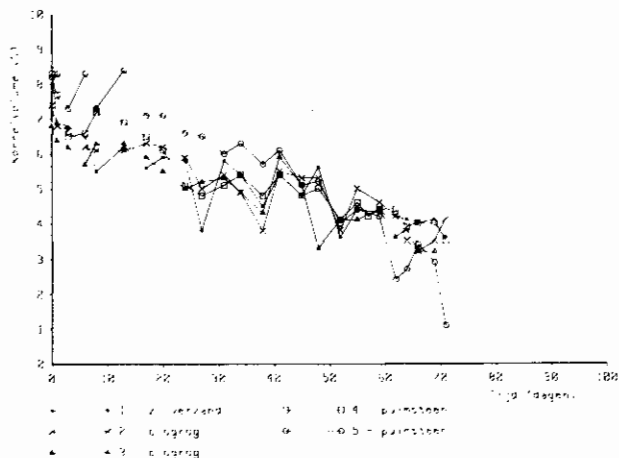


Fig. 3.24
Berekend korrelvolume

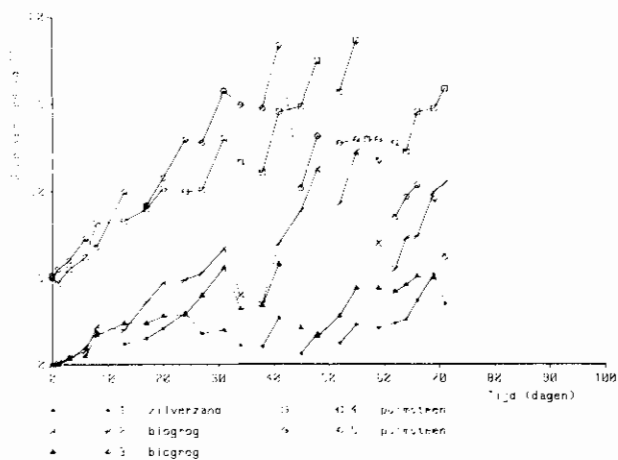


Fig. 3.25
Berekend gloeiverlies
(= "organische" stof)

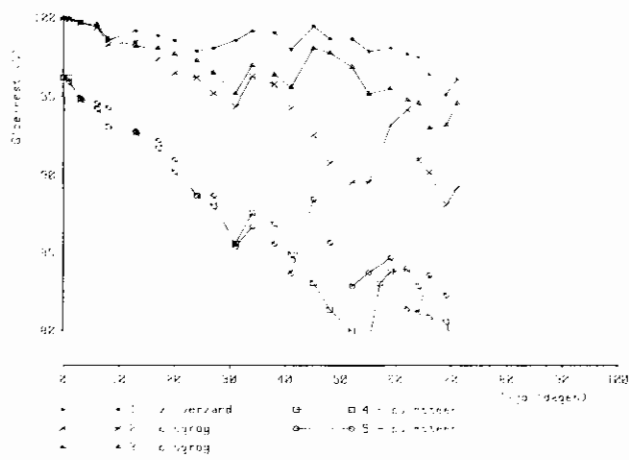


Fig. 3.26
Gloeirest van drager + biomassa

3.2.3.1 Aangroei biomassa

De aangroei aan zilverzand verliep bij deze lagere belasting duidelijk minder snel dan bij puimsteen en biogrog (tabel 3.5)

Tabel 3.5 Aangroei van biomassa (uitgedrukt als toename van het gloeiverlies van niet-gewassen drager, dus inclusief gesuspendeerde biomassa)

Aangroeisnelheid (gloeiverlies van niet gewassen drager)
tot dag 31 (mg/l reactorinhoud·dag)

Zilverzand	80
Biogrog	210
Biogrog	160
Puimsteen	230
Puimsteen	320

Vergeleken met de aangroeisnelheid van > 500 mg/l·dag bij zilverzand, puimsteen en biogrog in serie 1 liggen deze waarden aanzienlijk lager. Daarnaast was er nu verschil in aangroeisnelheden bij de verschillende dragers waarneembaar. De aangroei begon, zie ook hoofdstuk 4, voornamelijk op ruwe, beschutte plaatsen op de drager. De aangroei aan het "gladde" zilverzand verliep het traagst en die aan het veel ruwere puimsteen het snelst.

3.2.3.2 Verkennend onderzoek naar onthechting van biomassa

Bij slib-op-dragersystemen is de hechting van biomassa aan de drager van groot belang. Uit het eerdere onderzoek was gebleken dat deze hechting bijzonder stevig kan zijn. In serie 2 is getracht de mate van hechting aan de verschillende dragers na te gaan om de hoeveelheid biomassa in de reactor te kunnen beheersen door middel van recirculatie van dragermateriaal na verwijdering van de biomassa.

Op *kleine schaal* (monstervolume ongeveer 5 ml, microscopische beoordeling) zijn de volgende onhechtingsmogelijkheden onderzocht:

- anaërobie
- verhoogde temperatuur - $t = 75^{\circ}\text{C}$
- verhoogde temperatuur - $t = 100^{\circ}\text{C}$ (koken)
- vriezen + ontdooien
- verlaagde pH; $\text{pH} = 4$
- toevoeging van nitraat - 100 mg/l
- ultrasoon trillen
- roeren (reageerbuis triller)

De microscopische beoordeling heeft plaatsgevonden volgens figuur 3.27.

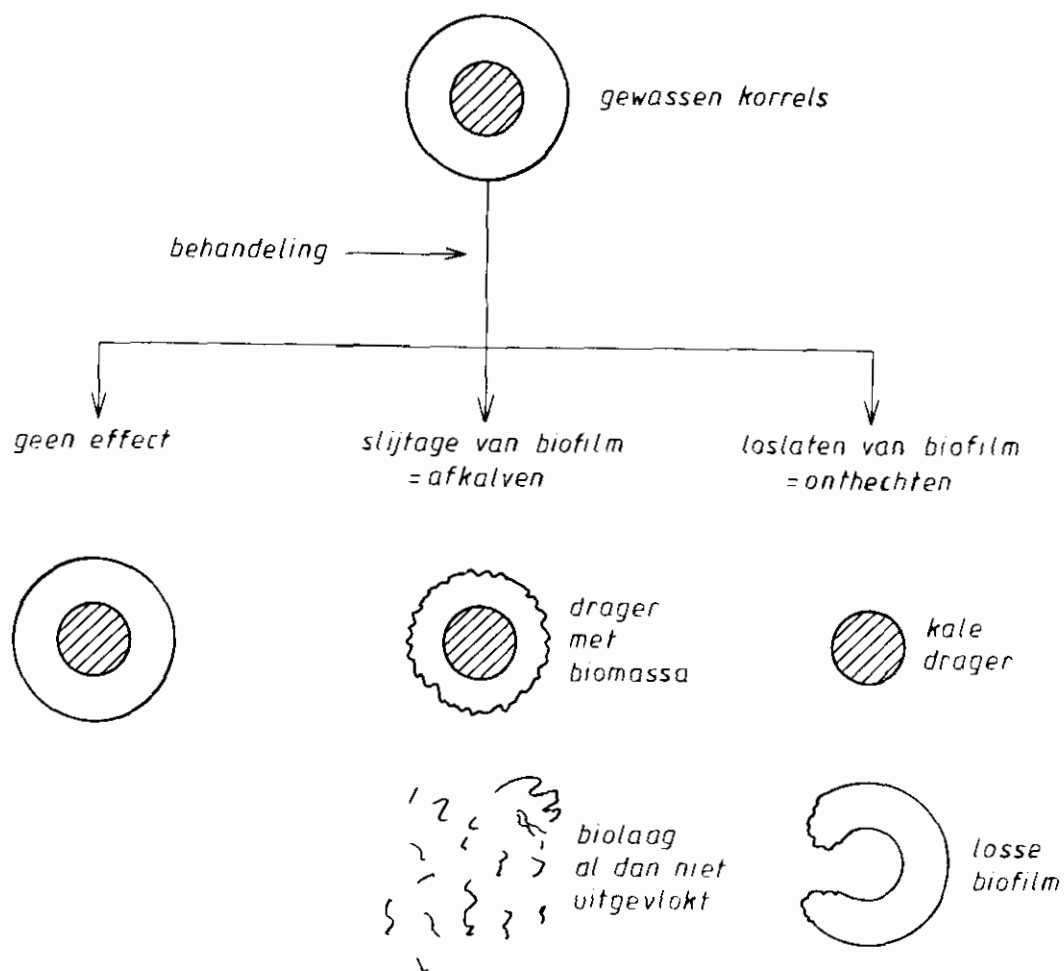


Fig. 3.27 Microscopische beoordeling van onthechting

De biolaag kon met de volgende intensieve methoden in een vrij korte tijd worden onthecht:

- vriezen en ontdooien : de biolaag zwol op, barstte open en was gemakkelijk mechanisch te verwijderen.
De biolaag liet als "huid" los.
- koken : de gehele biolaag liet los van drager. Er bleef een amorfe niet uigevlokte biomassa over.
- ultrasoon trillen : de biolaag desintegreerde en vlokke weer uit (kwam overeen met actief-slibvlokken).

De overige, relatief milde methoden, hadden betrekkelijk weinig invloed op de hechting en op de dikte van de biolaag. Zelfs anderhalf uur verwarmen bij 75°C veroorzaakte nauwelijks onthechting.

Vervolgens is de heraangroei van biofilm na *onthechting in de kolommen* gevolgd. De onthechting vond plaats met een opeenvolging van methoden met een oplopend effect op de hechting van de biolaag om te voorkomen dat deze "te" volledig zou worden verwijderd. Op de dagen 34 - 35 werden de kolommen 1, 3 en 5 gedurende 44 uur onder anaërobe condities gehouden. Deze behandeling had weinig effect. De biofilm bleef intact (zie fig. 3.28, ad A). Vervolgens (ad B) werden op de dagen 41 - 44 dezelfde kolommen gedurende 20 uur onder aërobe omstandigheden doorgespoeld met leidingwater (dus geen influent). Daarna werd de drager uit de kolommen 2 en 3 ultrasoon getrild tot microscopisch duidelijk effect op de hechting kon worden waargenomen. Dit werd weer gevolgd door 20 uur uitspoelen van losse biomassa met water.

De biofilm aan zilverzand (kolom 1) was na 44 uur anaërobie voor een groot deel onthecht. Hierbij was 78% van de organische stof in suspensie aanwezig. Omdat nagenoeg alle korrels kaal waren, werd van ultrasone behandeling van zilverzand afgezien. De biofilm aan biogrog (kolom 3) liet na de anaërobie reeds voor een deel los. Na het ultrasoon trillen was 63% van de organische stof los van de drager. De biomassa aan de puimsteen (kolom 5) was duidelijk steviger gehecht. De anaërobie had geen waarneembaar effect. Na de ultrasone behandeling was had 52% van de organische stof losgelaten. Mogelijk als gevolg van de ultrasone behandeling viel de puimsteen later in kleine stukken uiteen.

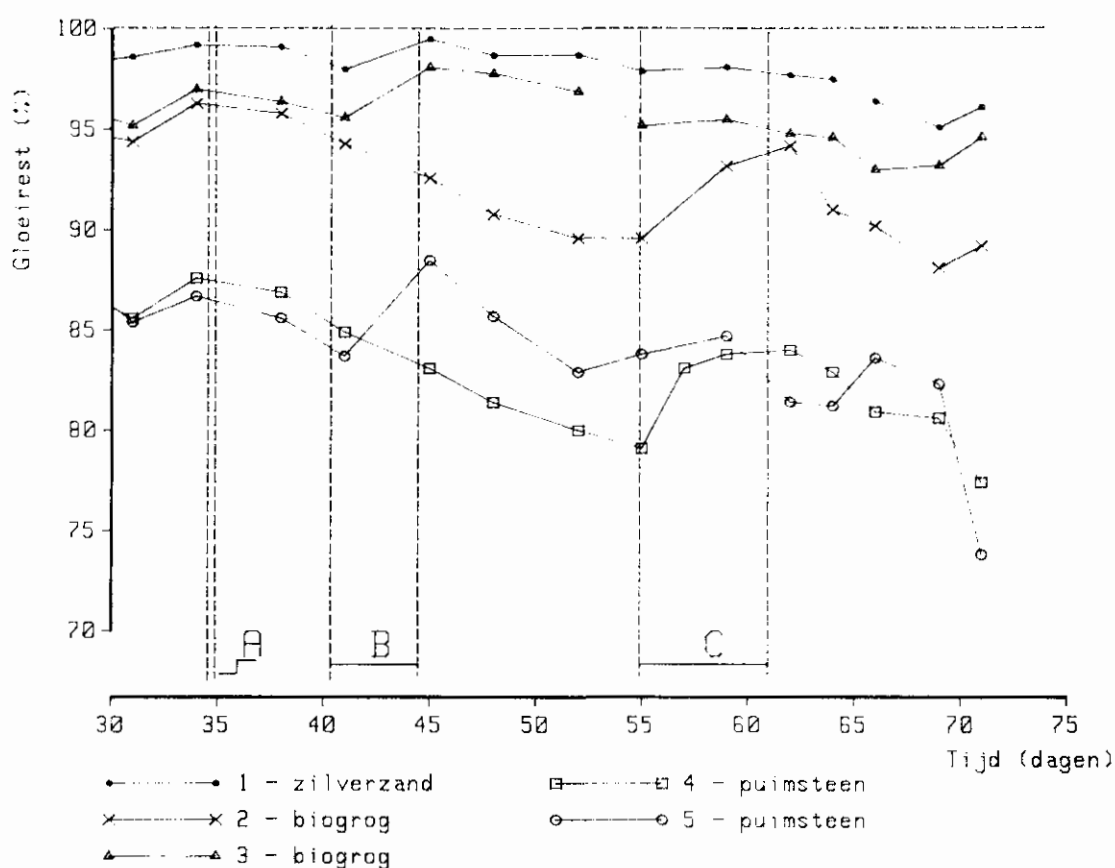


Fig. 3.28 Gloeirrest (de tijdvakken van de onthechttingsproeven in de kolommen zijn ingetekend).

A = 1^e onthechting, dag 34 - 35, kolommen 1, 3 en 5

B = 2^e onthechting, dag 41 - 44, kolommen 1, 3 en 5

C = 3^e onthechting, dag 55 - 62, kolommen 2 en 4

Het gehalte organische stof op de drager werd merkbaar beïnvloed door de concentratie "vuil" in het afvalwater. Bij aanvoer van verdund rioolwater verminderde de hoeveelheid biomassa. Dit is gesimuleerd door de kolommen 2 (biogrog) en 4 (puimsteen) gedurende ruim een week met leidingwater te doorstromen (de dagen 55 - 62, fig. 3.28, ad C). Het microscopisch beeld veranderde in het begin weinig, terwijl mogelijk door "uithongering" het asgehalte direct toenam. De hoeveelheid biomassa verminderde (afname organische stof van biogrog 55%, van puimsteen 36%). Afkalving van de biofilm werd pas na dag 59 waargenomen.

De *heraangroei* aan drager, waarvan de biofilm geheel of gedeeltelijk was verwijderd, verliep steeds minstens zo snel of sneller dan bij de aangroei

aan nieuwe drager. Door het hergebruik van drager wordt de periode van kolonisatie en eerste aangroei blijkbaar overgeslagen.

3.2.3.3 Zuiveringsresultaten

De CZV-verwijdering is weergegeven in de figuren 3.29, 3.30 en 3.31. Het CZV van het influent was tot dag ca 30 "normaal" (= ongeveer 600 mg/l). Door overvloedige neerslag (verdunding van het influent) werden later lagere waarden gevonden. De invloed van de vermindering van de hoeveelheid biomassa bij de onthechtingsproeven op de CZV-omzetting kon vooral bij zilverzand worden aangetoond (zie kolommen 1 en 3 na dag 40 in de figuren 3.30 en 3.31) Het duurde ongeveer drie weken voordat het zuiveringsrendement zich weer op hetzelfde niveau bevond.

De kolommen met puimsteen als drager hadden vooral in de aangroeiperiode de laagste CZV-eff-F waarde, de kolommen met zilverzand de hoogste. Dit wordt nader uitgewerkt in tabel 3.6. Hierin zijn gemiddelden van meetwaarden opgenomen uit de periode dag 36 - 71. Deze waarden zijn echter beïnvloed door de onthechtingsexperimenten. Het CZV-inf was in deze periode 314 mg/l. De CZV-volumebelasting was met 7,5 kg CZV/m³·dag vrij laag.

Tabel 3.6 Zuiveringsresultaten (dag 36 - 71)

Drager		Zilverzand	Biogrog		Puimsteen	
Kolom nummer		1	2	3	4	5
Droogrest	(g/l)	110	80	89	82	72
Gloeiverlies	(%)	98	92	96	82	83
"Organische stof"	(g/l)	2,4	8,3	3,9	ca 11*	ca 9*
CZV-inf	(mg/l)	314	314	314	314	314
CZV-eff	(mg/l)	230	170	205	175	180
CZV-eff-F	(mg/l)	125	89	110	85	92
CZV-%	(%)	58	70	63	71	69

* De invloed van de hoeveelheid biomassa op CZV-eff-F is duidelijk. Bij slechts 2-4 g/l aan organische stof (zilverzand en biogrog, kolom 3) was deze waarde 30 mg/l hoger dan bij ca 10 g/l biogrog (kolom 2) en puimsteen.

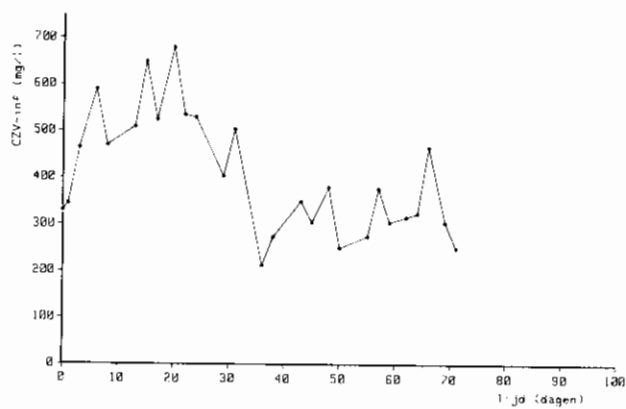


Fig. 3.29 CZV-influent

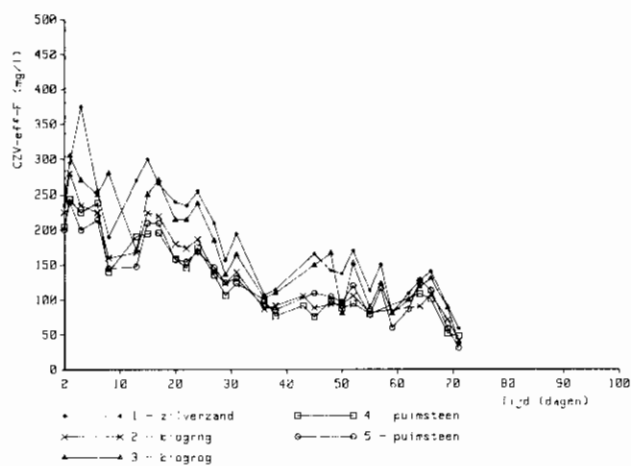


Fig. 3.30 CZV-gefiltreerd effluent

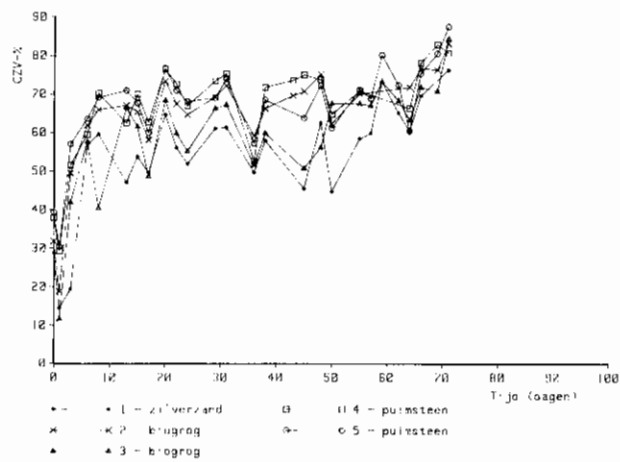


Fig. 3.31 CZV-reductie

3.2.3.4 Conclusies serie 2

De aangroei aan puimsteen verliep onder de gegeven proefomstandigheden ($t = 1$ uur en CZV-volumebelasting = $12 \text{ kg CZV/m}^3 \cdot \text{dag}$ tijdens de aangroeiperiode) sneller dan aan biogrog. De aangroei aan zilverzand verliep trager.

Onder de proefomstandigheden is de hechting van de biolaag sterk. Volgorde van oplopende sterkte: zilverzand, biogrog, puimsteen. Bij "onthechting" van biolagen laat de biofilm van een drager met een glad oppervlak (= zwakste hechting) in zijn geheel en/of in stukken los. Bij een ruwe drager (= sterke hechting) treedt vooral slijtage en afkalven van de biofilm op. Er kan een duidelijke voorkeur voor puimsteen als dragermateriaal (bij lagere CZV-volumebelastingen) worden uitgesproken. De geringe mechanische sterkte en lagere dichtheid zijn echter nadelen.

Controle van de hoeveelheid biomassa aan de drager is in principe mogelijk. Het aantrekkelijkst lijkt een gedeeltelijke verwijdering van de biolaag (slijtage of afkalving). Een algehele complete onthechting van de biofilm van een deel van de korrels lijkt minder aantrekkelijk.

3.2.4 Onderzoek met lava en puimsteen (serie 3)

Op aanwijzing van Gist-brocades is onderzocht of lava als drager geschikter is dan puimsteen (serie 3). Door de hogere dichtheid (2400 kg/m^3 , ca 50% hoger) en de grotere mechanische sterkte leek lava een aantrekkelijke drager. Lava is minder poreus en heeft een minder ruw oppervlak dan puimsteen. Voor de procesomstandigheden wordt verwezen naar § 3.2.1. De verblijftijd bedroeg 0,5 uur.

De temperatuur bedroeg $10 - 12 \text{ }^\circ\text{C}$. Na dag 15 werd de temperatuur in de kolommen 3 en 4 geregeld op $15 - 18 \text{ }^\circ\text{C}$. Naast de eerder gebruikte weergave van de resultaten in de figuren 3.32 (droogrest), 3.33 (korrelvolume) en 3.34 (gloeirest) is in deze serie eveneens het CZV van drager + biomassa bepaald. Dit geeft een directere maat voor de hoeveelheid biomassa aan de drager dan het gloeiverlies van de begroeide drager. In figuur 3.35 is CZV-biomassa (= CZV van de biomassa aan de drager na uitwassen van los gesuspenseerd materiaal) weergegeven ten opzichte van de droogrest van drager + biomassa en in figuur 3.36 ten opzichte van het beluchte reactorvolume. De CZV-suspensie (= CZV van biologisch materiaal in suspensie) bedroeg maximaal 4 g/l (fig. 3.37).

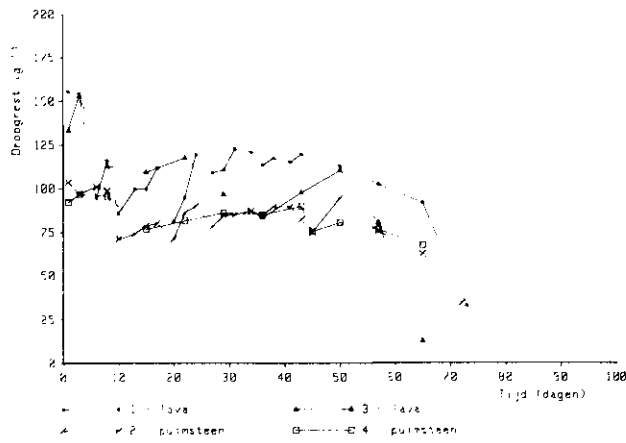


Fig. 3.32 Droogrest van drager + biomassa

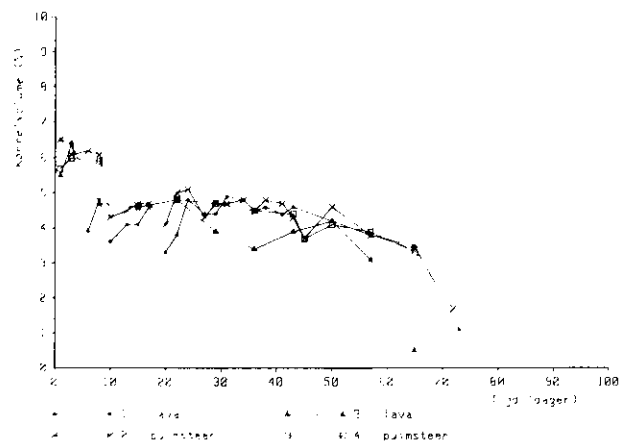


Fig. 3.33 Berekend korrelvolume

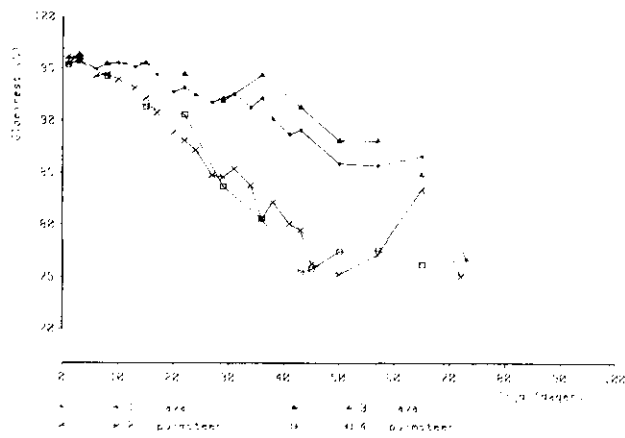


Fig. 3.34 Gloeirest van drager + biomassa

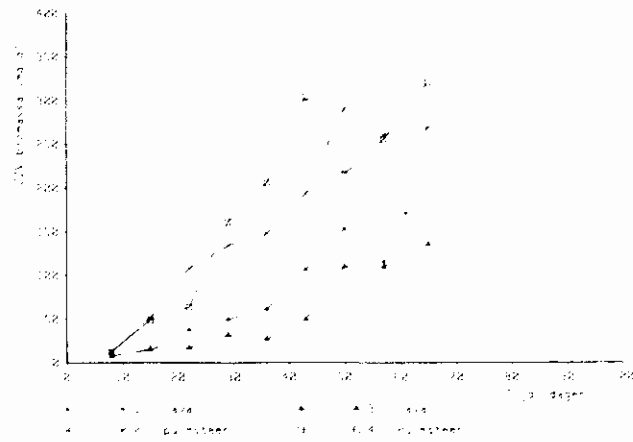


Fig. 3.35 CZV-biomassa aan drager (na wassen) in mg/g droogrest

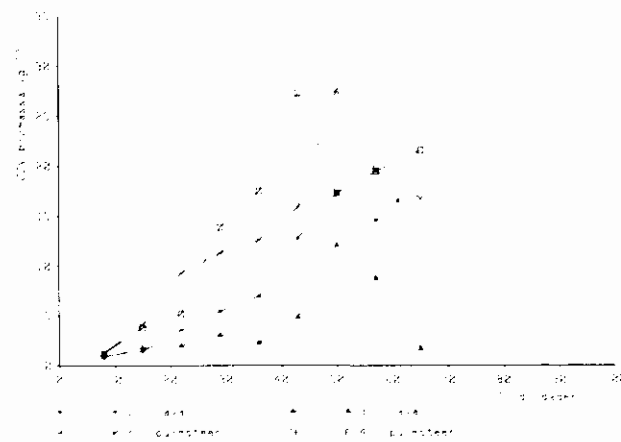


Fig. 3.36 CZV-biomassa aan drager (na wassen) in g/l

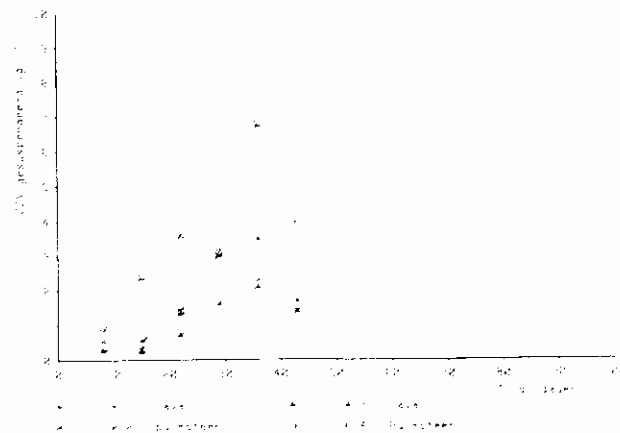


Fig. 3.37 CZV van gesuspendeerd materiaal in g/l

3.2.4.1 Aangroei biomassa

De snelheid van aangroei van de aan de drager gehechte biomassa was in de eerste twee weken vrijwel nihil. In de opstartperiode was het influent sterk verdund als gevolg van overvloedige regenval. In tabel 3.7 zijn de aangroei-snelheden voor de periode $t = 15$ tot $t = 43$ dagen opgenomen.

Tabel 3.7 Aangroeisnelheden van biomassa

Drager	Lava		Puimsteen		
	Kolom nummer	1	3	2	4
Aangroeisnelheid berekend uit het gloei-verlies van de niet gewassen drager					
(mg/l·dag)		300	140	400	560
Aangroeisnelheid berekend uit CZV-biomassa van gewassen drager					
(mg/g·dag)		2,0	1,2	4,6	6,7
Idem					
(mg/l·dag)		320	80	450	830

De invloed van de temperatuur op de aangroeisnelheid was verschillend voor beide dragers. Bij puimsteen was de aangroei bij 16 - 18°C naar verwachting sneller dan bij 10 - 12°C. Bij lava werd echter het tegenovergestelde waargenomen, namelijk een lagere aangroeisnelheid bij hogere temperatuur.

De aangroei aan puimsteen was over het geheel genomen ook duidelijk sneller dan die aan lava en de maximale hoeveelheid biomassa op puimsteen was hoger:

lava 12 - 17 g CZV-biomassa/l

puimsteen 27 - 28 g CZV-biomassa/l.

3.2.4.2 Zuiveringsresultaten

Van het influent en van de effluenten van de kolommen 1 en 2 zijn steekmonsters genomen. Na een aanvankelijk geringe vervuilingsswaarde (CZV-inf = 300 mg/l) werden na dag 20 "normale" waarden gevonden. In tabel 3.8 is het gemiddelde over de periode dag 41 - 57 opgenomen (zie ook de figuren 3.38 en 3.39).

Tabel 3.8 Zuiveringsresultaten, in de periode dag 41 - 57

Drager	Lava	Puimsteen
Kolom nummer	1	2
CZV-inf (mg/l)	685	685
CZV-inf-F (mg/l)	540	540
CZV-eff (mg/l)	550	480
CZV-eff-F (mg/l)	270	260
CZV-% (%)	60	62
CZV-F-% (%)	50	52

Het gehalte aan opgelost materiaal in het effluent was hoog. De CZV-verwijdering bij deze hoge belasting (CZV-volumebelasting = 33 kg/m³·dag) was slechts 50% voor het opgeloste CZV.

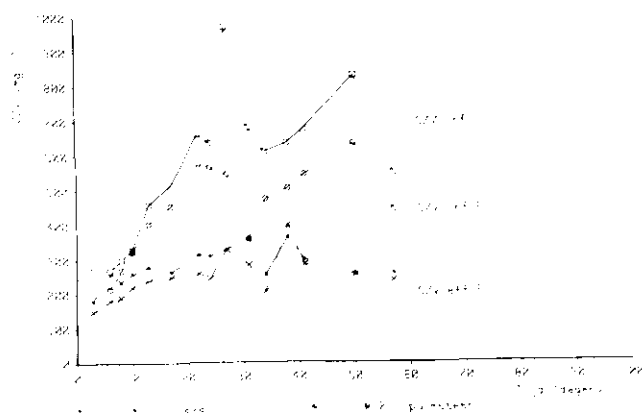


Fig. 3.38 CZV-waarden

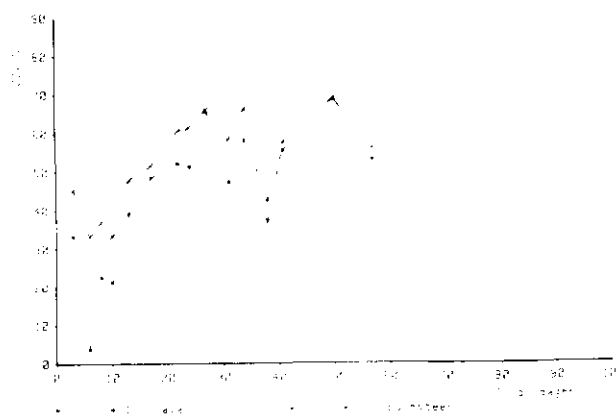


Fig. 3.39 CZV-reductie

3.2.4.3 Conclusies serie 3

- De aangroeisnelheid was in het begin van het derde experiment zeer laag. Dit viel samen met een laag CZV van het afvalwater (= 300 mg/l). In de periode na dag 43 was het afvalwater geconcentreerder (CZV = 700 mg/l). De aangroeisnelheid van de biomassa was toen vrij constant. De gevonden waarden voor puimsteen waren in deze serie bij een verblijftijd van een 0,5 uur ongeveer twee maal zo hoog als in de tweede serie bij een verblijftijd van 1 uur. Het verloop van de aangroei, microscopisch beeld, is in beide experimenten ongeveer gelijk.
- Qua biofilmvorming was puimsteen na 43 dagen - toen moest een keuze worden gemaakt - een duidelijk betere drager dan lava. De vorming van de biolaag verliep sneller. Bij puimsteen wordt een biolaag van egale dikte rond de drager gevormd (filmdikte 0,125 - 0,250 mm, t.o.v. drager diameter 50 -100%). Bij lava was eigenlijk geen sprake van biofilmvorming. Er ontstonden als het ware klompjes biomassa aan de drager.
- De invloed van de temperatuur was niet duidelijk. De resultaten van de proeven met lava en puimsteen waren tegenstrijdig.
- Bij een temperatuur van ca 10°C, een CZV-volumebelasting van 33 kg/m³·dag en een verblijftijd van 0,5 uur werden CZV-waarden in het gefiltreerde effluent van 270 mg/l gevonden. De verwijdering aan opgelost CZV was ca 50%. Het gehalte aan gesuspendeerd materiaal in het effluent was hoog.
- Gezien de aangroeisnelheid van biomassa aan de drager, maar vooral de wijze van biofilmvorming, werd voor de proefnemingen in de 25 l kolommen de voorkeur gegeven aan puimsteen boven lava.

3.2.5 Conclusies drageronderzoek

Op basis van het onderzoek op 2 l schaal werd puimsteen als drager voor het verdere onderzoek gekozen. Minder ruwe of minder poreuze drager, bijvoorbeeld zilverzand, komen alleen in aanmerking bij hogere aangroeisnelheden van de biomassa of als een sterke hechting van de biomassa op de drager minder gewenst is. De biofilmvorming werd voornamelijk bepaald door de CZV-volumebelasting (dit is een functie van de hydraulische verblijftijd en de influentsamenstelling) en de grootte en aard van het voor hechting van biomassa beschikbare oppervlak. Daarnaast was de systeemtemperatuur een belangrijke, doch onduidelijke factor.

3.3 VERKENNEND ONDERZOEK BIJ LANGERE VERBLIJFTIJDEN (SERIE 5)

Het onderzoek met de 2 l kolommen voor fase I - Verkennend laboratoriumonderzoek - is afgerond met nog enig verkennend onderzoek naar:

- aangroei op "schone" drager in aanwezigheid van begroeide drager ("enten");
- aangroei van biomassa en zuiveringsrendement bij serieschakeling van kolommen en bij langere gesommeerde verblijftijden van het afvalwater in het gehele systeem.

Achtereenvolgens zullen het zuiveringssysteem en de zuiveringsresultaten worden besproken.

3.3.1 Procesgegevens

De proeven werden in 2 l kolommen onder de volgende condities begonnen:

- drager : puimsteen
- korreldiameter : 0,175 - 0,25 mm
- korrelvolume : 8%
- dragerconcentratie : 128 g/l

De kolommen 1 en 5 werden gedeeltelijk met begroeide drager gevuld (respectievelijk 25 en 50% van totale dragerconcentratie) afkomstig uit de kolommen 2 en 4 van serie 3.

De kolommen waren in serie geschakeld (zie fig. 3.40). Na elke kolom was een bezinker geplaatst. Het slib dat hierin bezonk werd afgevoerd. Eventueel aanwezige drager werd in de kolom teruggebracht. In tabel 3.9 zijn debieten en verblijftijden opgenomen.

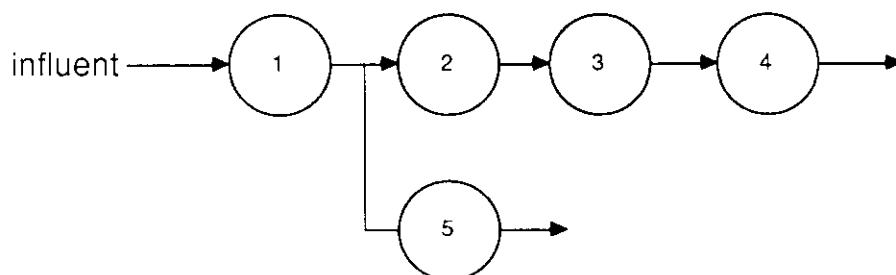


Fig. 3.40 Schakeling van de kolommen

Tabel 3.9 Debieten en verblijftijden

Kolom nummer	1	2	3	4	5
Debiet (l/uur)	3,2	1,6	1,6	1,6	0,8
Verblijftijd (uur)	0,5	1	1	1	2
Totale verblijftijd (uur)	0,5	1,5	2,5	3,5	2,5

Serie 5 werd op 3 april 1986 begonnen en na 106 dagen beëindigd.

3.3.2 Aangroei biomassa

De droogrest en de gloeirest van de begroeide drager zijn weergegeven in de figuren 3.41 en 3.43, het korrelvolume in figuur 3.42. De hoeveelheid biomassa in de kolommen kan worden afgeleid uit figuur 3.44 (CZV-biomassa = CZV van de begroeide drager na uitwassen van gesuspendeerd materiaal).

Bij eerdere experimenten met puimsteen is uitgegaan van onbegroeide drager. Hierdoor vond in het begin geen uitspoeling plaats. Bij dit experiment was kolom 1 geënt met ca 25% met draadvormende organismen begroeide drager. Deze bacteriën koloniseerden vrij spoedig ook de nieuwe drager. Hierbij trad vanaf het begin uitspoeling van drager op. De verliezen werden steeds met schone drager aangevuld. Dit is weergegeven in tabel 3.10.

Tabel 3.10 Toevoeging nieuwe drager (g/l) tijdens het experiment

Dag	Kolom nummer				
	1	2	3	4	5
2	31	-	-	-	
19	94	-	-		
27	50	25	50	25	-
54	63	44	16	16	16
64	50	25	25	-	50

In de daaropvolgende vakantieperiode werd echter geen drager bijgevuld. Tussen dag 59 en dag 90 is toen de drager uit kolom 1 gespoeld. Het is opvallend dat het CZV-biomassa (g/l) ondanks deze uitspoeling aanvankelijk vrijwel constant bleef door een sterke aangroei van biomassa aan de overgebleven drager (zie tabel 3.11). Bij een constante volumebelasting wordt de dikte van de biofilm kennelijk beïnvloed door de hoeveelheid drager. In kolom 5 (ook geënt met begroeide drager) nam de hoeveelheid biomassa in de beginperiode sterk af, echter zonder uitspoeling. Vanaf dag 22 werd een stabiele situatie met 4 - 5 g CZV-biomassa/l waargenomen.

Tabel 3.11 Invloed van uitspoeling van drager uit kolom 1 (verblijftijd 0,5 uur) op droogrest en CZV-biomassa

Dag	Droogrest	CZV-biomassa	
	(g/l)	(mg/g droogrest)	(g/l)
57	97,6	43	4,2
71	56,7	82	4,6
78	32,1	98	3,1

De aangroeisnelheid van biomassa aan drager over de periode tot dag 29 bedroeg voor de kolommen 2, 3 en 4 respectievelijk 86, 62 en 52 mg CZV-biomassa/l·dag. Na "uitschakeling" van kolom 1, verblijftijd 0,5 uur, groeide de biomassa in kolommen 2 en 5 aan. De gesommeerde verblijftijd voor kolom 2 werd hierbij van 1,5 tot 1 uur verkort, van kolom 5 van 2,5 tot 2 uur.

In de kolommen 2, 3 en 4 was het CZV-biomassa gelijkmatig, maar laag (2 - 3 g CZV/l). De aangroei verliep bij deze lange gesommeerde verblijftijden en relatief lage CZV-belastingen bij de in serie geschakelde kolommen erg langzaam.

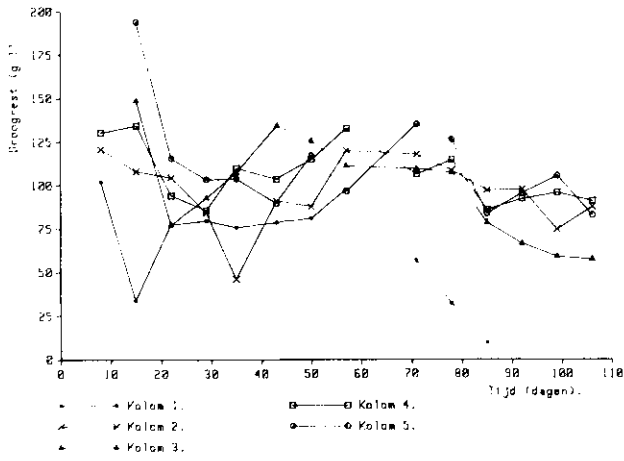


Fig. 3.41
Droogrest van drager + biomassa

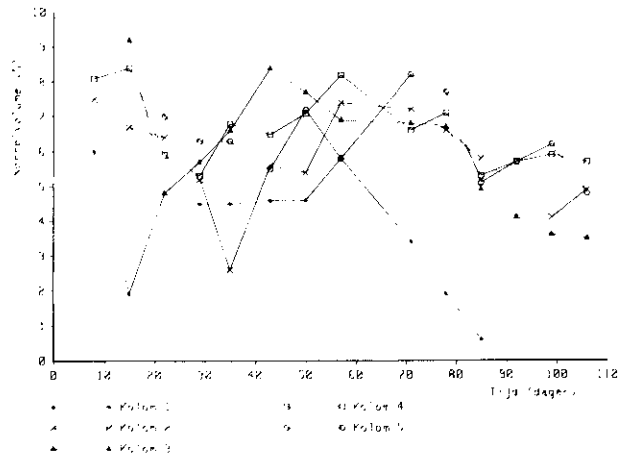


Fig. 3.42
Berekend korrelvolume

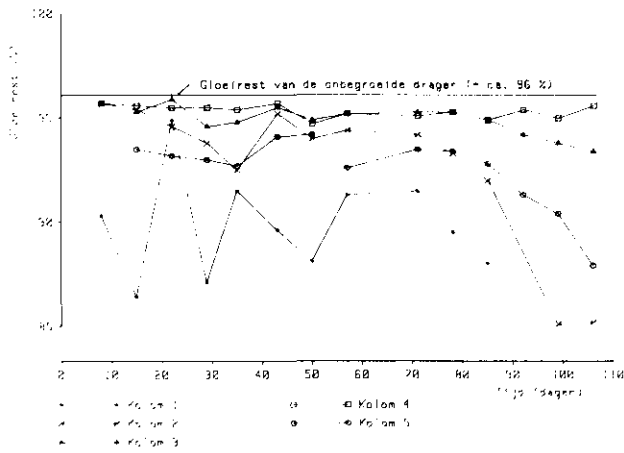


Fig. 3.43
Gloeirest van drager + biomassa

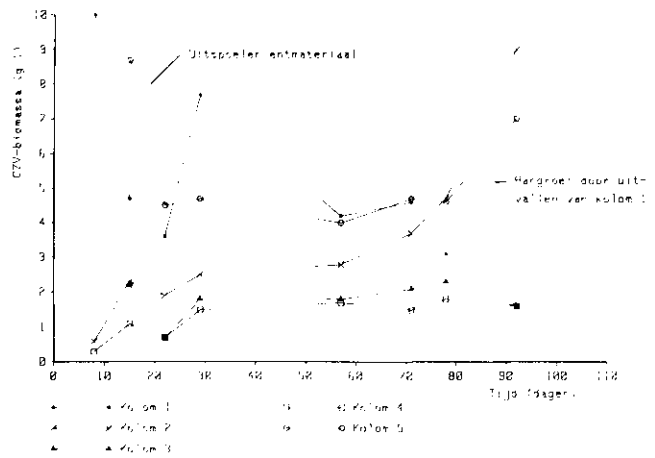


Fig. 3.44
CZV-biomassa aan drager

3.3.3 Zuiveringsresultaten

In tabel 3.12 is de CZV-volumebelasting in het tijdvak voor de "uitschakeling" van kolom 1 weergegeven. Doordat in de tussengeschakelde bezinkers slib bezonk, is de exacte slibbelasting van de in serie geschakelde kolommen 2, 3, 4 en 5 niet bekend. Daarom is voor deze kolommen alleen de CZV-volumebelasting van het opgelost CZV gegeven.

Tabel 3.12 CZV-volumebelasting (totaal-CZV en opgelost CZV)

Kolom nummer	1	2	3	4	5
CZV-volumebelasting (kg CZV/m ³ ·dag)					
- totaal	28	-	-	-	-
- gefiltreerd	20	3	2,5	2	1,5

In de periode dag 43 - 92 zijn van influent en effluenten zes maal het CZV bepaald. In tabel 3.13 worden gemiddelde waarden vermeld. Ondanks de geringe bemonsteringsfrequentie kon een goed beeld van de werking van de 2 l kolommen bij langere verblijftijden worden verkregen. In tabel 3.13 zijn de gemiddelde waarden voor deze periode gegeven. De invloed van de verblijftijd op het CZV van gefiltreerd effluent is weergegeven in figuur 3.46. Het is opvallend dat bij de lage gehalten aan biomassa (2 - 5 g CZV-biomassa/l) goede zuiveringsresultaten worden verkregen. Vooral bij kolom 1 (0,5 uur verblijftijd) was de hoeveelheid biomassa in de kolom veel minder dan bij eerdere experimenten bij deze verblijftijd.

In figuur 3.45 zijn gemiddelde CZV-waarden over de periode dag 42 - 92 gegeven:

- a) CZV = totaal CZV-waarde (monster als zodanig)
- b) CZV-F = opgelost CZV
- c) CZV-S = gesuspendeerd CZV (= CZV minus CZV-F)

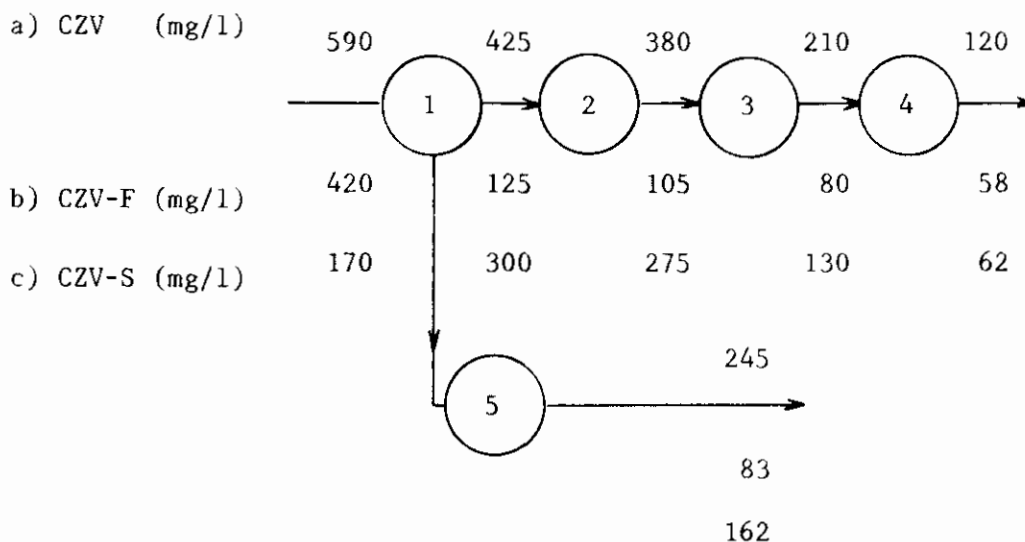


Fig. 3.45 Overzicht van de gemiddelde CZV-waarden van influent en van effluenten

Verwijdering van gesuspendeerd materiaal trad nauwelijks op. Een CZV-waarde voor gesuspendeerd materiaal van 62 en 162 in de effluenten van de kolommen 4 en 5 bij gesommeerde verblijftijden van 2,5 - 3,5 uur is hoog, temeer daar het CZV van gefiltreerde effluenten met waarden van 58 en 83 mg/l laag was. In figuur 3.46 is de relatie tussen de gesommeerde verblijftijd en het CZV van gefiltreerd effluent weergegeven. Het betrekkelijk goede zuiveringsresultaat van kolom 1, verblijftijd 0,5 uur, werd behaald bij een geringe concentratie aan biomassa. Het CZV-biomassa bedroeg 3 - 5 g/l. In kolom 1 werd 70% van het opgelost CZV verwijderd, in de daarop volgende kolommen per kolom 17 - 34%. Er was weinig verschil merkbaar in CZV-eff-F van de kolommen 3 en 5, die beiden een gesommeerde verblijftijd hadden van 2,5 uur.

Tabel 3.13 Samenvatting van de resultaten van de 2 l kolommen. Serie 5 - periode dag 43 - 92

Kolom nummer ¹⁾	1 ²⁾	2	3	4	5
Verblijftijd					
per kolom (uur)	0,5	1	1	1	2
gesommeerd (uur)	0,5	1,5	2,5	3,5	2,5

Droogrest drager + biomassa (g/l)	97,6	103	107	106	105
CZV-biomassa aan drager (g/l)	3-5	3-5	ca 2	ca 2	4-5
CZV-inf (mg/l)	590	- 3)	- 3)	- 3)	- 3)
CZV-inf-F (mg/l)	420	125	105	80	125
CZV-eff (mg/l)	425	380	210	210	245
CZV-eff-F (mg/l)	125	105	80	58	83
<u>CZV-reductie</u>					
CZV-% (%)	79	82	86	90	86
CZV-F-% (%)	70	75	81	86	80
Idem per kolom	70	17	24	28	34

N-Kj-inf (mg/l)	79	- 3)	- 3)	- 3)	- 3)
N-Kj-inf-F (mg/l)	72	60	3/29 ⁴⁾	3,2	60
N-Kj-eff-F (mg/l)	60	3/29 ⁴⁾	3,2	2	3,4
N-NH ₄ -eff-F (mg/l)	47	2/23 ⁴⁾	0,6	0,3	1,3
N-NO-eff-F (mg/l)	0,3	50/16 ⁴⁾	40	42	41
<u>N-Kj-reductie</u>					
N-Kj-% (%)	24	96/3 ⁴⁾	96	97	96
N-Kj-F-% per kolom (%)	20	95/2 ⁴⁾	0-89	ca 40	94

Opmerkingen:

- 1) Kolommen 1, 2, 3, 4 en kolommen 1 en 5 in serie.
- 2) Kolom 1 werd m.i.v. dag 85 buiten gebruik gesteld, daardoor werden de verblijftijden in de overige kolommen 0,5 korter.
- 3) Niet bekend, in nabezinkers werd gesuspendeerd materiaal afgescheiden.
- 4) / = voor uitschakeling van kolom 1 / na uitschakeling van kolom 1.

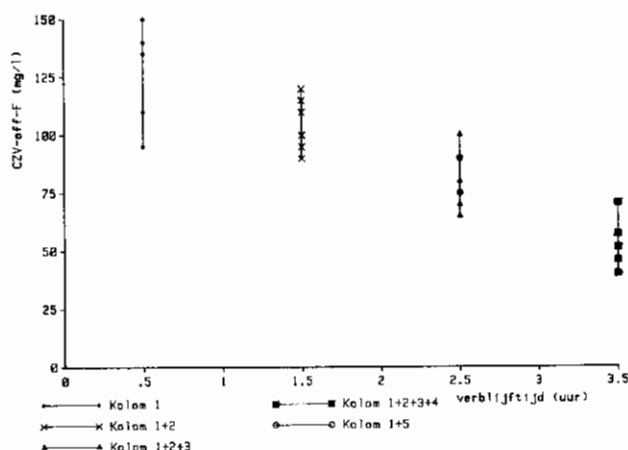


Fig. 3.46 Relatie tussen totale verblijftijd en CZV van gefiltreerd effluent. Periode dag 43 - 92.

In de periode dag 57 - 92 zijn van influent en effluenten vier maal de gehalten van de diverse stikstofverbindingen bepaald (zie ook tabel 3.13).

Bij een verblijftijd van 2,5 en 3,5 uur was de nitrificatie volledig (zie figuur 3.47). Het gehalte aan Kjeldahl-stikstof was minder dan 5 mg/l en het ammoniumgehalte minder dan 1 mg/l. Ook hier is de overeenkomst van de gehalten in het effluent van de kolommen 3 en 5 groot.

Bij een verblijftijd van 0,5 uur (kolom 1) trad, overeenkomstig eerdere waarnemingen, geen nitrificatie op. Bij een gesommeerde verblijftijd van < 1,5 uur is bij een temperatuur van circa 20°C waarschijnlijk geen stabiele nitrificatie mogelijk: De nitrificatie in kolom 2 was pas volledig na dag 71. Daarvoor, dag 57, was de N-Kj-eff-F nog 32 mg/l. Na het uitvallen van kolom 1 nam de gesommeerde verblijftijd in deze kolom af tot 1 uur. N-Kj-eff-F nam daarna weer toe tot 28 mg/l op dag 92.

Bij verblijftijden van $\geq 2,5$ uur kwam de nitrificatie al snel op gang. Voor de eerste analyses (op dag 58) werd al waargenomen, dat slib in de nabezinkers opdreef. Dit duidt op denitrificatie en dus op de aanwezigheid van nitraat.

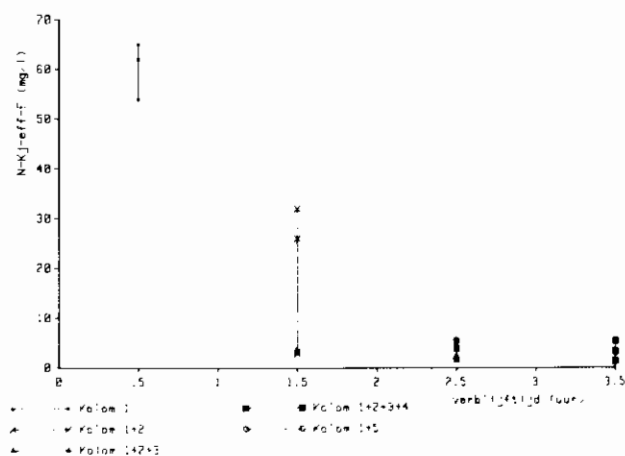


Fig. 3.47 Relatie tussen gesommeerde verblijftijden en N-Kj van gefiltreerd effluent.

In het vooronderzoek was de invloed van de CZV-volumebelasting op de stikstofreductie vastgesteld (§ 3.1.2, fig. 3.8). De resultaten van serie 5 zijn in deze figuur ingetekend (figuur 3.48). De resultaten sluiten goed bij elkaar aan.

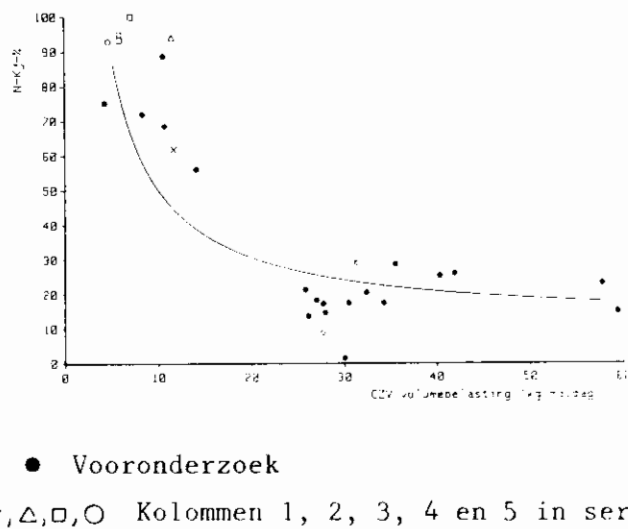


Fig. 3.48 Invloed van de CZV-volumebelasting (t.o.v. gesommeerde hydraulische verblijftijd) op de N-Kj-reductie.

Bij een verblijftijd van 1,5 uur bedroeg de N-Kj-verwijderingssnelheid ca 0,4 kg N-Kj/kg CZV-biomassa·dag of 1,0 kg N-Kj/m³·dag. Laatstgenoemde waarde komt overeen met de NH₃-verwijderingssnelheid van 0,9 kg NH₃-N/m³·dag in de nitrificatie-fluidbedreactor te Horley, STW (zie [1]).

De reducties van CZV en N-Kjeldahl als functie van de gesommeerde verblijftijd zijn tenslotte in figuur 3.49 samengebracht.

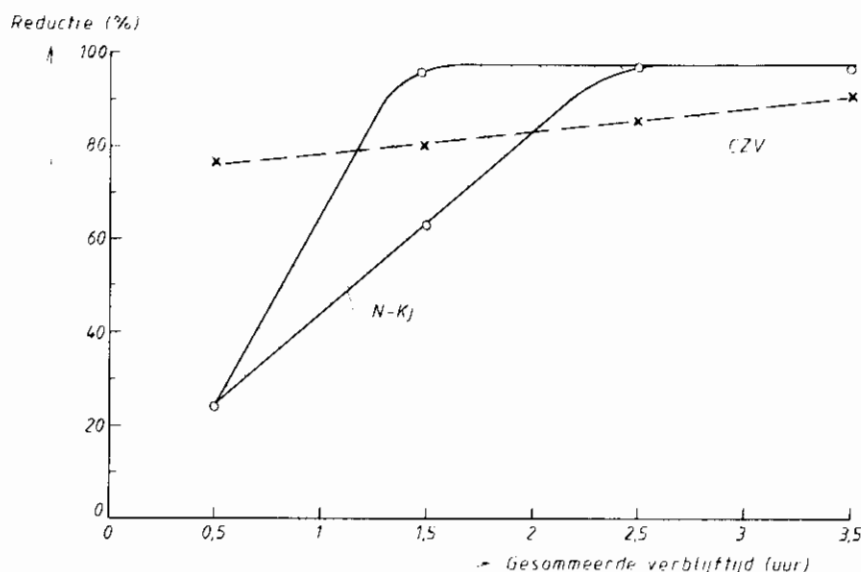


Fig. 3.49 Invloed van de gesommeerde verblijftijd op de reductie van CZV en N-Kj.

3.3.4 Conclusies serie 5

Het verkennende onderzoek naar meertrapssystemen met langere gesommeerde verblijftijden heeft, ondanks de relatief geringe inspanning die aan o.a. analyses kon worden besteed, relevante resultaten opgeleverd:

- Bij gesommeerde verblijftijden langer dan 1,5 uur trad vergaande nitrificatie op.
- De afname van het CZV van het opgeloste materiaal nam geleidelijk toe bij langere verblijftijden. De grootste reductie trad echter op in de eerste trap.
- De resultaten suggereren, dat in een meertrapsproces de gesommeerde verblijftijden het zuiveringsresultaat bepalen en niet het aantal trappen.
- Over het nut van het opstarten van slib-op-drager-reactoren met reeds begroeide drager kan geen uitspraak worden gedaan, omdat uitspoeling van deze drager optrad. Wel leek het zuiveringsproces sneller te beginnen.
- Bij een geringere aangroeisnelheid van de biomassa leek de stabiliteit van het systeem toe te nemen.

3.4 ONDERZOEK OP 25 l SCHAAL (SERIE 4)

In serie 4 zijn de eerste proeven met 25 l kolommen uitgevoerd voor een meer gedetailleerde bestudering van de bruikbaarheid van puimsteen als drager. De verblijftijden werden ingesteld op 0,5 en 1 uur. De verblijftijd van 1 uur werd verwezenlijkt in één trap en in twee trappen van 0,5 uur (zie tabel 3.14).

3.4.1 Procesgegevens

De proef (met vier kolommen) werd op 13 maart 1986 gestart. De volgende gegevens zijn van belang:

- drager : puimsteen
- korreldiameter : 0,175 - 0,25 mm
- dragerconcentratie : 192 g/l
- korrelvolume : 12%.

De dragerconcentratie kon bij de 25 l kolommen door de hogere superficiële luchtsnelheid bijna twee maal zo hoog zijn als bij de experimenten op 2 l schaal.

Tabel 3.14 Debieten en hydraulische verblijftijden

Kolom nummer	6	7	8	9
Verblijftijd (uur)	0,5	1	0,5	0,5
Gesommeerde verblijftijd (uur)				1
Pompdebiet (uur)	34	17	34	34

Kolommen 6, 7 en 8 werden gevoed met bezonken rioolwater, kolom 9 met het effluent van kolom 8. Het zuurstofgehalte in de kolommen bedroeg aanvankelijk 8 - 12 mg/l. Na aangroei van biomassa werd een zuurstofgehalte van 3 - 6 mg/l gehandhaafd. De pH varieerde tussen 7,2 en 8. De temperatuur liep tussen dag 30 en dag 70 op van 10 - 12°C tot 18 - 20°C. Het luchtdebiet werd ingesteld op 1000 - 1250 l/h, de superficiële luchtsnelheid over de gehele kolomdiameter was derhalve 130 - 160 m/uur.

3.4.2 Aangroei biomassa

Het verloop van de waarden voor de droogrest, het berekende korrelvolume en de gloeirest zijn in de figuren 3.50, 3.51 en 3.52 opgenomen. Op dag 13 is de initiële uitspoeling van fijn materiaal gecompenseerd door de toevoeging van 42 g/l puimsteen. Ten einde de droogrest van drager + biomassa op een niveau van ongeveer 200 g/l te handhaven, is gedurende het verdere verloop van de proef (tot dag 75) incidenteel extra dragermateriaal toegevoegd om de normale verliezen door monsterneming en uitspoeling te compenseren. In totaal is hiertoe 70 g/l per kolom toegevoegd. Overigens waren de verliezen aan dragermateriaal (minder dan 0,5% per dag) aanmerkelijk minder dan bij de proeven op 2 l schaal. Daarnaast was de dragerconcentratie aanzienlijk hoger dan bij de proeven op 2 l schaal. Het korrelvolume bedroeg hierbij 12% (tegen globaal 4 - 8% bij eerdere proeven met puimsteen).

De ontwikkeling van de biomassa-aan-drager (g CZV-biomassa/liter reactor) is in figuur 3.53 weergegeven. De in deze figuur verwerkte informatie heeft betrekking op gewassen dragermateriaal.

Hierna wordt het gedrag van de biomassa onder de verschillende experimentele condities gegeven.

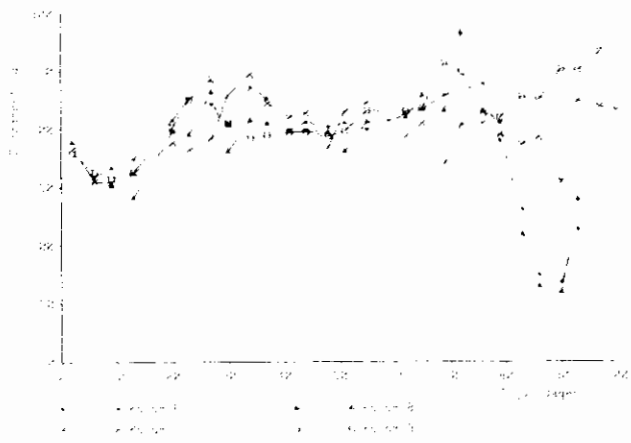


Fig. 3.50
Droogrest van drager + biomassa

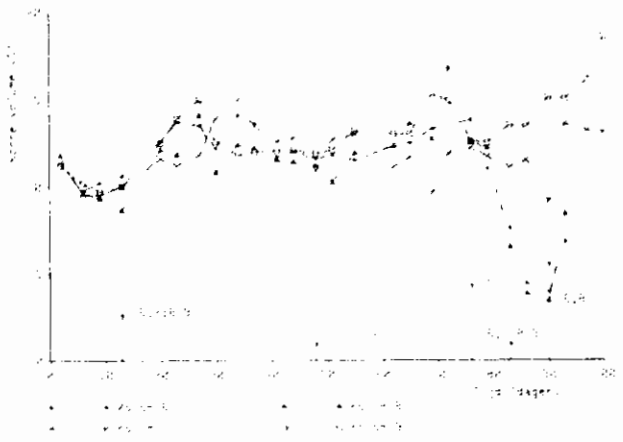


Fig. 3.51
Berekend korrelvolume



Verblijftijd 0,5 uur (kolommen 6 en 8)

Gedurende de eerste 50 dagen nam het gehalte aan biomassa regelmatig toe, tot een gehalte van ongeveer 30 g CZV-biomassa/l werd bereikt. Tussen dag 50 en dag 70 fluctueerde dit gehalte aanzienlijk. Na dag 70 vond een sterke groei van draadvormende organismen plaats. Dit veroorzaakte een sterke uitspoeling van dragermateriaal. Op dag 91 is 88 g/l aan extra drager toegevoegd om de verliezen te compenseren. Desondanks spoelde het puimsteen later nagenoeg volledig uit. De resultaten van dit experiment waren voor de beide kolommen met een half uur verblijftijd vrijwel identiek.

Verblijftijd 1 uur (kolom 7)

De biomassa in kolom 7 groeide tot dag 65 aan tot circa 30 g CZV-biomassa/l. Na een sterke terugval tot 10 g CZV-biomassa/l na dag 80 bleef de hoeveelheid biomassa in kolom 7 vrijwel constant op deze waarde.

Gesommeerde verblijftijd 1 uur (kolommen 8 en 9 met elk 0,5 uur verblijftijd in serie)

De aangroei in kolom 9 verliep de eerste week even snel als in de andere kolommen (zie fig. 3.52 en 3.53). Na de vermindering van de CZV-belasting van kolom 9 door de toenemende CZV-reductie in kolom 8 werd de aangroei-snelheid veel lager. Na aangroei van de biomassa aan de drager tot 16 g CZV-biomassa/l in 80 dagen nam de hoeveelheid biomassa weer af tot ca 10 g CZV-biomassa/l. In tabel 3.15 zijn berekende aangroeisnelheden van de biomassa in de kolommen weergegeven.

De aangroeisnelheden per volume-eenheid liggen op eenzelfde niveau als bij vorige experimenten met puimsteen als drager. De aangroei aan de drager bleek in sterke mate bepaald door de CZV-volumebelasting (fig. 3.54). Daarnaast was de aangroeisnelheid goed reproduceerbaar; In de kolommen 6 en 8, beide 0,5 uur verblijftijd, was deze 470 CZV-biomassa/l·dag. Bij een verblijftijd van 1 uur (kolom 7) bedroeg de aangroeisnelheid 340 mg CZV-biomassa/l·dag. De gemiddelde aangroeisnelheid bij een gesommeerde verblijftijd van 1 uur (kolommen 6 en 8) was hieraan met $(470 + 190)/2 = 330$ mg CZV/l·dag vrijwel gelijk.

Tabel 3.15 Aangroeisnelheden van biomassa

Kolom nummer	6	7	8	9
Verblijftijd (uur)	0,5	1	0,5	0,5 + 0,5 ¹⁾
Duur van aangroeperiode (dagen)	50	65	50	80
Aangroeisnelheid berekend uit het gloeiverlies van de niet gewassen drager (mg gloeiverlies/l·dag)	360	280	360	130
Aangroeisnelheid berekend uit de CZV-biomassa van gewassen drager (mg/g·dag)	2,7	1,7	2,7	0,83
(mg/l·dag)	470	340	470	190

1) In serie met kolom 8.

3.4.3 Zuiveringsresultaten: CZV-omzetting

Het CZV van het influent (voorbezonden stedelijk afvalwater) was gedurende de proefperiode redelijk constant (gemiddeld CZV-inf = 640 mg/l, standaardafwijking = 99 mg/l en CZV-inf-F = 410 mg/l, standaardafwijking = 42 mg/l). De CZV-volumebelasting na de aangroeperiode (totaal; niet gefiltreerd) is in figuur 3.54 weergegeven. In tabel 3.16 is daarnaast ook de CZV-volumebelasting na filtreren opgegeven. Kolom 9 was in serie geschakeld met kolom 8. De toevoer aan opgelost CZV was hierdoor laag. Door het hoge gehalte aan gesuspendeerd materiaal in het effluent van kolom 8 lijkt de volumebelasting op kolom 9 hoger dan ze in werkelijkheid was.

Tabel 3.16 CZV-volumebelasting (zowel als zodanig en na filtreren) in de periode dag 51 - 55

Kolom nummer	6 en 8	7	9
Verblijftijd (uur)	0,5	1	0,5 + 0,5 ¹⁾
Volumebelasting (kg CZV/m ³ ·dag)			
- totaal	20,1	21,1	21,5
- gefiltreerd	19,8	9,9	9,2

1) In serie met kolom 8.

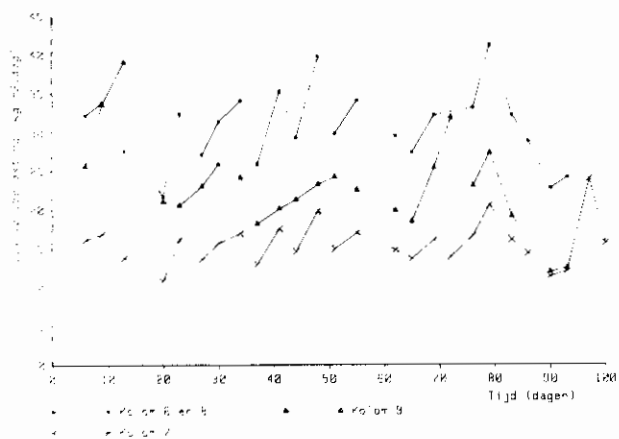


Fig. 3.54
CZV-volumebelasting
(niet gefiltreerd)

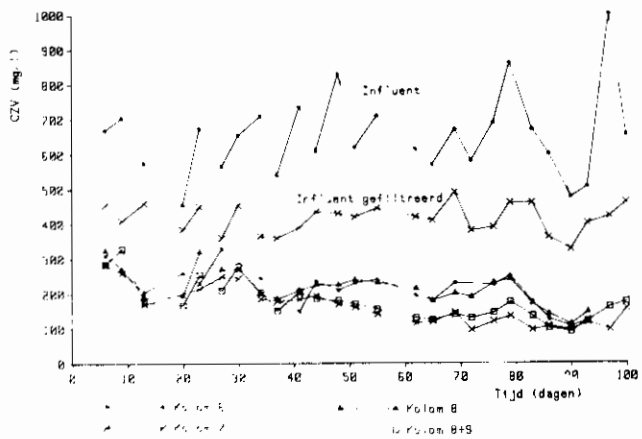


Fig. 3.55
CZV-waarden van influent en van
gefiltreerd effluent

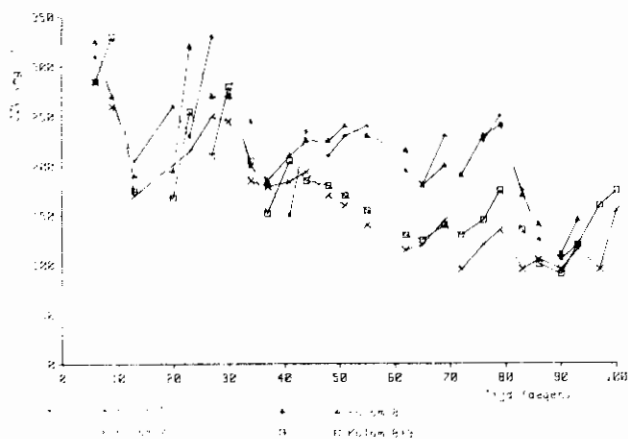


Fig. 3.56
CZV-waarden van gefiltreerd effluent

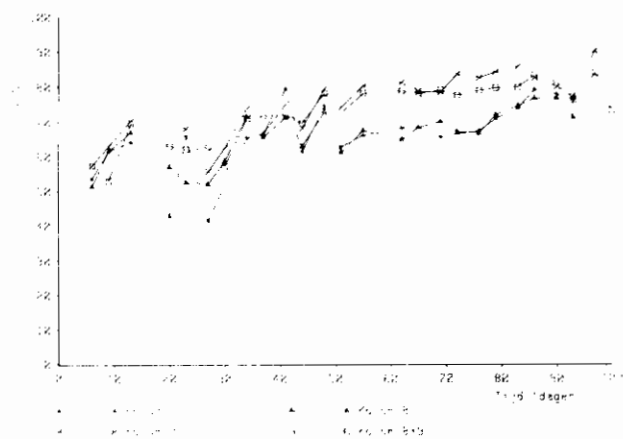


Fig. 3.57
CZV-reductie

In de figuren 3.55 en 3.56 is het CZV van influent en effluent (al dan niet na filtreren) van de kolommen en de daaruit berekende rendementen weergegeven. Hierna worden de zuiveringsresultaten bij de verschillende procesomstandigheden behandeld.

Verblijftijd 0,5 uur (kolommen 6 en 8)

Aanvankelijk, in de aangroeperiode van biomassa aan de drager, schommelde de CZV-reductie (zie fig. 3.57) vrij sterk. In de periode van dag 51 - 76 was de CZV-reductie gemiddeld 66% (CZV-% = CZV-effluent gefiltreerd t.o.v. niet gefiltreerd influent). Na dag 76 steeg de CZV-reductie in beide kolommen tot boven 75%. Dit ondanks de sterke uitspoeling van begroeide drager. In tabel 3.17 zijn de voornaamste resultaten samengevat.

Tabel 3.17 CZV en zuiveringsrendementen bij een verblijftijd van 0,5 uur, kolommen 6 en 8

Periode	Dag 51-76	Daarna
<u>Effluent</u>		
CZV-eff (mg/l)	460	-
CZV-eff-F (mg/l)	210	< 150
<u>Reductie</u>		
CZV-%	66	ruim 75
CZV-F-%	49	ruim 60

Verblijftijd 1 uur (kolom 7) en gesommeerde verblijftijd 1 uur (kolom 9)

De CZV-verwijdering in de kolommen 7 en 9 was in de periode dag 51 - 95 vrijwel constant (zie fig. 3.57). In tabel 3.18 zijn gegevens opgenomen omtrent de werking van kolom 7 (verblijftijd = 1,0 uur), kolom 8 en 9 gezamenlijk (verblijftijd 0,5 en 0,5 uur) en kolom 9 apart.

Tabel 3.18 CZV en zuiveringsrendementen bij een totale verblijftijd van 1,0 uur - periode dag 51 - 93

	Kolom 7	Kolom 8 + 9	Kolom 8 apart	Kolom 9 apart
<u>Effluent</u>				
CZV-effluent	350	355	450	355
CZV-effluent-F	120	135	190	135
<u>Reductie</u>				
CZV-%	81	79	70	70
CZV-F-%	71	69	54	29

Voor het zuiveringsrendement lijkt het niet veel uit te maken of de totale verblijftijd wordt bereikt in één kolom of in twee kolommen die in serie geschakeld waren. Het CZV van gefiltreerde effluenten (CZV-eff-F) was in het eerste geval ca 10 à 15 mg/l lager.

Voor het industriële afvalwater van Gist-brocades werd bij een verblijftijd van 0,3 uur en een temperatuur van 40°C een specifieke slibactiviteit van 0,75 kg CZV/kg organische stof per dag berekend. Er werd in de periode dag 51 - 78 in de kolommen 6 en 8 ongeveer 9,5 kg CZV/m³·dag verwijderd (zie tabel 5.4). Bij een hoeveelheid van ca 15 g CZV-biomassa/l bedraagt de specifieke slibactiviteit dan 0,6 kg CZV/kg CZV-biomassa per dag. In de periode dag 79 - 93 (hoger zuiveringsrendement bij minder biomassa in de reactor) was de specifieke slibactiviteit met 1,5 kg CZV/kg CZV-biomassa per dag zelfs hoger.

Met de aangroei van biomassa neemt het rendement toe. In figuur 3.58 is dit, enigszins schematisch, weergegeven. Bij de vermelde dagen worden de CZV's-biomassa op die dag aangegeven. Bij de kolommen met 0,5 uur verblijftijd spoelde in de periode na dag 70 begroeide drager uit. Dit ging gepaard met een verlaging van het CZV van gefiltreerd effluent. De oorzaak hiervan is niet duidelijk. Mogelijke verklaringen worden in paragraaf 5.1 gegeven.

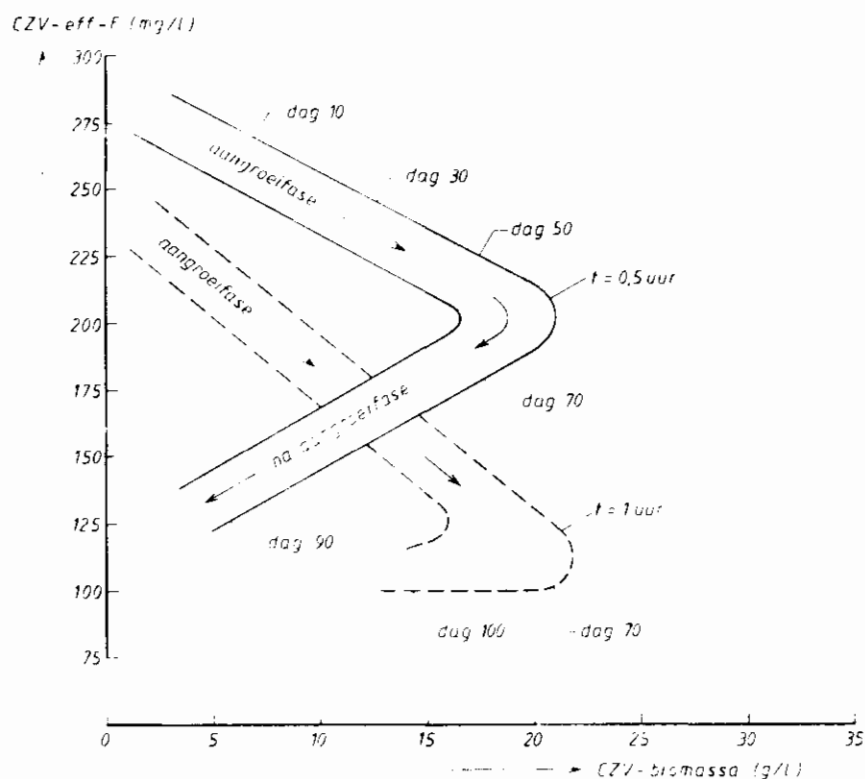


Fig. 3.58 Invloed van het CZV-biomassa aan de drager in de aangroei-fase en na de aangroei-fase met uitspoelen van drager

3.4.4 Zuiveringsresultaten: stikstofomzettingen

het getalte aan N-Kj in het influent bedroeg over de gehele proefperiode gemiddeld 77 mg/l; na filtratie 70 mg/l (standaardafwijking 9 mg/l). In de figuren 3.59 en 3.60 zijn de N-Kj-reductie en de nitriet + nitraat gehalten in de tijd weergegeven. In de kolommen 6 en 8, verblijftijd 0,5 uur, was de N-Kj-verwijdering (N-Kj-%) 20 - 25%. Dit berustte vermoedelijke op vastlegging van stikstof in de biomassa en niet op nitrificatie. De gehalten aan nitriet + nitraat in het effluent bedroegen hoogstens enkele mg/l. Bij een (gesommeerde) verblijftijd van 1 uur vond tot dag 70 ook geen nitrificatie plaats. Daarna kwam de nitrificatie langzaam op gang. Bij stopzetting van de proef werd een N-Kjeldahl-verwijdering van 60 - 80% gemeten. De duur van deze proef was echter te kort om tot een stabiele nitrificatie te komen.

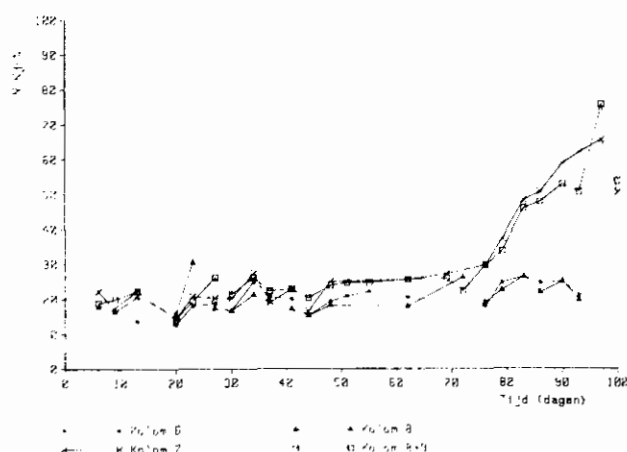


Fig. 3.59 N-Kj-reductie

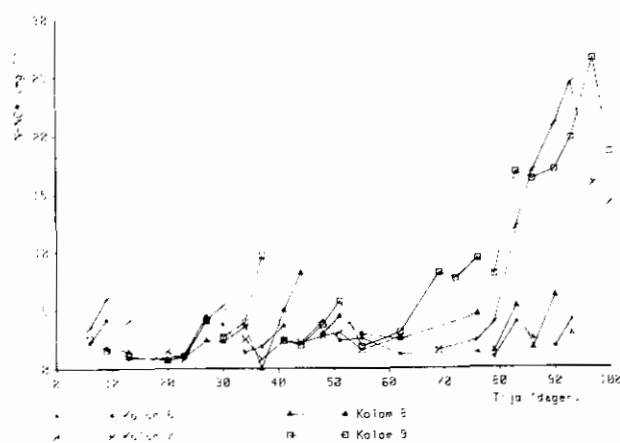


Fig. 3.60 Gehalten van nitriet + nitraat in effluent

3.4.5 Conclusies serie 4

In het verloop van de aangroei van de biomassa aan de drager (CZV-biomassa per gram drager of per liter kolominhoud) is een vast stramien te vinden. Na een min of meer lineaire toename in de "periode van regelmatige aangroei" komt vrij abrupt een minder stabiele situatie waarbij het CZV-biomassa vrij sterk schommelt.

De aangroeisnelheden in de periode van lineaire aangroei lagen op een gelijk niveau als bij vorige proeven ($t = 0,5$ uur: 470 mg CZV-biomassa/l kolominhoud per dag en bij $t = 1$ uur 340 mg CZV-biomassa/l kolominhoud per dag). De concentratie aan biomassa was maximaal 30 g CZV-biomassa/l (= circa 30 g droge stof/l).

In dit experiment op 25 l schaal was de dragerconcentratie aanvankelijk al hoger dan bij de proeven in de 2 l kolommen. Daarnaast kon door geringere verliezen aan dragermateriaal ($< 0,5\%$ per dag) het gehalte aan drager bijna twee maal hoger gehouden worden. Hierbij was de biomassa door de hogere dragerconcentratie verdeeld over meer korrels, de dikte van de biolaag was hier dus geringer.

De maximale filmdikte, de biomassa was vaak niet-concentrisch aangegroeid, bedroeg ca 200 μm . Na de aangroeiperiode was de filmdikte in de regel ca 50-100 μm .

De CZV-volumebelasting bij een verblijftijd van 0,5 uur bedroeg 30 kg CZV/m³·dag en bij 1 uur 15 kg CZV/m³·dag.

De CZV-verwijdering was na de periode van regelmatige aangroei bij 0,5 uur verblijftijd (kolommen 6 en 8) gemiddeld 66% en bij een totale verblijftijd van 1 uur (kolommen 7 en 9) gemiddeld 80%.

De CZV-waarden van het effluent (na filtreren) waren daarbij respectievelijk 210 en 135 mg/l. Dat een beter zuiveringsrendement mogelijk is, werd in de kolommen 6 en 8 aangetoond. Na een sterke daling van de hoeveelheid biomassa aan drager nam de CZV-verwijdering toe tot 75% (CZV-effluent-F < 150 mg/l). De specifieke slibactiviteit, verwijdering van (opgelost) CZV per hoeveelheid biomassa per dag liep hierbij op van 0,6 tot 1,5 kg CZV/kg CZV-biomassa per dag. Voor het zuiveringsrendement lijkt een hoge biomassaconcentratie bij een hoog gehalte aan drager optimaal te zijn. De CZV-verwijdering berust voornamelijk op afbraak van opgelost CZV. Er vond nauwelijks een verandering van de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal plaats. Over de aard van het gesuspendeerde CZV in het effluent is nog weinig bekend.

In de kolommen 6 en 8 (verblijftijd 0,5 uur) was de N-Kj-verwijdering 20 - 25%. Dit berustte op vastlegging en niet op nitrificatie. In de kolommen 7 en 9 (totale verblijftijd= 1 uur) kwam de nitrificatie pas na dag 70 langzaam op gang. Bij stopzetting van de proef werd een N-Kjeldahl-verwijdering van 60 - 80% gemeten. Voor studie van nitrificatie bij hoge CZV-belasting en korte verblijftijd is een lange proefduur nodig (> 100 dagen).

De kolommen 6 en 8 hadden beide een hydraulische verblijftijd van 0,5 uur. De dupliceerbaarheid van de resultaten van deze kolommen was bijzonder goed. Kolom 7 en de combinatie van de kolommen 8 en 9 hadden ook een gelijke hydraulische verblijftijd. In aangroei van biomassa waren er natuurlijk duidelijke verschillen, maar het zuiveringsrendement (zowel CZV-reductie als N-Kj-reductie) kwamen sterk overeen.

4. BIOFILMVORMING IN EEN AIRLIFTREACTOR

4.1 MICROSCOPISCH ONDERZOEK

In deze paragraaf zullen de microscopische waarnemingen worden besproken. Om deze beter te kunnen begrijpen, moet echter eerst in meer algemene zin iets over hechting van microorganismen aan een vast oppervlak, en over de eigenschappen van de gebruikte dragermaterialen, worden vermeld.

4.1.1 Hechting van microorganismen aan een vast oppervlak

Alvorens hechting plaats kan vinden moeten de cel en het oppervlak elkaar dicht naderen en/of elkaar daadwerkelijk raken. Dit transport naar elkaar toe is afhankelijk van:

- vloeistofstromingen;
- sedimentatieprocessen;
- chemotaxis (= actieve beweging van een cel naar een plaats met een verhoogde voedselconcentratie);
- Brownbeweging van deeltjes;
- hydrofobiciteit van het celoppervlak.

In een airliftreactor is sprake van een turbulente stroming, waardoor in zo'n systeem vooral de eerste factor bepalend is voor dit initiële contact.

Zodra de cel en het oppervlak elkaar dicht genaderd zijn, ontstaat een ingewikkelde situatie waarbij adhesie (o.a. London van der Waals) en afstotingskrachten (o.a. die tussen gelijk geladen deeltjes) elkaar tegenwerken. Een bespreking van dit krachtenspel valt buiten de reikwijdte van dit rapport. Volstaan wordt met de opmerking dat de resultante van deze, elkaar tegenwerkende krachten bepalend is voor het feit of een cel lang genoeg in de buurt van het oppervlak kan blijven om zich te hechten. Bij deze hechting speelt een verankering via biopolymeren een belangrijke rol. Een zekere ruwheid van het oppervlak bevordert de hechting.

Hechting zou echter niet plaats kunnen vinden indien de turbulente vloeistofstroming voortdurend langs het vaste oppervlak zou "schuren". Het initiële contact zou dan weer direct verbroken worden. Het laagje water dicht om de korrel is echter min of meer in rust (laminare laag). Hetzelfde geldt uiteraard voor het water aanwezig in poriën. De dikte van de laminare laag

neemt toe naarmate het oppervlak van de vaste fase ruwer is. Een lagere turbulentie bij een lager luchtdebiet in een airliftreactor gaat ook gepaard met een dikkere laminaire laag.

In een airliftreactor wordt lucht doorgeblazen ten einde:

- sedimentatie van deeltjes te voorkomen.
- de zuurstofconcentratie in de vloeistof hoog te houden.

Bij de start van de experimenten werd het toegepaste luchtdebiet vooral bepaald door deeltjessedimentatie. Na de ontwikkeling van een biofilm moest om in de O_2 -vraag te voorzien vrijwel steeds meer lucht doorgeblazen worden dan nodig was om sedimentatie van deeltjes te voorkomen.

Een evaluatie van de eigenschappen van de dragermaterialen, in relatie tot hetgeen hiervoor is vermeld over hechting aan een vast oppervlak, leert dat:

- puimsteen en elektrografiet zeer goede hechtingsmogelijkheden lijken te bieden door het grote aantal beschutte plaatsen (poriën e.d.);
- lava nauwelijks poriën bevat, maar wel een uitgesproken ruw oppervlak heeft, waardoor hechting ook wordt bevorderd;
- zilverzand en biogrog weinig poriën bevatten, terwijl het oppervlak slechts lokaal als "ruw" kan worden gekarakteriseerd; biogrog is echter wel wat ruwer dan zilverzand;
- zirkoonzand nauwelijks hechtingsmogelijkheden biedt. Bovendien is dit materiaal veel zwaarder, waardoor aanmerkelijk sterker belucht moet worden om de deeltjes in beweging te houden. Deze grote dichtheid kan, mits hechting plaatsvindt, echter ook een voordeel betekenen omdat hierdoor de bezinkeigenschappen beter zullen zijn dan die van lichter materiaal.

4.1.2 Hechting en biofilmvorming tijdens de diverse experimenten

In tabel 4.1 wordt een globale karakterisering van de biofilmontwikkeling gegeven in relatie tot enkele procesparameters. Kwantitatieve aspecten van de biofilmvorming worden in paragraaf 4.2 besproken. In de tabel is het beschikbare hechtingsoppervlakte vermeld. Dit is berekend op basis van de diameter van de deeltjes en onder de aanname dat deze bolvormig zijn. Vooral bij sterk poreuze materialen zal het werkelijke oppervlak veel groter zijn dan het berekende. De tabel toont dat bij de diverse experimenten sprake is geweest van aanmerkelijke verschillen in biofilmvorming (zowel qua snelheid als qua vorm van de film).

Tabel 4.1 Karakterisering van de biofilmontwikkeling tijdens de uitgevoerde experimenten

Onderzoek	Seizoen	Drager	Oppervlakte ¹⁾ (m ² /m ³)	Verblijf- tijd (uur)	Begroeiing drager tijdens filmontwikkeling		
					snelheid ²⁾	uniform op alle korrels	aangroei concen- trisch
Vooronderzoek - experiment 1	zomer- voorjaar	zilverzand	ca. 2000	0,4	ca. 2	ja	ja
Vooronderzoek - experiment 2	voorjaar- zomer	zilverzand	ca. 3200	0,5	4-6	ja	ja
			ca. 3200	0,8	6-8	neen	alleen op korrels met
			ca. 3200	1,6	6-8	neen	dikke film
Serie 1	zomer	zilverzand	2000	0,5	2	ja	ja
		zirkoonzand	2000	0,5	"nihil"	-	-
		biogrog	2000	0,5	2	ja	ja
		puimsteen	> 2000	0,5	1	vlokvorming	
		elektrograf.	> 2000	0,5	1	ja	ja
Serie 2	najaar	zilverzand	2000	1	zeer traag	neen	neen
		biogrog	2000	1	ca. 5	neen	neen
		"	2000	1	ca. 5	neen	neen
		puimsteen	> 2000	1	ca. 5	ja	ja
		puimsteen	> 2000	1	ca. 5	ja	ja
Serie 3	winter	lava	2000	0,5	5-6	neen	neen
		puimsteen	> 2000	0,5	5-6	neen	ja
		lava ³⁾	2000	0,5	eerst traag, na week 7 zeer snel		
		puimsteen ³⁾	> 2000	0,5	5-6	ja	ja
Serie 4	voorjaar- zomer	puimsteen	> 4000	0,5	7	neen	soms
		"	> 4000	1	9	neen	"
		"	> 4000	0,5	7	neen	"
		" 4)	> 4000	0,5	>12	ja	-

1) Beschikbaar voor hechting bij de start van de proef.

2) Tijdsduur (in weken) tot een soort "evenwichtssituatie" is ontstaan.

3) Temperatuursverhoging tot 15°C.

4) In serie geschakeld (2e trap).

De filmvorming lijkt vooral beïnvloed te worden door:

- de verblijftijd van het afvalwater (= de belasting van de kolom);
- de aard van het dragermateriaal;
- het totaal beschikbare hechtingsoppervlak;
- de temperatuur;
- de aanwezigheid van draadvormige microorganismen (zie paragraaf 4.1.4).

Serie 1

Bij serie 1 werd gewerkt met een korte verblijftijd van het afvalwater en een beschikbaar hechtingsoppervlakte van circa 2000 m²/m³. Bovendien was de temperatuur van het water in deze perioden hoog (19-21°C). Deze combinatie van factoren leidde tot een zeer snelle biofilmvorming op 4 van de 5 gebruikte dragermaterialen.

Binnen 1-2 weken waren op de meeste korrels concentrische biofilmen met een dikte van 50 - 200 µm aanwezig (concentrisch wil zeggen dat de korrel rondom begroeid is zoals b.v. in de figuren 4.12 en 4.13). Deze waarneming kwam overeen met hetgeen tijdens het vooronderzoek regelmatig werd vastgesteld. Overigens werd deze snelle filmvorming direct gevolgd door een massale groei van draadvormende organismen en/of het "aan elkaar plakken" van de korrels, waardoor alle kolommen leeg spoelden. Op dit soort problemen zal in de paragrafen 4.1.4 en 4.1.5 nog nader worden ingegaan.

De biofilmvorming werd tijdens dit experiment ook met een raster-elektronen-microscoop (= REM) gevolgd. De filmvorming startte met hechting van staafvormige cellen op het oppervlak, en aan elkaar. In de figuren 4.1 en 4.2 worden hiervan enkele voorbeelden gegeven. De op deze foto's zichtbare draadjes zijn waarschijnlijk niet reëel, maar vormen de restanten van volumieuze, sterk waterbindende slijmstoffen. Dit water wordt tijdens de voorbehandeling voor de REM stapsgewijs onttrokken, waarna dit soort draadjes overblijft. De korrel uit figuur 4.2 zal in werkelijkheid dus waarschijnlijk bedekt zijn geweest met een slijmachtige laag waarin cellen ingebed waren. Na het ontstaan van deze primaire hechtingslaag vond een verdere ontwikkeling van de biofilm vooral plaats via deling van cellen. Binnen enkele dagen was de film zo dik, dat het oppervlak van de drager niet meer kon worden waargenomen. Deze secundaire laag begon zeer plaatselijk (zie figuur 4.3), maar verspreidde zich daarna snel over het totale oppervlak. Ook in deze laag waren de cellen via hechtstoffen aan elkaar verankerd.

De morfologische kenmerken van de in de biofilmen aanwezige cellen suggererden een lage diversiteit. In eerste instantie konden voornamelijk staafvormige cellen worden waargenomen, na verloop van tijd ook draadvormende organismen (zie figuur 4.4).

Met het REM-onderzoek kon tevens worden bevestigd, dat de hechting bij dit experiment zeer gemakkelijk plaats vond. Oorspronkelijk werd verwacht dat aangroei in eerste instantie vooral op beschutte plaatsen (poriën e.d.) zou starten. Deze veronderstelling kon echter niet worden bevestigd. Er was nauwelijks sprake van een preferente groei op beschutte plaatsen. In figuur 4.5 is duidelijk te zien dat bij puimsteen boven op de richels al een plaatsgewijze aangroei aanwezig was, terwijl de sleuven en poriën nog lang niet waren dichtgegroeid. Ook gladde oppervlakken werden snel gekoloniseerd (figuur 4.6).

Zirkoonzand was bij deze proefserie de enige drager waarop geen biofilmvorming plaatsvond. Aangezien het luchtdebiet in deze kolom zeven maal zo hoog was als in de andere kolommen (1400 l/uur in plaats van ca. 200 l/uur) moet dit ontbreken van aangroei vrijwel zeker worden toegeschreven aan de grote turbulentie in het systeem. In de andere kolommen raakten ook de gladde oppervlakken vrij snel begroeid. Overigens werd bij het zirkoonzand wel hechting waargenomen in de schaarse poriën.

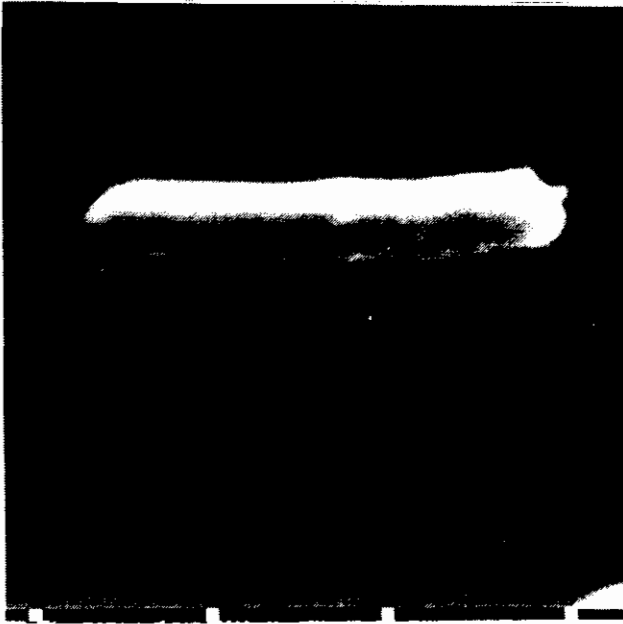


Fig. 4.1



Fig. 4.2



Fig. 4.3



Fig. 4.4

Fig. 4.1 Hechting van een staafvormige cel via biopolymeren (20000 x).

Fig. 4.2 Hechting van cellen op het oppervlak en aan elkaar (7000 x).

Fig. 4.3 Plaatselijke start van de tweede fase van biofilmvorming (2100 x).

Fig. 4.4 Ontwikkeling van draadvormende organismen (3500 x).

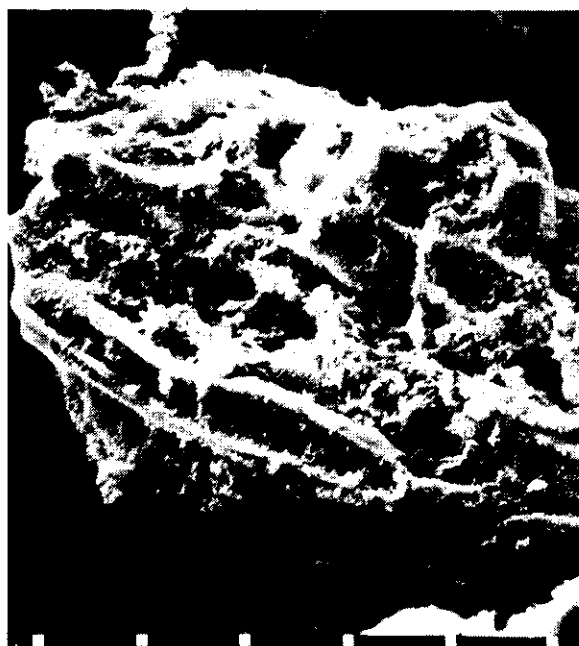


Fig. 4.5



Fig. 4.6

Fig. 4.5 Groei op richels voordat de poriën zijn dichtgegroeid (450 x).

Fig. 4.6 Gladde oppervlakken waren na 4 dagen vaak al volledig bedekt (1000x).

Serie 2

Dit experiment is uitgevoerd in het najaar van 1985, bij een watertemperatuur die in de loop van het experiment daalde van 18°C tot 13-15°C. De verblijftijd van het afvalwater in de kolommen werd ten opzichte van die in het vorige experiment verdubbeld tot 1 uur. Het korrelvolume aan dragermateriaal bedroeg 8%, maar omdat grotere korrels werden gebruikt (diameter 0,2-0,3 mm, in plaats van 0,1-0,2 mm) was het beschikbare hechtingsoppervlak vergelijkbaar met dat tijdens de eerste proefserie. Qua luchtdebiet was er ook geen wezenlijk verschil tussen beide proefseries.

Deze combinatie leidde tot een aanmerkelijk lagere snelheid van filmvorming. Bovendien bleek dat de filmvorming nu ook beïnvloed werd door de aard van het dragermateriaal. In de kolommen met biogrog en puimsteen duurde het circa 5 weken voordat een soort evenwichtssituatie werd bereikt. De zeer poreuze puimsteenkorrels waren na deze aangroeiperiode vrijwel allemaal omgeven door een concentrische film met een dikte van 50-150 µm. In de

kolommen met het veel minder poreuze biogrog als dragermateriaal was daarentegen sprake van een veel heterogener (zie figuur 4.15) aangroepatroon. Op circa 5% van de korrels vormde zich vrij snel een zeer dikke film (dikte: 200-300 μm). Ongeveer 50% van de korrels was na 5 weken echter nog vrijwel kaal. Op de overige korrels werd een dikke, niet-concentrische film gevormd. Op het verschijnsel van een niet-concentrische begroeiing van de drager (zie figuren 4.14 en 4.21) wordt bij de bespreking van serie 4 nader ingegaan. De aangroei op zilverzand (glad oppervlak; weinig poriën) bleef ver achter bij die op de andere dragermaterialen. Op een klein deel (< 5%) vormde zich een zeer dikke film. Op de overige korrels bleef de aangroei beperkt tot een dunne, locale aangroei. Overigens werd bij deze proef ook vastgesteld dat de filmvorming goed reproduceerbaar was (een goede overeenstemming tussen de duplo series met biogrog en puimsteen).

Een verdubbeling van de verblijftijd van het water in de kolom heeft dus tot gevolg dat de filmvorming aanmerkelijk trager verloopt. Een verdubbeling van de verblijftijd betekent een halvering van de volumebelasting. Dit lijkt een logische verklaring voor de veel geringere aangroeisnelheid. Het is echter de vraag of de verklaring zo eenvoudig is. Uit de effluentanalyses bleek dat vooral in de beginperiode slechts een deel van het beschikbare substraat werd opgenomen. Dit betekende dat in feite sprake was van een overmaat aan substraat, waardoor een halvering van de belasting niet leidde tot een situatie waarin de hoeveelheid voedsel de groei-limiterende factor vormde. Mogelijk speelde de wat lagere temperatuur ook nog een rol.

Daarnaast moet natuurlijk niet uit het oog worden verloren dat een langere vloeistofverblijftijd het selectieproces binnen een gemengde populatie kan beïnvloeden.

Uit het onderzoek bij Gist-brocades is gebleken [2,3] dat biolagen alleen worden verkregen bij een korte vloeistofverblijftijd τ , waarvoor geldt $\tau < \frac{1}{\mu_{\text{max}}}$; μ_{max} is de maximale groeisnelheid van de microorganismen in de reactor. De reden voor deze dwingende voorwaarde wordt gezocht in de enzymatische hydrolyse van de hechtingspolymeren en dus vernietiging van de biolaag, door niet-hechtende microorganismen, welke zich bij een verblijftijd $\tau < \frac{1}{\mu_{\text{max}}}$ ontwikkelen. Bij $\tau < \frac{1}{\mu_{\text{max}}}$ kan de biolaag zich ongestoord ontwikkelen, omdat de niet-hechtende hydrolyserende microorganismen tijdig uit de reactor worden gespoeld. Bij het huidige onderzoek werd niet vastgesteld dat een verlenging van de vloeistofverblijftijd leidde tot het loslaten van de

biofilm. Er kon alleen worden geconcludeerd dat de filmvorming trager verliep. Dit zou kunnen betekenen dat organismen geselecteerd worden die wel hechten, maar trager groeien. Maar ook dat trager groeiende organismen zich door hechting aan drager of door inkapselen in biolaag kunnen handhaven.

Serie 3

Bij dit experiment werd de verblijftijd van het water in de kolommen weer teruggebracht tot 0,5 uur (dus gelijk aan serie 1). Het beschikbare hechtingsoppervlak en het luchtdebiet waren vergelijkbaar met de omstandigheden tijdens de vorige experimenten. Serie 3 werd echter uitgevoerd in een winterperiode, waardoor de watertemperatuur in de kolommen veel lager was dan tijdens serie 1 (10-12°C, respectievelijk 19-21°C). Na enkele weken werd in 2 van de 4 kolommen de temperatuur (kunstmatig) verhoogd tot ca. 15°C. Aan het einde van de proefperiode steeg, door het oplopen van de temperatuur in het voorjaar, de temperatuur in de kolommen zonder temperatuursregeling tot 15°C; in de andere kolommen tot ca. 18°C.

Bij deze combinatie van factoren verliep de biofilmvorming traag. De ontwikkeling van de film duurde 5-6 weken. Ook bij het vooronderzoek, experiment 2, werd vastgesteld dat de filmvorming gedurende een winterperiode, ondanks een korte verblijftijd van het afvalwater, traag verliep. De systeemtemperatuur heeft kennelijk een grote invloed op de biofilmvorming.

De tijdelijk toegepaste temperatuurverhoging (tot 15°C) in twee van de vier kolommen had in de kolom met puimsteen een zwak positief effect, de filmvorming in de kolom met lava als dragermateriaal stagneerde echter vrijwel volledig. Een duidelijke verklaring voor dit verschijnsel kan niet worden gegeven. Overigens was het wel opvallend dat juist in deze kolom, waarin een duidelijke film in feite ontbrak, na circa 7 weken "opeens" een explosieve ontwikkeling van de biofilm plaatsvond. De systeemtemperatuur was intussen opgelopen tot ruim 18°C, waardoor de omstandigheden vergelijkbaar waren geworden met die tijdens serie 1. Ook bij serie 1 verliep de filmvorming zeer snel! In de overige kolommen, waarin de meeste korrels al omgeven waren door een dikke film, vond deze explosieve groei niet plaats. Kennelijk werkt de aanwezigheid van een film stabiliserend.

Ook bij dit experiment kon een zekere invloed van de kwaliteit van het dragermateriaal op de biofilmvorming worden vastgesteld. In de kolom met puimsteen en temperatuurregeling was sprake van een uniforme aangroei van de

korrels waarbij concentrische biofilmen werden gevormd met een dikte van 50 - 180 μm . In de kolom zonder temperatuurregeling werden wel concentrische filmen op puimsteen gevormd, maar waren wat meer korrels met dunne filmen aanwezig. Tegen het einde van de proefperiode was het verschil tussen beide kolommen overigens zeer gering.

In de kolom met lava als drager en zonder temperatuurregeling verliep de filmvorming duidelijk minder uniform. In eerste instantie was wel sprake van een concentrische filmvorming. Alle "hoeken en gaten" groeiden dicht, waardoor de hoekige korrels een rond uiterlijk kregen. Deze situatie heeft slechts circa 10 dagen geduurd. Daarna ontstond een veel heterogener beeld. Op ongeveer 30% van de korrels werd een dikke, niet-concentrische film gevormd (figuur 4.21). De dikte van deze film was circa 250 μm . Op 30% van de korrels verdween de al gevormde biofilm vrijwel volledig, om de overige korrels waren diverse aangroeiastadia aanwezig. In de loop van de tijd werd het percentage korrels met een dikke, niet-concentrische film overigens wel steeds groter.

Serie 4

Het experiment met de 25 l kolommen is uitgevoerd in de periode maart-juni 1986. In deze periode steeg de systeemtemperatuur langzaam van 12°C tot 22°C. Er werd een tweetal vloeistofverblijftijden toegepast (in de kolommen 6, 8 en 9: 0,5 uur; in kolom 7: 1 uur), bovendien waren 2 kolommen (8 en 9) met ieder een half uur verblijftijd in serie geschakeld. Door een misverstand is bij de start teveel dragermateriaal (puimsteen) toegevoegd, waardoor het beschikbare hechtingsoppervlakte ruim tweemaal zo groot was als bij de overige experimenten. De superficiële luchtsnelheid was van dezelfde orde van grootte als bij de andere series.

De ontwikkeling van de biofilm werd bij dit experiment zowel met lichtmicroscopie als met raster-elektronenmicroscopie gevolgd (alleen kolommen 6 en 9).

De colonisering van de korrels begon met hechting, gevolgd door groei, van staafvormige cellen op beschutte plaatsen (gaten en spleten in de korrels). Dit proces verliep zeer snel. Na 8 dagen was op het dragermateriaal uit de kolommen 6 en 9 in vrijwel alle beschutte plaatsen een duidelijke aangroei waarneembaar (figuur 4.8). Veel van deze gaten en spleten leken al voor een belangrijk gedeelte te zijn volgegroeid. Deze primaire hechtingsfase kon met

een stereomicroscop overigens nauwelijks worden waargenomen; de mate van aangroei was daarvoor nog te gering. Na één maand was de groei nog niet veel verder gevorderd (figuur 4.9).

Op gladde, niet-beschutte plaatsen vond praktisch geen hechting plaats (figuur 4.11). Er was dus sprake van een duidelijk ander hechtingspatroon dan bij de eerste serie.

De verdere kolonisering van het oppervlak vond vanaf deze primaire hechtingspunten plaats. Het is niet helemaal duidelijk op welke manier dit gebeurde. Oorspronkelijk werd gedacht dat de groei vanaf de beschutte plaatsen voornamelijk verder zou gaan via "uitgroei" over de randen (zie figuur 4.7A). Dit zou dan na verloop van tijd vrijwel automatisch leiden tot een gesloten, concentrische film rond het dragermateriaal, zoals dit bij vrijwel alle experimenten met puimsteen werd waargenomen. Er is echter ook nog een tweede mechanisme mogelijk. Hierbij gaat de aangroei niet verder via uitgroei over de rand, maar worden "klompjes" biomassa gevormd pal boven de primaire hechtingsplaatsen (figuur 4.7B). Op deze wijze worden weer nieuwe beschutte plaatsen gecreëerd, waar vervolgens weer hechting plaats kan vinden. Dit kan leiden tot een niet-concentrische begroeiing van de korrel (zie figuur 4.7C en 4.10). Zowel min of meer gesloten biofilmen als deze niet-concentrische groei (soms 100 à 200 μm dik) werden na verloop van tijd veelvuldig waargenomen bij de vierde serie.

De biofilmvorming bij de vierde serie vorderde aanmerkelijk trager dan werd verwacht. In de kolommen 6 en 8 duurde het, ondanks de korte vloeistofverblijftijd circa 30 dagen voordat een dunne film (dikte: 10-20 μm) aanwezig was. Overigens vertoonden beide kolommen, ook in het verdere verloop van de experimenten, een vrijwel identiek aangroeipatroon. Bij 1 uur verblijftijd (kolom 7) verliep de filmvorming nauwelijks trager. Alleen in kolom 9 (in serie met 8) bleef de aangroei ver achter bij die in de overige kolommen.

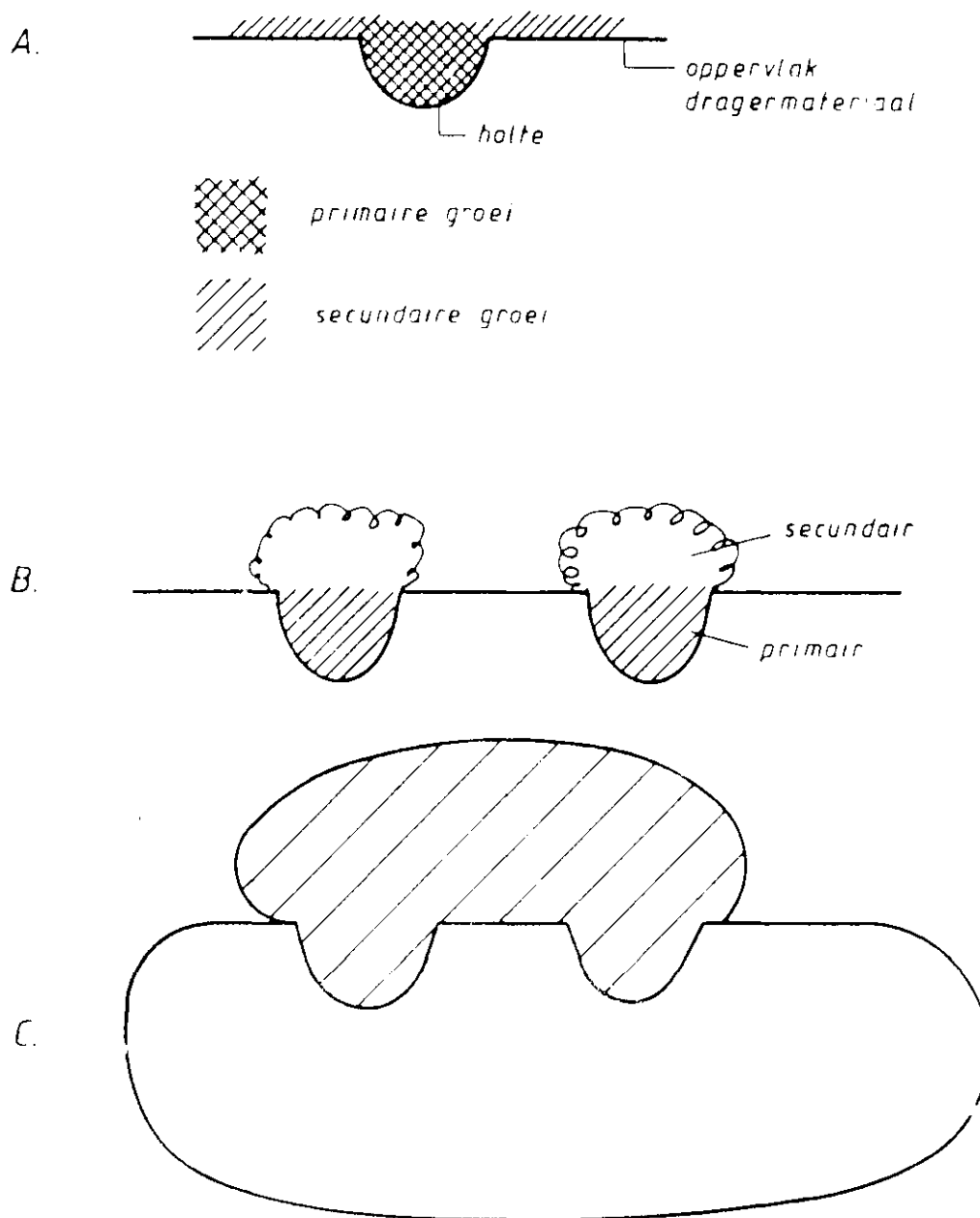


Fig. 4.7 Schematische weergave van het ontstaan van een niet-concentrische film.

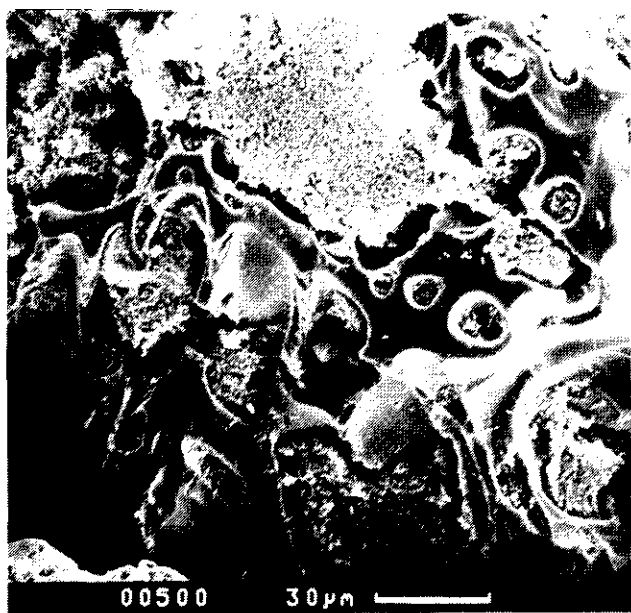


Fig. 4.8

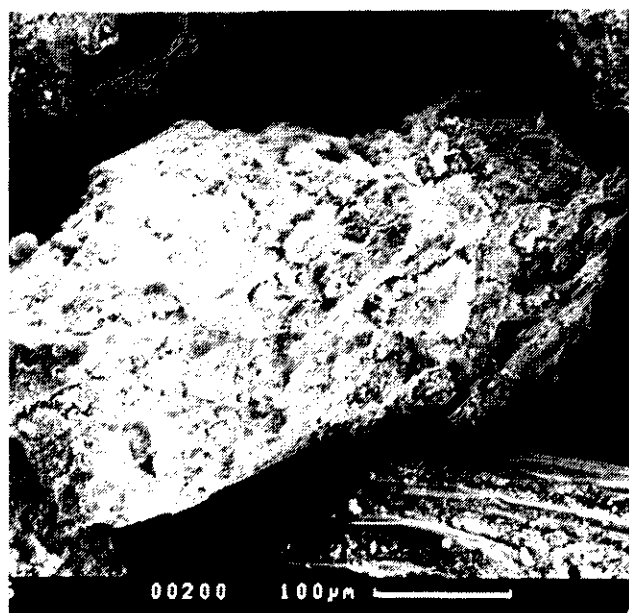


Fig. 4.9



Fig. 4.10

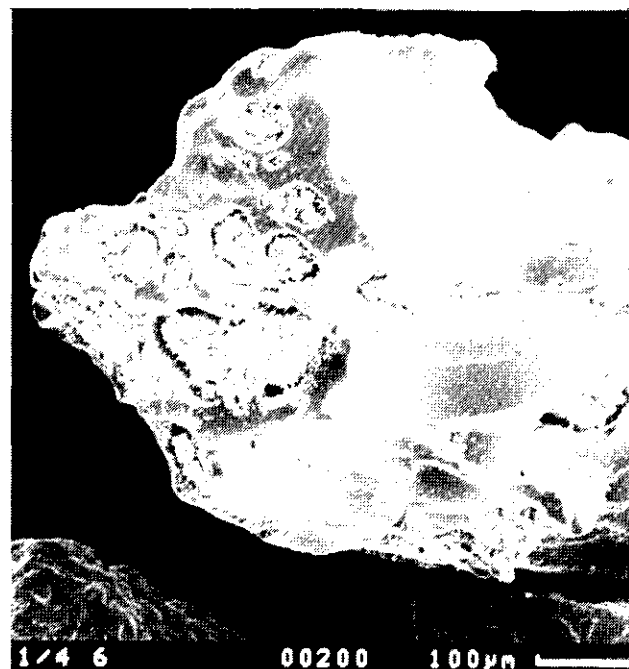


Fig. 4.11

Fig. 4.8 Voornamelijk groei op beschutte plaatsen (500x).

Fig. 4.9 Alle poriën groeien volledig dicht (200x).

Fig. 4.10 Niet-concentrische begroeiing van een korrel puimsteen (150x).

Fig. 4.11 De aangroei bij een lage belasting blijft beperkt tot groei op beschutte plaatsen (1700x).

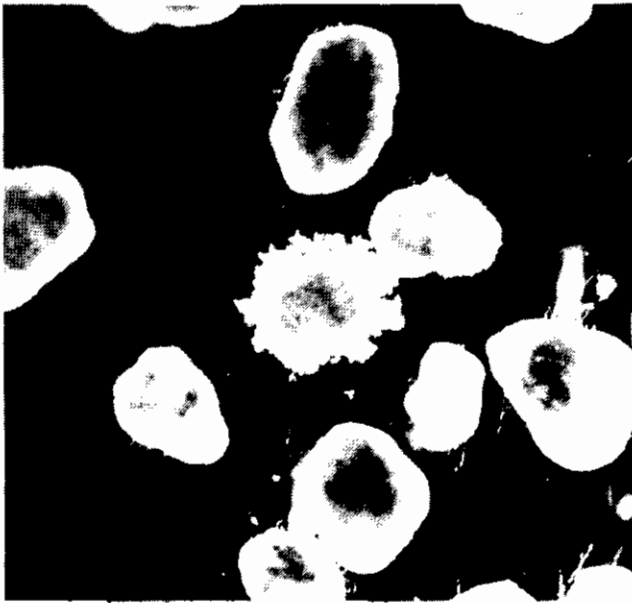


Fig. 4.12

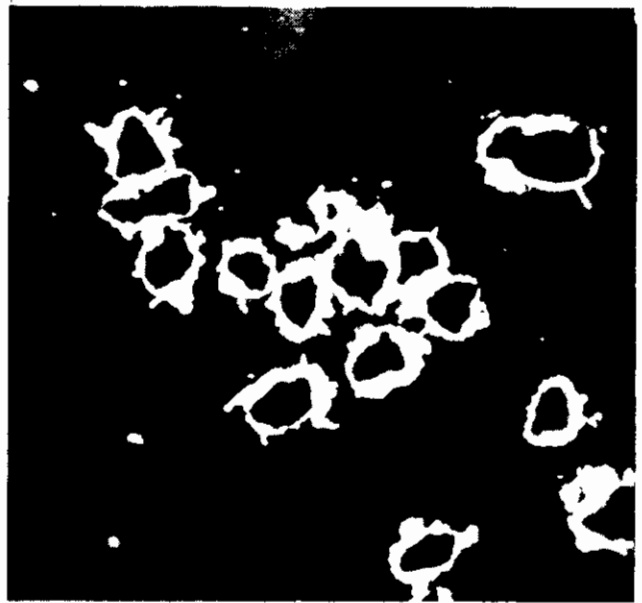


Fig. 4.13

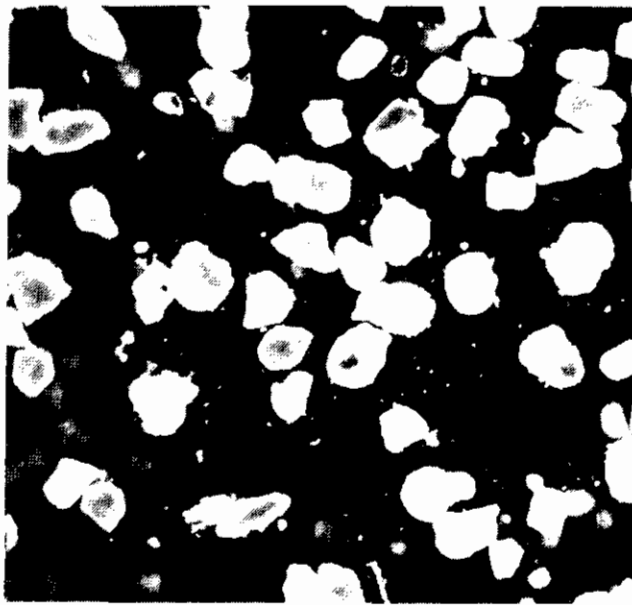


Fig. 4.14

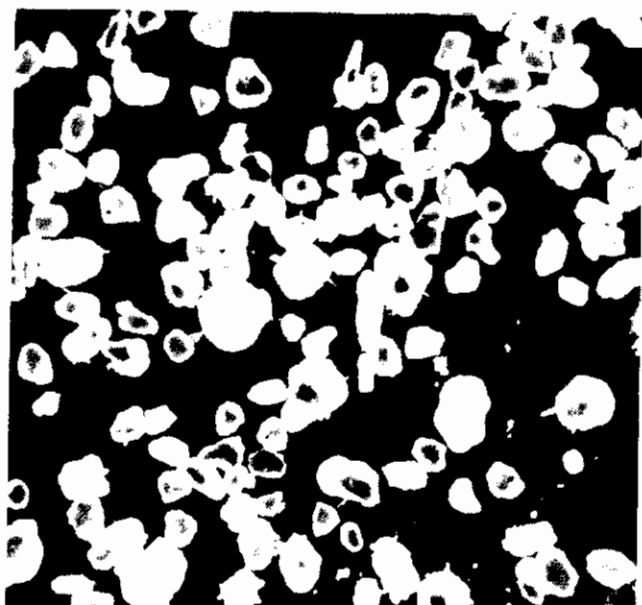


Fig. 4.15

MORFOLOGISCHE VERSCHILLEN IN BIOFILMVORMING

- Fig. 4.12 Concentrisch begroeide puimsteenkorrels (30x). De centraal gelegen korrel is omgeven door sessiele ciliaten.
- Fig. 4.13 Concentrisch begroeide korrels lava (40x).
- Fig. 4.14 Voornamelijk niet-concentrisch begroeide korrels biogrog (20x).
- Fig. 4.15 Geen uniforme begroeiing van de korrels (15x).

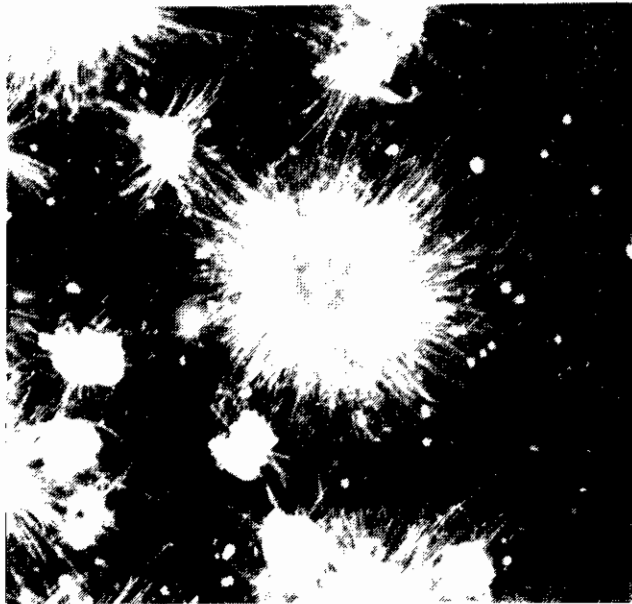


Fig. 4.16



Fig. 4.17

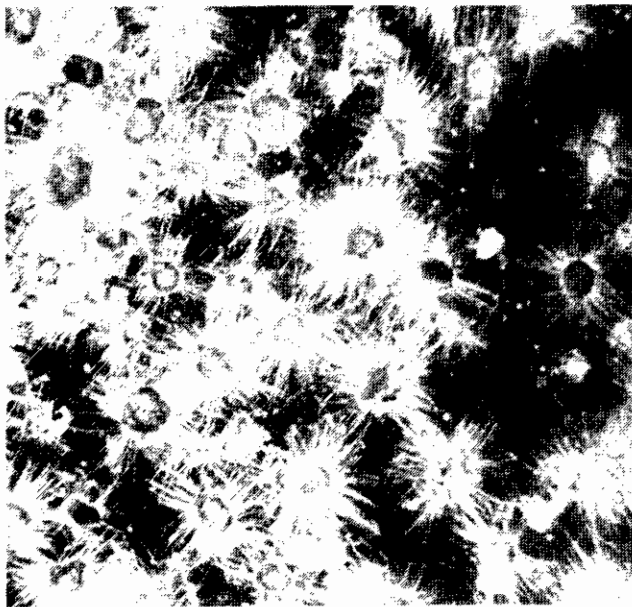


Fig. 4.18

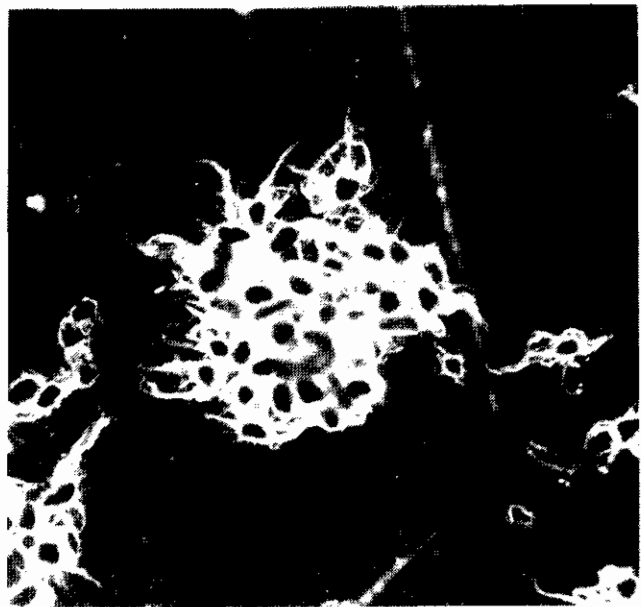


Fig. 4.19

DRAADVORMING EN AGGREGATIE

- Fig. 4.16 De begroeide korrel zilverzand is omgeven door een mantel van *Thiothrix* draden (30x).
- Fig. 4.17 Aangroei van de draden leidt tot de vorming van "pluizebollen" (30x).
- Fig. 4.18 De aanwezige draden verhinderen een dichte stapeling van de korrels (15x).
- Fig. 4.19 Een aggregaat van begroeide korrels (10x).



Fig. 4.20



Fig. 4.21



Fig. 4.22



Fig. 4.23

Fig. 4.20 Thiobacillus thiooxidans draden op concentrisch begroeide korrels zilverzand (30x).

Fig. 4.21 Niet-concentrische filmvorming op lava (80x).

Fig. 4.22 Vlokvorming verhindert de groei van een biofilm.

Fig. 4.23 Protozoën tussen Thiobacillus thiooxidans draden (110x).



Fig. 4.24

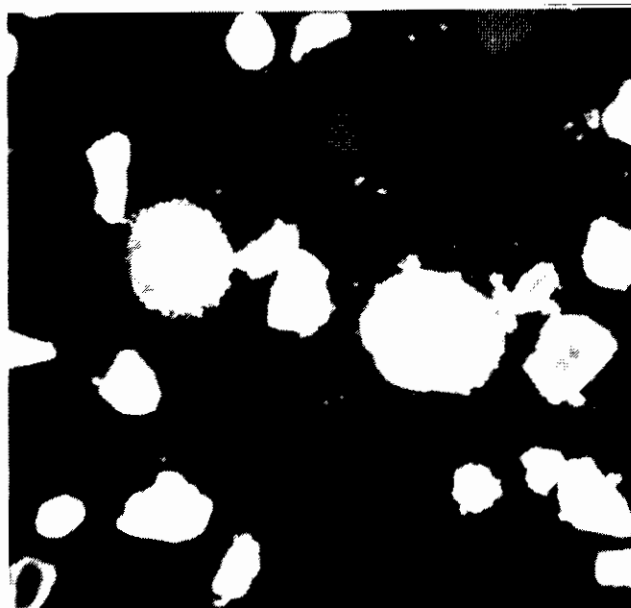


Fig. 4.25



Fig. 4.26

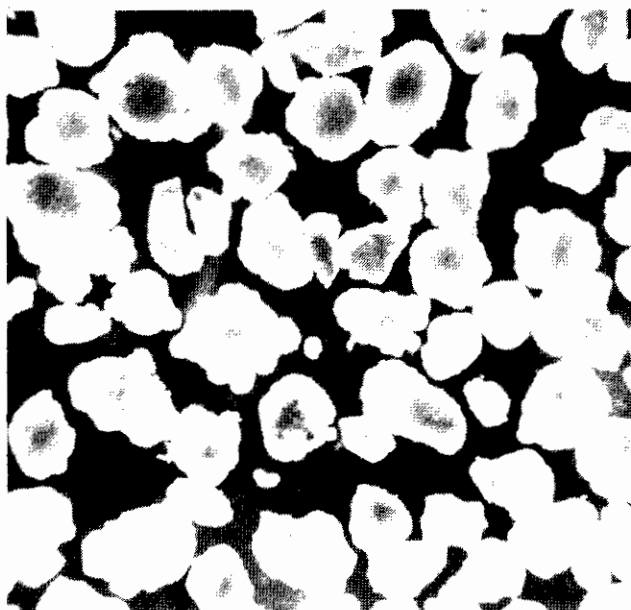


Fig. 4.27

SIGNALEN VOOR EEN INSTABIELE SITUATIE

- Fig. 4.24 Grote uitstulpsels rond concentrisch begroeide zilverzandkorrels (125x).
- Fig. 4.25 Concentrische bacteriekolonies rond overigens nog nauwelijks begroeide korrels biogrog (40x).
- Fig. 4.26 Kolonisering door vrijwel transparante kolonies (30x).
- Fig. 4.27 Ronde uitstulpsels rond al begroeide korrels (15x).

Rond dag 40 waren in de kolommen 6 t/m 8 op 50% van de korrels dikke bio-filmen (vaak niet-concentrisch) aanwezig, op de overige korrels was sprake van een aanmerkelijke variatie in de mate van aangroei. Deze situatie, waarbij sprake was van een sterke heterogeniteit voor wat de mate van aangroei betrof, is tijdens de verdere duur van de experimenten niet meer wezenlijk veranderd. Kolom 7 bleef in eerste instantie nog wat achter bij 6 en 8, maar in een later stadium werden deze verschillen erg klein. In kolom 9 (in serie met 8) is de biofilmvorming steeds aanzienlijk achtergebleven bij de groei in 6 t/m 8. In feite is de aangroei in deze kolom niet verder gekomen dan hechting op beschutte plaatsen. Bij de hier verder niet besproken serie 5 (ook kolommen in serie) werd hetzelfde vastgesteld.

Het resultaat van deze proef lijkt in sterke mate beïnvloed te zijn door het min of meer "toevallige" gegeven van een aanmerkelijk verhoogd gehalte aan dragermateriaal en de lage systeemtemperatuur tijdens de eerste 5 weken. Er werd verwacht, uitgaande van de resultaten van vroegere experimenten, dat een korte vloeistofverblijftijd zou leiden tot een snelle ontwikkeling van een biofilm om vrijwel alle korrels. Dit gebeurde echter niet; in feite was slechts sprake van een marginaal verschil in filmontwikkeling op de korrels in de kolommen met een waterverblijftijd van 0,5 respectievelijk 1,0 uur. Dit kan eigenlijk alleen maar verklaard worden uit het aanmerkelijk groter beschikbare hechtingsoppervlakte bij serie 4 en de tijdelijk nogal lage temperatuur.

Evaluatie

Een tussentijdse evaluatie van de in deze paragraaf gepresenteerde informatie leidt tot een aantal hypothesen. Er wordt met opzet gesproken van hypothesen, omdat de geformuleerde veronderstellingen ten dele nog nader getoetst moeten worden.

De biofilmvorming lijkt vooral beïnvloed te worden door:

- de vloeistofverblijftijd in de reactor, c.q. de toegepaste volumebelasting;
- de systeemtemperatuur;
- de hoeveelheid dragermateriaal; c.q. het totaal beschikbare hechtingsoppervlak;
- de porositeit en/of ruwheid van het dragermateriaal.

Vooral de eerstgenoemde drie parameters hebben een grote invloed. De combinatie: een lage vloeistofverblijftijd (0,5 uur) + een relatief hoge temperatuur (15-20°C) + een relatief klein hechtingsoppervlakte^{*)}, leidt vrijwel zeker tot een explosieve ontwikkeling van de biofilm op schoon dragermateriaal. De initiële hechting start niet alleen op beschutte plaatsen, maar ook op gladde "buitenoppervlakken" van de korrels. Dit betekent dat onder deze omstandigheden de porositeit en/of ruwheid van het dragermateriaal nauwelijks een rol spelen. Er is een aanwijzing dat deze explosieve ontwikkeling, die het systeem zeer moeilijk hanteerbaar maakt, voorkomen kan worden door een kolom niet met schoon, maar met al begroeid dragermateriaal te starten (enting).

De ontwikkeling van de film verloopt aanmerkelijk trager indien van de hiervoor genoemde combinatie wordt afgeweken. Hierbij lijkt het weinig uit te maken welke parameter veranderd wordt. Zowel een langere vloeistofverblijftijd, als een lagere temperatuur, als een groter beschikbaar hechtingsoppervlakte hebben tot gevolg (zie tabel 4.1) dat de biofilmontwikkeling vertraagd wordt van 1 à 2 weken tot 5 à 7 weken.

Bij een lagere snelheid van biofilmvorming gaat de kwaliteit van het dragermateriaal ook een rol spelen. De filmvorming start dan voornamelijk met hechting van cellen op beschutte plaatsen. Dit betekent dat hechting op poreuze materialen (b.v. puimsteen) nu veel gemakkelijker en veel gelijkmatiger plaats vindt dan op gladde, weinig poreuze korrels (b.v. zilverzand). Dit verklaart de, vrijwel steeds waargenomen, concentrische biofilmvorming op puimsteenkorrels. Op lava, biogrog en (vooral) zilverzand was onder deze omstandigheden steeds sprake van een veel heterogener aangroeipatroon. Er werden gelijktijdig diverse aangroeistadia waargenomen: variërend van nauwelijks begroeide korrels tot korrels bedekt met zeer dikke, veelal niet-concentrische biofilmen. Bovendien werd diverse malen vastgesteld dat, zodra zo'n heterogeen aangroeipatroon ontstaan was, de verschillen in begroeiing in de loop van de tijd eerder groter dan kleiner werden!

Het is op basis van de beschikbare informatie niet mogelijk om dit heterogeen aangroeipatroon volledig te verklaren. Waarom vindt onder "sub-optimale"

*) d.w.z. een hoge specifieke organische belasting in kg CZV/m² drageroppervlakte

groeiomstandigheden geen hechting op gladde oppervlakken plaats? Domineren dan andere microorganismen in de populatie of moet de oorzaak in gewijzigde fysiologische condities (b.v. minder produktie van exopolymeren) van deze cellen worden gezocht? Het antwoord op deze vragen vereist nader onderzoek. De verkregen resultaten kunnen ten dele misschien verklaard worden uit competitie om het beschikbare substraat. Tijdens de initiële hechtingsfase worden de korrels niet gelijkmatig gekoloniseerd. De meest poreuze en/of ruwe fractie wordt preferent gekoloniseerd. De microorganismen zullen uit het beschikbare substraat putten voor groei, waarna de biofilmvorming start. Deze ongelijkmatige start zou binnen korte tijd kunnen leiden tot een situatie waarbij een steeds groter gedeelte van het beschikbare substraat opgenomen wordt door de microorganismen, aanwezig op de preferente hechtingsplaatsen, waarna voor filmontwikkeling op andere plaatsen te weinig voedingsstoffen overblijven. Dit kan tot gevolg hebben dat, zoals enkele malen werd waargenomen, de film op fors begroeide korrels in de loop van de tijd steeds dikker wordt, terwijl de aangroei op de overige korrels in het systeem niet toeneemt of zelfs afkalft.

De verklaring voor de niet-concentrische begroeiing van veel puimsteenkorrels bij het laatste experiment, terwijl dit materiaal bij de overige series vrijwel steeds met een concentrische film werd bedekt, moet in dezelfde richting worden gezocht. Het hoge gehalte aan dragermateriaal bij deze proef had tot gevolg dat ook een veel groter poriënvolume voor groei beschikbaar was. Na het dichtgroeien van deze poriën was al vrij veel biomassa in het systeem aanwezig, waardoor de slibbelasting drastisch was gereduceerd. Er is dan misschien nog slechts een te beperkte hoeveelheid substraat beschikbaar voor een volledige ontwikkeling van de biofilm. Bovendien verkeren de microorganismen in een beginnende niet-concentrische film in beginsel in een gunstige concurrentiepositie. Het substraat lijkt voor deze organismen beter bereikbaar dan voor de organismen in de poriën (aanvoer via diffusie). Tenslotte zou ook een gewijzigd hydrodynamisch gedrag van een aconcentrisch begroeide korrel een rol kunnen spelen. Het lijkt niet uitgesloten dat korrels met een "zware" en een "lichte" kant zich op een bepaalde manier richten in een vloeistofstroom.

4.1.3 Ontbechtingsproeven

In de loop van de experimenten is op diverse wijzen getracht de dikte van de biofilm te reguleren en/of de film volledig te verwijderen. Hierbij werden alleen resultaten geboekt met:

- een verlaging van de (slib)belasting. Dit had tot gevolg dat de filmdikte langzaam afnam. Na verloop van tijd (enkele dagen) ontstonden ook scheuren in de film om sommige korrels, waarna de film los liet. Er werd echter nooit waargenomen dat een verlaging van de belasting het massaal loslaten van de film tot gevolg had. Een herstel van de belasting resulteerde steeds in een snelle toename van de film tot de oorspronkelijke dikte;
- anaërobe periode (10-20 uur). In het vooronderzoek was vastgesteld dat een anaërobe periode tot gevolg had dat een film op zilverzandkorrels vrijwel volledig losliet en uitspoelde. Tijdens een aantal onthechttingsproeven (in serie 2) werd getracht deze waarneming te reproduceren. Hierbij werd vastgesteld dat een periode van anaërobie bruikbaar is om een aanwezige film (vooral dikkere filmen) van zilverzandkorrels te verwijderen. Met biogrog en puimsteen daarentegen werden onvoldoende, respectievelijk geen resultaten geboekt;
- een ultrasone behandeling. Met deze methode werden de filmen om zilverzand en biogrog volledig verwijderd. De filmen om puimsteen lieten echter pas los nadat het dragermateriaal min of meer gefragmenteerd werd!

Deze waarnemingen kunnen goed verklaard worden uit de kwaliteit van het oppervlak van de diverse dragermaterialen. Op de betrekkelijk gladde zilverzandkorrels zijn de biofilmen slechts zwak gebonden. De vraag waarom een anaërobe periode leidt tot het loslaten van de film kan overigens niet beantwoord worden. Biogrog heeft een wat ruwer oppervlak dan zilverzand waardoor de film steviger gebonden is. Op puimsteen tenslotte, is de film min of meer verankerd in de vele poriën en daardoor zeer sterk gebonden.

4.1.4 Groei van draadvormende organismen

Bij een aantal experimenten werden de kolommen na verloop van tijd gekoloniseerd door draadvormende organismen (figuren 4.4, 4.16, 4.17, 4.18 en 4.20). Een massale groei van dit soort organismen heeft tot gevolg dat de

bezinkeigenschappen van de korrels aanmerkelijk verslechteren, en grote verliezen aan begroeide drager kunnen plaatsvinden.

In tabel 4.2 is de mate van draadvorming bij de diverse experimenten weergegeven in relatie tot enkele procesomstandigheden. Hieruit blijkt dat een zeer sterke groei van dit soort organismen alleen plaats vindt bij korte vloeistofverblijftijden (0,5 en 0,8 uur). Dit stemt overeen met hetgeen tijdens het vooronderzoek werd gevonden. Ook daarbij werd vrijwel steeds vastgesteld dat een verblijftijd van 0,4 uur leidde tot een sterke groei van draadvormende organismen. De enige uitzondering betrof een proef tijdens een winterperiode. Oorspronkelijk werd het niet groeien van draadvormende organismen tijdens dat experiment toegeschreven aan het werken met zo "vers" mogelijk influent. De mogelijkheid dat dit verband hield met een temperatuureffect kan echter niet uitgesloten worden.

Bij een vloeistofverblijftijd van 1,0 uur werd soms wel groei van draadvormende organismen waargenomen, maar hun aantal bleef steeds beperkt, zodat geen grote uitspoeling van begroeide drager plaatsvond.

Tabel 4.2 toont daarnaast heel duidelijk dat de draadvormende organismen zich pas kunnen ontwikkelen nadat de biofilmvorming praktisch is voltooid. Dit betekent dat zij zich niet kunnen vestigen op korrels waarvan de filmdikte nog steeds toeneemt. Dit zou kunnen inhouden, dat zij in beginsel wat minder snel (kunnen) groeien dan de eencellige organismen uit de biofilm.

Dragermateriaal dat, om verliezen te compenseren, wordt toegevoegd aan een kolom waarin draadvormende organismen al massaal aanwezig zijn, wordt daarentegen wel snel (binnen enkele dagen) door deze organismen gekoloniseerd. In feite gebeurt dan het omgekeerde. Op korrels die al snel volledig bedekt zijn met een dichte mantel van draden wordt daarna geen echte biofilm meer gevormd. Op dit soort korrels zijn daarnaast, tussen de draden, vaak zeer veel sessiele ciliaten aanwezig.

De kolonisering van de korrels door draadvormende organismen verliep bij de meeste experimenten zeer snel (enkele dagen tot één week). Gedurende de eerste dagen is op de draden zelf nog geen aangroei aanwezig (figuren 4.16 en 4.20). Na verloop van tijd gaan de draden echter zelf ook als aanhechtingsplaats voor eencelligen en (andere) draadvormende organismen fungeren, waarna "pluizebollen" ontstaan (figuur 4.17), die vrijwel steeds massaal uitspoelden. De diameter van dit soort deeltjes was 3-4 maal de diameter van de drager. Dit betekent dat de draden 100-300 μm lang waren.

Tabel 4.2 Groei van draadvormende organismen bij de diverse experimenten

Onderzoek	Drager	Verblijftijd (uur)	Groei biofilm (week)	Aantal draadvormende organismen	Start groei (weken na start)
Verkennd onderzoek - experiment 2	zilverzand	0,5	4-5	zeer veel	na 4-5
	"	0,8	7	" "	na 13
	"	1,6	7	geen	-
Serie 1	zilverzand	0,5	2	zeer veel	na 2-3
	zirkoonzand	0,5	> 6	geen	-
	biogrog	0,5	2	zeer veel	na 2-3
	puimsteen	0,5	1	geen ¹⁾	-
	elektrografiet	0,5	< 1 ¹⁾	weinig	-
Serie 2	zilverzand	1,0	4-5	geen	-
	biogrog	1,0	4-5	geen	-
	"	1,0	4-5	geen	-
	puimsteen	1,0	4-5	vrij veel	na 5
	"	1,0	4-5	geen	-
Serie 3	lava	0,5	6-8	zeer veel	10
	"	0,5	2)	zeer veel	9-10
	puimsteen	0,5	6-7	zeer veel	10
	"	0,5	6-7	zeer veel	10
Serie 4	puimsteen	0,5	7	zeer veel	10
	"	1,0	9	vrij veel	9
	"	0,5	7	zeer veel	10

1) Zeer snelle uitspoeling.

2) Eerst traag, na week 7 zeer snel.

Bij een vloeistofverblijftijd van $\geq 1,0$ uur ontwikkelden de draadvormende organismen zich niet alleen minder massaal, maar werden ze ook minder lang. Bovendien werden ze dan steeds in een vroeg stadium bedekt door een laag van eencellige organismen, hetgeen ook een aanwijzing vormde dat hun groei stagneerde. Deze aangroei verdween overigens gedurende een periode met een zeer lage belasting. Het aantal draden in deze kolom nam daarna sterk af.

Identificatie van de draadvormende organismen leerde dat vooral *Thiothrix* species dit soort problemen veroorzaakte. Daarnaast werden ook *Sphaerotilus natans* en een Type 0211 [5] periodiek waargenomen als secundaire soorten. Deze organismen worden ook in hoogbelaste actief-slibsystemen aangetroffen (*Thiothrix* vooral ook in de hoogbelaste eerste trap van twee traps installaties). De meeste *Thiothrix* soorten hebben voor hun groei, naast laagmoleculaire organische koolstofverbindingen (vooral organische zuren), geringe hoeveelheden sulfide nodig. Hun massale groei bij korte vloeistofverblijftijden moet vrijwel zeker worden verklaard uit de combinatie van:

- de zeer goede menging in een airliftreactor, waardoor in feite sprake is van een volledig gemengd systeem. Deze volledige menging bevordert de groei van draadvormende microorganismen;
- de kennelijk dan toereikende aanwezigheid van gereduceerde zwavelverbindingen.

Het is in dit verband opvallend dat tijdens het vooronderzoek werd vastgesteld dat tijdens een winterperiode (> minder sulfiden in het influent) een korte vloeistofverblijftijd niet leidde tot een massale groei van draadvormende bacteriën.

4.1.3. Signalen voor een instabiele situatie

De ontwikkeling van een biofilm vorderde bij sommige experimenten langzaam, bij andere proeven voltrok dit proces zich zeer snel. Eenmaal werd ook tussentijds een duidelijke versnelling van de aangroei vastgesteld. Zo'n snelle groeiperiode ging vrijwel steeds tijdelijk gepaard met een wat afwijkende (niet ronde) vorm van de biofilm. Soms werden een soort "uitstulpsels" van de film gevormd of was de film omgeven door een rafelige rand. Bij andere proeven waren op de korrels tijdelijk grote bacteriekolonies aanwezig (= een locale, sterke groei van één bepaald soort). In de figuren 4.24 - 4.27 worden hiervan enkele voorbeelden gegeven. De aanwezigheid van deze uitstulpsels of kolonies suggereerde enigszins dat de biofilmvorming zich "haastig" voltrok.

De groei van uitstulpsels en/of kolonies werd vrijwel steeds gevolgd door een instabiele situatie. In figuur 4.28 wordt een voorbeeld gegeven van zo'n successie in de loop van de tijd. Bij dit experiment werden tijdelijk vrijwel transparante bacteriekolonies rondom de korrels waargenomen. In deze periode groeide de biomassa in het systeem sterk. Direct na het verdwijnen van de kolonies vond een explosieve groei van draadvormende organismen plaats.

De groei van uitstulpsels en/of kolonies werd bij enkele experimenten gevolgd door een sterke groei van draadvormende organismen; bij andere proeven ontwikkelde zich echter in de kolommen gesuspendeerde biomassa als in een actief-slibstelsel. Dit laatste probleem is tot nu toe slechts incidenteel ter sprake gekomen (serie 1: puimsteen + elektrografiet; serie 3: lava na 7 weken). Een sterke groei van grote, veelal onregelmatig gevormde, actief-slibvlokken (figuur 4.22) in de kolommen verhinderde de ontwikkeling van een biofilm praktisch volledig. Het beschikbare substraat werd kennelijk voor het grootste gedeelte opgenomen door de vlokvormende organismen, waardoor voor de ontwikkeling van een biofilm te weinig substraat overbleef. De aanwezigheid van deze grote slibvlokken, die in vergelijking tot slibvlokken uit conventionele actief-slibsystemen goede bezinkeigenschappen hadden, leidde desondanks steeds binnen korte tijd tot grote verliezen aan dragermateriaal. Naar ervaring van Gist-brocades is dit een typisch schaaffect en treedt dit in mindere mate op bij grotere reactoren dan de 2 l reactoren.

Bij een enigszins afwijkende variant van het bovenstaande werd rondom de korrels in eerste instantie nog wel een dikke biofilm gevormd. Door samenklontering van deeltjes ontstonden vervolgens groot aggregaten (zie figuur 4.19), die massaal uitspoelden.

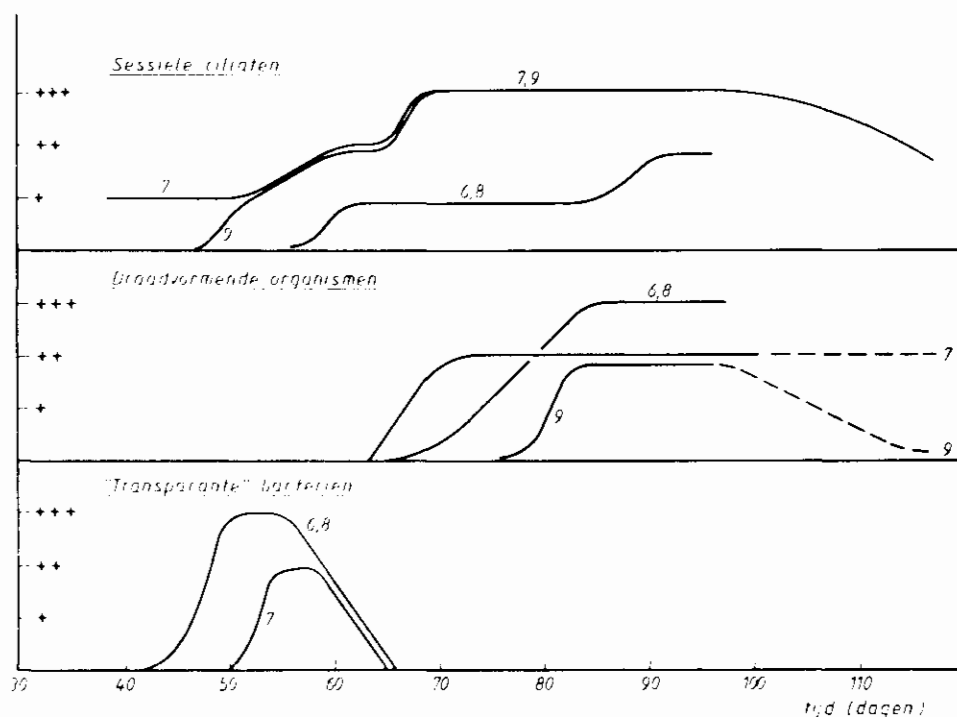


Fig. 4.28 Groei van sessiele ciliaten, draadvormende organismen en "transparante" bacteriekolonies tijdens de proeven op 25 l schaal. (+ = weinig tot ++++ = zeer veel)

4.1.6 Groei van protozoën

Een slib-op-dragersysteem vormt in beginsel een goed milieu voor sessiele (= vastzittende) ciliaten. Dit soort protozoën werd dan ook regelmatig (soms zelfs zeer frequent) waargenomen (figuur 4.23). Zij vestigden zich pas in het systeem nadat het proces van biofilmvorming praktisch voltooid was. Hun aantal varieerde bij de diverse experimenten sterk, waarbij gesteld kan worden dat een lage belasting (b.v. in de tweede kolom bij een in-serie schakeling) meestal (nog?) gepaard ging met een beperkte populatieomvang. Er zijn aanwijzingen dat hun aanwezigheid gepaard ging met een verbetering van het zuiveringsrendement. Dit vooral door een betere verwijdering van zwevend materiaal.

4.2 KWANTITATIEVE ASPECTEN VAN BIOFILMVORMING

In deze paragraaf zullen enkele kwantitatieve aspecten van de hechting van dragermateriaal worden besproken. Hierbij wordt het voorbehoud worden gemaakt dat een exacte interpretatie van de in hoofdstuk 3 vermelde gegevens niet altijd mogelijk is. Ook zijn de uitkomsten van de verschillende experimenten niet steeds onderling vergelijkbaar. Dit houdt verband met het feit dat:

- een representatieve monsterneming van de inhoud van een air-liftreactor niet zo eenvoudig uitvoerbaar is. De wijze waarop deze monsters genomen werden, is in de loop van de experimenten aanmerkelijk verbeterd;
- in het begin van het onderzoek werden problemen ondervonden met het vaststellen van de hoeveelheid biomassa aan het dragermateriaal met een aanzienlijk gloeiverlies (het gloeiverlies van puimsteen en lava bedraagt 4%). Vanaf serie drie werd daarom niet alleen het gloeiverlies bepaald, maar ook het CZV van de gewassen, begroeide drager. Deze laatste methode geeft een goed kwantitatief inzicht inzake de biomassa aan drager;
- de toename van de totale biomassa in het systeem werd beoordeeld op basis van veranderingen van het gehalte aan mg CZV of mg gloeiverlies per liter reactorvolume per dag. Hierbij werd niet gecorrigeerd voor verliezen aan begroeide drager met het effluent. Incidenteel werd uitgespoeld materiaal wel teruggevoerd in de reactor. Dit impliceert dat de werkelijke aangroeisnelheden altijd hoger geweest zullen zijn dan de waarden die in dit rapport worden genoemd. Overigens zal het verschil tussen de gemeten en de werkelijke waarde klein zijn in de perioden met een stabiele bedrijfsvoering (uitspoeling < 0,1%/dag).

Het voorafgaande is expliciet vermeld om aan te geven dat geen absolute waarde toegekend mag worden aan de verkregen resultaten. Een uitputtende bespreking hiervan is daarom weinig zinvol. Dit betekent echter niet dat de resultaten maar in zeer beperkte mate bruikbaar zouden zijn. Qua volgorde van grootte zullen de gemeten waarden meestal redelijk met de realiteit overeenstemmen.

De evaluatie van de experimenten is voornamelijk gericht op de proefseries 1 t/m 4. Resultaten uit het vooronderzoek en de serie 5 zullen slechts incidenteel worden vermeld.

Bij de meeste experimenten konden globaal twee groeistadia worden onderscheiden, namelijk:

- a. Een aangroefase. De biomassa aan drager (en/of de biomassa per volume-eenheid) nam gedurende deze periode gestaag toe. Er was meestal sprake van een vrijwel lineaire toename van de biomassa, zoals ook in figuur 4.29 is aangegeven. Bij enkele proeven, vooral bij korte verblijftijden verliep de toename echter logaritmisch. Deze fase werd gevolgd door:

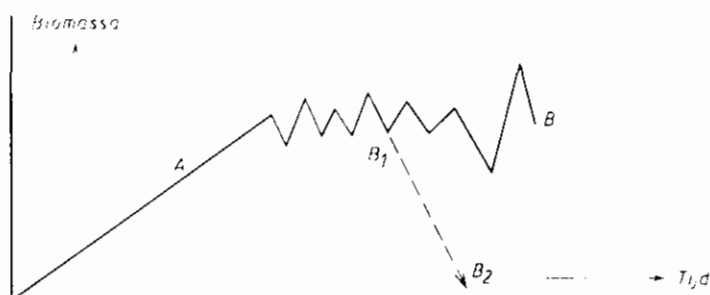


Fig. 4.29 Biomassa aan drager.
 (Lineaire) aangroefase: 0-A
 stabilisatie: A-B
 uitspoeling : B₁-B₂

- b. Een periode waarbij de biomassa aan drager (of per volume eenheid) niet meer toenam, maar in de loop van de tijd vaak wel sterk fluctueerde. Dit stadium wordt in deze rapportage het "stabilisatie-niveau" genoemd, waarbij echter uitdrukkelijk wordt gesteld dat bij geen enkel experiment een echte evenwichtstoestand is bereikt. Daarvoor waren de fluctuaties te groot.

Bij diverse experimenten kon daarnaast nog een derde fase worden onderscheiden, namelijk die waarbij het begroeide dragermateriaal massaal uitspoelde.

4.2.1 Aangroefase

In tabel 4.3 is de aangroeisnelheid (in mg gloeiverlies/l.dag) bij de diverse experimenten vermeld. Deze is berekend over de periode vanaf $t=0$ tot het tijdstip waarop de biomassa per volume eenheid niet verder toenam. Dit kon verschillende oorzaken hebben: bereiken van het stabilisatieniveau, uitspoeling, tussentijdse onthechttingsproeven. De aangroeisnelheden bij experiment 2 en de proefseries 1 en 2 zijn inclusief de bijdrage van het gesuspendeerde materiaal. Bij de laatste series werd het dragermateriaal eerst gewassen, voordat de CZV-biomassa werd bepaald.

Tabel 4.3 De aangroei-snelheid en het bereikte organische-stofgehalte bij de diverse experimenten.

Onderzoek	Tempe- ratuur- verloop (°C)	Drager	Oppervlakte 1) (m ² /m ³)	CZV-volume- belasting (kg CZV/ m ³ .dag)	Aangroei-snel- heid (mg gloei- verlies/l.dag)	"Eindniveau" (g organische stof/l) 3)
Vooronderzoek - experiment 2	12 - 19	zilverzand	3200	21	440 (30) ⁴⁾	> 15
		zilverzand	3200	13	240 (50)	> 4
		zilverzand	3200	6,5	160 (50)	> 3
Serie 1	18 - 24	zilverzand	2000	30	> 500 (15)	
		zirkoonzand	2000	30	"nihil"	
		biogrog	2000	30	> 500 (15)	
		puimsteen	> 2000	30	> 500 (7)	
		elektrograf.	> 2000	30	hoog	
Serie 2	17 - 12	zilverzand	2000	13	> 80 (31)	> 3
		biogrog	2000	13	210 (31)	> 12
		biogrog	2000	13	160 (31)	
		puimsteen	> 2000	13	230 (31)	> 17
		puimsteen	> 2000	13	320 (31)	> 17
Serie 3a	10 - 12	lava	2000	26	300 (40)	ca. 15
		puimsteen	> 2000	26	400 (40)	ca. 20
Serie 3b	10 - 17	lava	2000	26	140 (70)	ca. 13
		puimsteen	> 2000	26	560 (50)	ca. 20
Serie 4	10 - 20	puimsteen	> 4000	16	360 (50)	ca. 25
		puimsteen	> 4000	15	280 (65)	ca. 23
		puimsteen	> 4000	30	360 (50)	ca. 25
		puimsteen ²⁾	> 4000	-	130 (80)	ca. 20

1) Beschikbaar hechtingsoppervlakte bij de start.

2) In serie geschakeld (2e trap).

3) Niveau dat na de aangroei-fase werd bereikt (vaak sterk fluctuerend).
Het ontbreken van een waarde in deze kolom kan diverse oorzaken hebben (zie § 4.2.2).

4) De tijdsduur waarover de aangroei-snelheid is berekend is tussen () vermeld.

De resultaten bevestigen de indruk die op basis van de microscopische waarnemingen was verkregen. Experiment 2 illustreert dat een lagere CZV-volumebelasting gepaard gaat met een lagere aangroeisnelheid. De combinatie van een hoge temperatuur + een hoge volumebelasting (serie 1) leidt tot een zeer snelle ontwikkeling van de biofilm. De aangroeisnelheid daalt indien de temperatuur wordt verlaagd (serie 3); dit effect wordt versterkt indien daarnaast tevens een lagere belasting wordt toegepast (serie 2). De resultaten van serie 4 passen ook in dit beeld.

Het dragermateriaal puimsteen werd bij vrijwel alle proefseries toegepast. De aangroeisnelheden op dit materiaal, bij de diverse experimenten, zijn vermeld in tabel 4.4. Deze resultaten suggereren dat de CZV-belasting een grotere invloed heeft op de aangroeisnelheid dan de temperatuur.

Tabel 4.4 Aangroeisnelheid op puimsteen bij de diverse experimenten.

Aangroeisnelheid (mg gloeiverlies/l.dag)	Temp. ¹⁾ °C	CZV-volumebelasting (kg CZV/m ³ .dag)	Serie
>500	20-27	30	1
560	ca 17	26	3b
400	10-12	26	3a
360	10-15	30	4
320	18-12	13	2
280	10-15	15	4
230	18-12	13	2

1) Temperatuurverloop tijdens de aangroeiperiode.

Bij de series 1 t/m 3 werd een aantal dragermaterialen getest. Een vergelijking van de aangroeisnelheden leert dat de kwaliteit van het dragermateriaal geen rol lijkt te spelen onder omstandigheden waarbij de biofilm zich (te?) snel ontwikkelt (serie 1). Bij de series 2 en 3 werd vastgesteld dat, onder minder optimale groeiomstandigheden puimsteen wat sneller begroeide dan biogrog en lava. De verschillen in aangroeisnelheid waren echter meestal niet erg groot. Voor de opvallend lage aangroeisnelheid op lava, in de kolom met een verhoogde temperatuur (serie 3b), kan geen verklaring gegeven worden.

Tijdens het onderzoek is in beperkte mate aandacht geschonken aan de biofilmvorming op dragermateriaal in kolommen die in serie geschakeld waren (twee- t/m vier-traps systemen). Bij serie 5 werden in de kolommen die gevoed werden met het effluent van een voorafgaande kolom, en waarbij het water bovendien aan een tussenbezinking was onderworpen, aangroeisnelheden van 50 - 80 mg CZV/l.dag gemeten. Bij serie 4 werd in een tweede trap een aangroeisnelheid van 190 mg CZV/l.dag (130 mg gloeiverlies/l.dag) vastgesteld. Bij dit laatste experiment werd de kolom gevoed met effluent dat niet via een tussenbezinking in de kolom werd gebracht. De biofilmvorming in een tweede trap verloopt dus aanmerkelijk trager, hetgeen uiteraard een gevolg is van de lagere CZV-volumebelastingen.

In het voorafgaande werd de toename van de biomassa beoordeeld op basis van de stijging van het gloeiverlies per volume eenheid per dag. Deze parameter geeft echter slechts in beperkte mate informatie over de hechting aan individuele korreltjes dragermateriaal. De gloeirest (in %) is hiervoor al een betere maat. Bij diverse experimenten (zie hoofdstuk 3) werd vastgesteld dat na een bepaalde tijd het gloeiverlies per liter reactor niet meer toenam (= stabilisatie van het totale gehalte aan biomassa), terwijl de gloeirest (in %) nog wel bleef dalen (= biofilmen om de korrels worden steeds dikker). Dit betekent dat het systeem in feit nog niet gestabiliseerd was, omdat bij een echte evenwichtstoestand beide parameters min of meer constant worden. Een en ander is een gevolg van het voortdurend uitspoelen van begroeid dragermateriaal. In figuur 4.30 is als voorbeeld het verloop van de gloeirest bij de experimenten met puimsteen weergegeven. Deze figuur illustreert veel beter dan tabel 4.4 de enorm snelle biofilmvorming bij serie 1. Bij de series 3 en 4 werd wel een soort evenwichtssituatie bereikt, serie 2 is daarentegen al daarvoor beëindigd.

In de inleiding van deze paragraaf werd gesteld dat aan een bepaling van de gloeirest, als maat voor de aanwezige biomassa, ook bepaalde bezwaren verbonden zijn. Vanaf serie drie werd daarom tevens de CZV van gewassen dragermateriaal bepaald als maat voor de biomassa. Deze waarden zijn vermeld in tabel 4.5 en bevestigen hetgeen hiervoor over de aangroeisnelheid bij de series 3 t/m 5 is gesteld. De tabel illustreert daarnaast dat bij een hoger initieel hechtingsoppervlakte (serie 4) de groei per gram dragermateriaal wel lager is, maar dat de groei per volume eenheid niet evenredig daalt de biomassa wordt "verdeeld" over een groter aantal korreltjes.

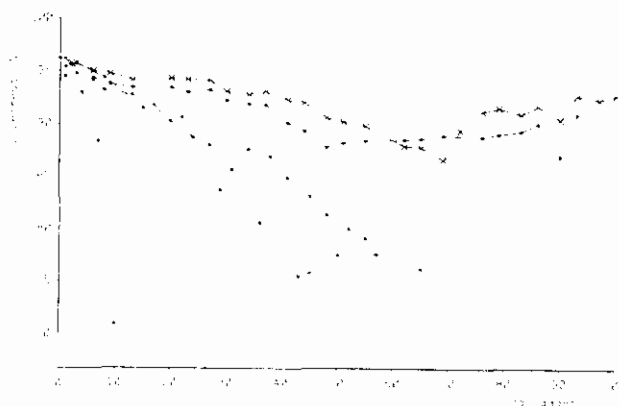


Fig. 4.30 Daling van de gloeirest in de diverse proeven met puimsteen als drager.
 1 , 2 , enz. : serie
 4A : verblijftijd 0,5 h
 4B : verblijftijd 1,0 h

Tabel 4.5 Aangroeisnelheden van biomassa aan drager

Serie	Drager	Korrel- oppervlakte ¹⁾ (m ² /m ³)	CZV-volume- belasting (kg CZV/m ³ .dag)	Aangroeisnelheid (mg CZV/g.dag) (mg CZV/l.dag)	
3a	lava	2000	26	2,0	320
	puimsteen	>2000	26	4,6	450
3b	lava ²⁾	2000	26	1,2	80
	puimsteen ²⁾	>2000	26	6,7	830
4	puimsteen	>4000	30	2,7	470
	puimsteen	>4000	15	1,7	340
	puimsteen	>4000	30	2,7	470
	puimsteen ⁴⁾	>4000	(9) 3)	0,8	190
5	puimsteen ⁴⁾	2000	(3) 3)	1,0	86
	puimsteen ⁵⁾	2000	(2,5) 3)	0,7	62
	puimsteen ⁶⁾	2000	(2) 3)	0,6	52

1) Hechtingsoppervlakte bij de start van het experiment.

2) Temperatuurverhoging tot ca. 17°C.

3) Opgelost CZV.

4) 2e trap bij in serie schakelen.

5) 3e trap bij in serie schakelen.

6) 4e trap bij in serie schakelen.

4.2.2 Stabilisatie en uitspoeling

De resultaten die in hoofdstuk drie zijn vermeld tonen aan dat de aangroei-fase vrijwel steeds werd gevolgd door een periode waarin het gehalte aan organische stof in de reactor aanmerkelijk fluctueerde. De waarden die in de laatste kolom van tabel 4.3 zijn vermeld betreffen dus in feite momentopnamen. Ze geven globaal de hoogte weer van het gehalte aan organische stof dat bij de verschillende experimenten kan worden bereikt. Het ontbreken van een waarde in de kolom betekent dat het eindniveau niet kon worden bepaald, doordat de kolommen zeer snel leegspoelden (serie 1) of omdat onthechtingsproeven werden uitgevoerd (biogrog, serie 3). Bij een aantal waarden is het teken > vermeld, hetgeen betekent dat de proef werd beëindigd voordat het gehalte aan organische stof zich op een bepaald niveau stabiliseerde.

Met puimsteen als dragermateriaal werden steeds waarden tussen 17 en 25 g/l aan organische stof bereikt. Een duidelijke invloed van de belasting en de temperatuur kon niet worden waargenomen. Dit betekent dat bij deze drager een lagere groeisnelheid niet leidt tot een lager eindniveau; het duurt alleen wat langer voordat dit bereikt wordt. Bij serie 4 werd, na 85 dagen, zelfs in kolom 9 (de 2e trap van een in serie schakeling) nog een organischestofgehalte van 20 g/l bereikt. Dit hoge niveau moet echter worden toegeschreven aan inspoeling van organisch materiaal uit de 1e trap. Bij serie 5, waar een tussenbezinking werd toegepast, werden in de 2e t/m 4e trap organischestofgehalten van 3-5 g/l bereikt.

Met zilverzand, biogrog en lava als dragermateriaal lijkt het organischestofgehalte zich op een wat lager eindniveau (circa 15 g/l) te stabiliseren. Het aantal waarnemingen is echter beperkt, zodat het trekken van definitieve conclusies niet mogelijk is. Bij diverse experimenten met zilverzand werd daarnaast geconstateerd dat bij deze drager het stabilisatieniveau wel degelijk bepaald wordt door de aangroeisnelheid. In een langzaam groeiend systeem stagneerde het organischestofgehalte steeds op een niveau van 3-5 g/l. De relatief grote uitspoeling in de 2 l kolommen zou hier de oorzaak van kunnen zijn.

De ontwikkeling van de biofilm lijkt daarnaast ook beïnvloed te worden door de aanwezigheid van draadvormende organismen. In paragraaf 4.1.4 wordt geconcludeerd dat deze bacteriën zich pas massaal kunnen ontwikkelen na de aangroefase. Bij serie 5 werd de eerste kolom echter gevuld met dragermateriaal waarop al zeer veel draadvormende organismen aanwezig waren. Verliezen aan dragermateriaal werden bij deze proef wel gecompenseerd door de toevoeging van schone drager. De nieuwe korrels werden binnen enkele dagen, dus voordat een biofilm was gevormd, gekoloniseerd door draadvormende organismen. De "oude" korrels spoelden binnen enkele weken vrijwel allemaal uit de kolom, waarna alleen het nieuw toegevoegde dragermateriaal resteerde. Deze korrels waren omgeven door een dichte mantel van *Thiothrix*-draden, waartussen zeer veel sessiele ciliaten aanwezig waren (zie figuur 4.23). Het organische stofgehalte bedroeg bij de start circa 10 g/l en daalde, ondanks een CZV-volumebelasting van 30 kg/m³.dag, binnen 3 weken tot een niveau van 5-7 g/l, waarna een zekere mate van stabilisatie optrad. Kennelijk verhinderden de draadvormende organismen de vorming van een normale biofilm. Het zuiveringsrendement was onder deze omstandigheden zeer acceptabel.

De aanwezigheid van veel draadvormende organismen veroorzaakt, vooral indien zogenaamde "pluizebollen" (zie figuur 4.17) gevormd worden, een massale uitspoeling van dragermateriaal. Ook de vorming van aggregaten en/of grote slibvlokken (zie paragraaf 4.1.5) leidt hiertoe. De vaak grote fluctuaties van het gehalte aan organische stof tijdens de stabilisatiefase kunnen echter maar ten dele uit deze twee factoren verklaard worden. De vraag, hoeveel begroeide drager eigenlijk in het systeem past, lijkt in dit kader relevant. Wanneer is de reactor vol? Op deze vraag zal in het volgende hoofdstuk nader worden ingegaan.

5. ZUIVERINGSTECHNISCHE ASPECTEN

In dit hoofdstuk worden de "zuiveringstechnische aspecten" samengevat. De mogelijke invloed van de concentratie en de aard van de biomassa op de processtabiliteit wordt globaal besproken. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de CZV-verwijdering en de nitrificatie bij de diverse proeven-series. De slibproductie kon op de 2 l schaal niet worden bepaald. De schaaleardeffecten zijn hiervoor te groot. Ook op 25 l schaal konden geen exacte gegevens over de slibproductie worden verkregen. Uit de CZV-balans, over een proefperiode in serie 4, kunnen toch schattingen worden gemaakt. Hierop wordt in paragraaf 5.4 ingegaan.

5.1 HOEVEELHEID BIOMASSA

Een van de doelstellingen bij de ontwikkeling van slib-op-drager systemen is het verwezenlijken van een grote hoeveelheid actieve biomassa op dragermateriaal in een drie-fasen airliftreactor. Er werd gestreefd naar 20-30 kg droge stof/m³. Bij een actief-slib systeem wordt het slibgehalte ingesteld op bijvoorbeeld 4 kg/m³ en vervolgens door middel van gecontroleerd spuien op deze waarde gehouden. Dit leidt tot een constante slibbelasting bij een gelijkblijvende samenstelling en hoeveelheid van het influent.

Bij een slib-op-dragersysteem kan het gehalte aan biomassa in principe worden ingesteld door het afvoeren van begroeide drager. De dragerconcentratie kan door terugvoer van drager, waarvan de biomassa geheel of gedeeltelijk is verwijderd of door toevoeging van schone drager worden gehandhaafd. De slibbelasting kan dus net als bij actief-slibsystemen worden geregeld. Bij een slib-op-dragersysteem bevindt de biomassa zich in een film op de drager. Bij een actief-slibstelsel in een matrix van biomassa in vlokform, in de vlok wordt veel gesuspendeerd materiaal ingevangen. De slibgroei wordt hierdoor hoger, de slibleeftijd lager. Bij een slib-op-dragersysteem vindt groei van biomassa vooral op de drager plaats en er wordt waarschijnlijk weinig gesuspendeerd materiaal ingevangen. De biolaag bestaat hierdoor veel meer dan bij actief-slib uit biomassa en de slibleeftijd is hoger.

De hoeveelheid biomassa in de airliftreactor is net zoals bij een actief-slibstelsel aan een maximum gebonden. Bij het laatste is gewoonlijk de bezinking van het actief-slib de beperkende factor. De bezinksnelheden en ook

de droogrest van de actiefslibvlok (de droogrest van ingedikt actiefslib is maximaal 40 kg/m^3) zijn laag. De droogrest van een biofilm is hoger (60 tot 100 kg/m^3 biomassa [3]). Omdat de compacte biofilm ook nog gehecht is aan een relatief zware kern (dichtheid ca. 2000 kg/m^3) zal het bezinkgedrag niet snel de beperkende factor vormen. In wezen wordt bij een airliftreactor de maximale hoeveelheid biomassa in hoge mate bepaald door het volraken van het reactorvolume. Van groot belang hierbij is of de dichtheid van de biomassa niet verstoord wordt door de vorming van draadvormende organismen. De diameter van een begroeide korrel neemt dan "sprongsgewijs" toe. Door de dan in grotere mate optredende invang van gesuspenseerd materiaal, een met draden begroeide korrel lijkt meer op een actief-slibvlok, neemt de slibgroei toe en de slibleeftijd af. Tevens treedt uitspoeling van drager en biomassa op. Bij de beoordeling van de experimentele resultaten is waargenomen, dat het hydraulisch gedrag van de reactor wordt beïnvloed door de groei van biomassa.

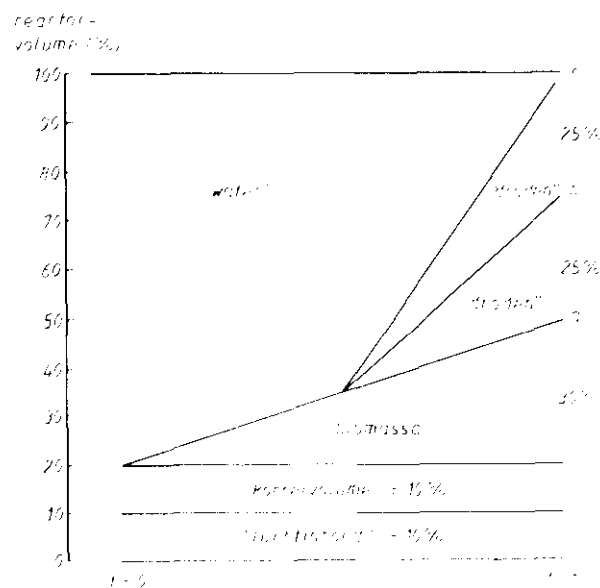


Fig. 5.1 Verloop van de bezetting van het reactorvolume - voorbeeld.

In tabel 5.1 wordt met drie voorbeelden gedemonstreerd hoe de reële verblijftijd wordt beïnvloed door de aangroei van biomassa: a) normale aangroei, b) vorming van draden en c) vorming van veel draden. Uit figuur 5.1 blijkt dat bij aangroei van de biomassa tot $30 \text{ kg CZV-biomassa/m}^3$ de reële

verblijftijd met 50% terugloopt bij een korrelvolume van 10% en een "luchtinhoud" van 10% (lijn a). Door vorming van draadvormende organismen neemt de dichtheid van de biofilm af. In een situatie zonder geregelde biomassaafvoer neemt het volume van de biomassa sterk toe, lijnen b en c in de figuur. De reële hydraulische verblijftijd neemt hierbij sterk af, de reactor "groeit vol".

Misschien verklaart het hier geschetste "model" veel van de experimenteel waargenomen instabiliteit van het slib-op-dragersysteem. Oorspronkelijk werd ervan uitgegaan, op basis van de ervaringen bij Gist-brocades dat er geen slibgroei zou zijn. Er zijn echter duidelijke aanwijzingen dat slibgroei optreedt bij de zuivering van stedelijk afvalwater. Zie ook paragraaf 5.4 Slibproductie.

Tabel 5.1 Invloed van hoeveelheid biomassa in de reactor op de reële verblijftijd

Uitgangspunten:

- hydraulische verblijftijd (betrokken op lege reactor) = 0,5 uur;
- korrelvolume = 10%;
- "luchtinhoud" = 10%;
- toename van biomassa lineair in de tijd;
- 1 kg CZV-biomassa \sim biolaagvolume van 10 l (droogrest biolaag) = 100 kg CZV-biomassa/m³ biolaag;
- bij groei van draadvormende organismen neemt de droogrest van de biolaag af.

tijdstip	CZV-biomassa kg CZV/m ³ reactor		Droogrest biolaag kg CZV/m ³ biolaag		Volume biolaag (% reactor volume)		Reële verblijftijd (uur)	
	t=0	t=t	t=0	t=t	t=0	t=t	t=0	t=t
a - normale aangroei	0	30	100	100	0	30	0,4	0,25
b - vorming van draden	0	30	100	60	0	55	0,4	0,13
c - vorming van veel draden	0	30	100	40	0	80	0,4	0

Ook de sterke groei van draadvormende organismen was niet verwacht bij de toepassing van de drie-fasen airliftreactor bij de zuivering van stedelijk afvalwater. De verklaring zou kunnen zijn dat, als eerder aangegeven door de vorming van de biolaag de reële verblijftijd sterk afneemt, waardoor de omstandigheden voor de vorming van draadvormende organismen beter worden. De reactor raakt dan, zoals diverse malen is waargenomen, snel gevuld met begroeide drager. Door uitspoeling van dragermateriaal treedt daarna weer een versnelde groei op van biomassa en ook van draadvormende organismen op de resterende drager.

Deze groei van draadvormende organismen heeft ook invloed op de effluentkwaliteit. Bij een verblijftijd van 0,5 uur nam de CZV-verwijdering af. Uitspoeling van dragermateriaal had echter soms een betere effluentkwaliteit tot gevolg (verlenging verblijftijd?). Er mag hieruit niet worden geconcludeerd dat niet gestreefd zou moeten worden naar een hoge biomassaconcentratie. Het is wel van belang naar een optimale situatie bij een stabiele procesvoering te streven.

5.2 CZV-REDUCTIE

De CZV-reductie is beoordeeld aan de hand van gefiltreerd effluent. Het aangegeven rendement, CZV-%, heeft dan ook betrekking op gefiltreerd effluent ten opzichte van niet gefiltreerd influent. Het rendement CZV-F-% is gebaseerd op het CZV van de opgeloste organische stof (gefiltreerde influent en effluent).

In tabel 5.2 zijn gegevens samengebracht over de werking van de airliftreactoren tijdens "uitgezochte" periodes uit het gehele onderzoek. Deze periodes zijn geselecteerd op basis van de volgende eisen:

- redelijke stabiliteit, geen grote wisselingen in afvalwatersamenstelling;
- redelijke hoeveelheid biomassa, aangroei op de drager.

In figuur 5.2 is het CZV van gefiltreerd effluent (gegevens uit tabel 5.2) uitgezet tegen de hydraulische verblijftijd. De omcirkelde tekens zijn verkregen met in serie geschakelde kolommen, waarbij de vermelde verblijftijden

zijn gesommeerd. Bij toenemende verblijftijd neemt de CZV-verwijdering toe. In de figuur 5.2 is met lijnen de waargenomen en de haalbare effluentkwaliteit aangegeven. Deze schattingen zijn in tabel 5.3 weergegeven.

Hierin is de gemiddelde effluentkwaliteit bij proeven op 25 l schaal aangegeven. De haalbare effluentkwaliteit zal na optimalisatie van de airlift-reactor kunnen worden gerealiseerd, hetgeen gedurende kortere perioden tijdens dit onderzoek ook is gebeurd.

Tabel 5.2 Zuiveringsrendement tijdens uitgezochte periodes.

	Biomassa concentratie 1)	Temp. (°C)	CZV volume- belas- ting (kg/m ³ .d)	CZV-inf (mg/l)	CZV-inf-F (mg/l)	CZV-eff, CZV-eff-F (mg/l)	CZV-% (%)	CZV-F-% (%)	Voorkomen nitrificatie 5)	
Onderzoek										
Experiment 1, dag 130-199 zilverzand, t = 0,4 uur	a = 12,0	12	35	565	-	350	170	68	-	Nee, wel bij lagere CZV-volumebelastingen in eerdere meetperiode
Experiment 2, dag 77 - 98 zilverzand										
t = 0,5 uur	a = 6,1	17	21	435	-	155	125	71	-	N-Kj-% = ca. 40%
t = 0,8 uur	a = 7,7	"	13	"	-	265	145	65	-	aan eind van proef
t = 1,6 uur	a = 3,4	"	6	"	-	235	120	71	-	hogere nitraatgehalten
Serie 1, dag 4-21 2)										
t = 0,5 uur zirkoonzand	laag	ca. 20	28	590	-	-	ca. 380	ca. 35	-	Niet bekend
overige dragers	a = 1-4	"	28	"	-	-	ca. 210	ca. 65	-	
Serie 2, dag 36-71										
t = 1 uur zilverzand	a = 2,4	12-15	7,5	315	-	235	125	58	-	Niet bekend
basgros	a = 8,3	"	"	"	-	170	89	70	-	
basgros	a = 3,9	"	"	"	-	205	110	63	-	
plumsteen	a = 11	"	"	"	-	175	85	71	-	
plumsteen	a = 9	"	"	"	-	180	92	69	-	
							ca. 50 3)	ca. 80 3)		
Serie 3, dag 41-57										
t = 0,5 uur lava	b = 14,9	12	13	685	540	550	275	60	50	Niet bekend
plumsteen	b = 21,5	"	13	685	540	580	260	62	52	
Serie 4, dag 51-93										
plumsteen										
t = 0,5 uur - tot dag 76	b = 25,6	18	30	640	420	460	210	66	49	Niet bij t = 0,5 uur
- daarna 4)	b = 8,2	"	30	620	400	-	150	875	60	bij t = 1 uur pas na
t = 1 uur	b = 14,5	"	15	630	415	350	120	81	71	meer dan 80 dagen
t = 0,5 + 0,5 uur	b = 12,5	"	15	630	415	355	135	79	69	
Serie 5, dag 44-92										
plumsteen										
0,5) + 1) = 1,5	b = 3-5	20	28	590	420	425	125	75	70	Ja, bij lage CZV-
0,5) + 1) + 1) = 2,5	b = 3-5	"	-	-	125	180	105	82	75	volumebelastingen
0,5) + 1) + 1) + 1) = 3,5	b = ca. 2	"	-	-	195	210	85	86	81	
0,5) + 1) + 1) + 1) + 1) = 4,5	b = ca. 2	"	-	-	80	120	58	90	86	
0,5) + 2) = 2,5	b = 4-5	"	-	-	125	245	83	86	80	

1) a = "organische" stof (g/l) - gis-verlies drager

2) a = CZV-biomassa aan drager (g/l)

3) t = reën aangroeperiode, sterke uitsporing

4) plumsteen, gedurende korte tijd

5) van dag 76-93

6) zie ook hoofdstuk 3

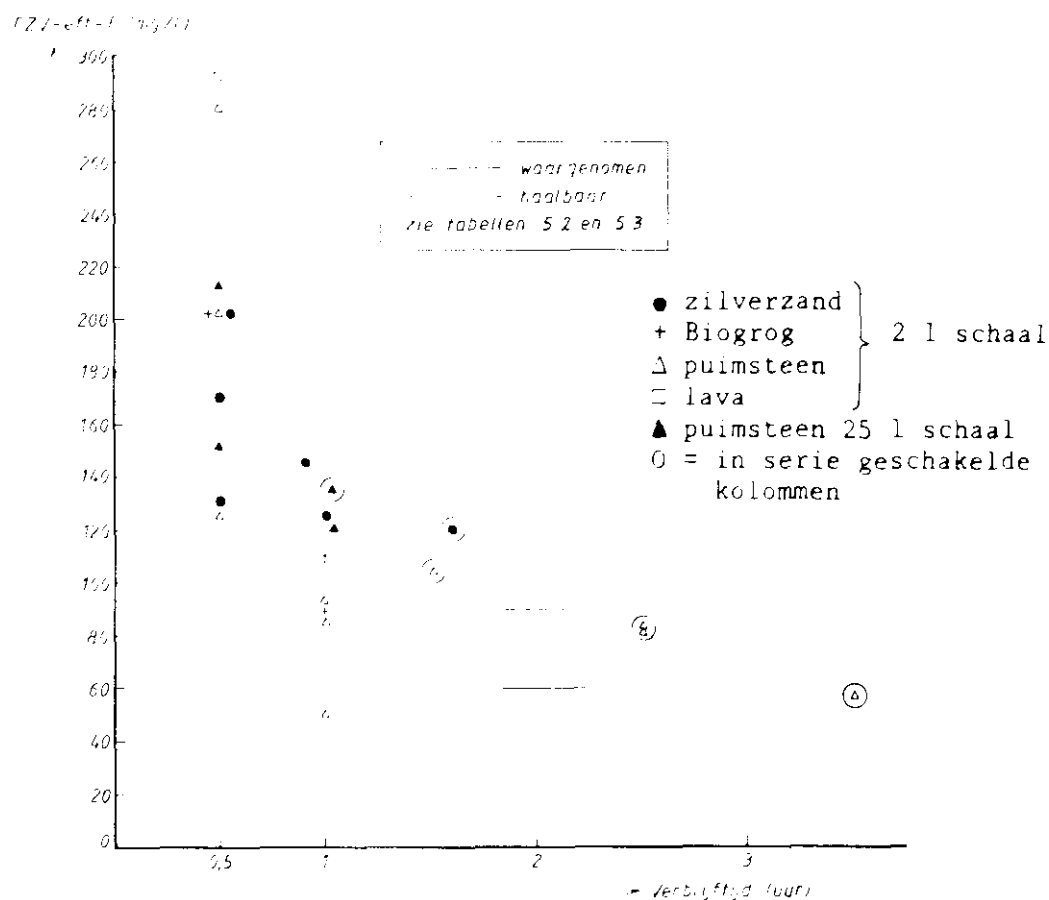


Fig. 5.2 CZV-effluent als functie van de hydraulische verblijftijd.

Door de grote variatie in procesomstandigheden kon de invloed van de temperatuur op CZV-eff-F niet eenduidig worden vastgesteld. De voordelen van opsplitsing van in serie geplaatste reactoren waren vooralsnog niet groot. In figuur 5.3 is het CZV van gefiltreerd effluent uitgezet tegen de CZV-volumebelasting ($\text{kg CZV/m}^3 \cdot \text{dag}$). Het werkgebied van actief-slibsystemen en van carroussels is ook ingetekend. De waargenomen gemiddelde effluentkwaliteit uit figuur 5.2 is ook hier aangegeven. In een drie-fasen airlift-reactor kunnen effluentwaarden, die vergelijkbaar zijn met die van conventionele actief-slib systemen verkregen worden bij veel hogere CZV-volumebelastingen. Er is echter één groot verschil. Het gehalte aan gesuspendeerd materiaal in het effluent was bij deze proeven hoog. Het CZV van niet gefiltreerd effluent was ongeveer twee maal dat van gefiltreerde effluent. Dit was al in het vooronderzoek onderkend. In dit stadium van het onderzoek kan de beoordeling van de mogelijkheden van CZV-verwijdering alleen worden uitgevoerd aan de hand van gefiltreerd effluent. Dit zou in vergelijking met de praktijk een te optimistische kijk op de bereikte onderzoeksresultaten

kunnen inhouden. Het wordt toch verantwoord geacht, omdat in het slib-opdragersysteem ook voornamelijk opgeloste stof verwijderd zal worden. Het geproduceerde slib bevindt zich, zoals in paragraaf 5.4 besproken wordt voornamelijk in het effluent en dit zal apart afgescheiden moeten worden.

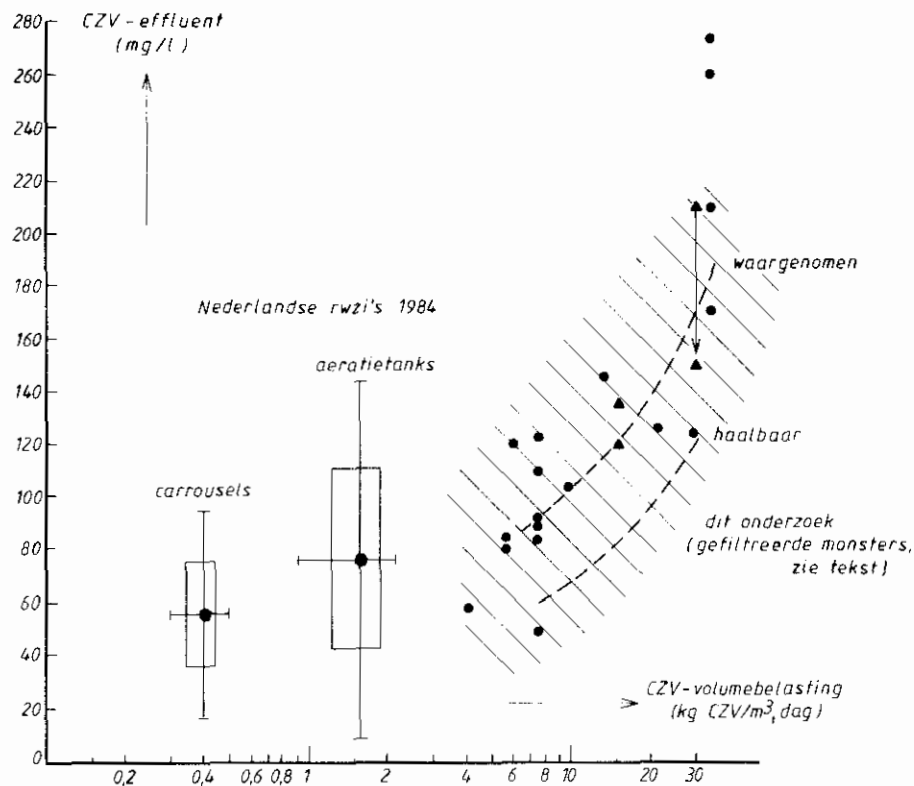


Fig. 5.3 CZV in effluent als functie van de CZV-volumebelasting.

- Opmerking 1) Nederlandse rwzi's in 1984: Gegevens ter beschikking gesteld door CBS (zie ook [4]). Aangegeven zijn het gemiddelde plus/minus de spreiding (blokje) en het 95%-interval (lijnstuk).
- Opmerking 2) Dit onderzoek: ●, ▲ = gemiddelde van CZV's van gefiltreerde effluents over een meetperiode, zie tabel 5.2 (● = 2 l schaal, ▲ = 25 l schaal).

Tabel 5.3 De invloed van de vloeistofverbleeftijd op de CZV-verwijdering.

	Verblijf- tijd (uur)	CZV-volume- belasting (kg CZV/m ³ .dag) 1)	CZV-effluent gefiltreerd (mg/l)	CZV-reductie (gefiltreerd) (%) 2)	CZV- reductie (%) 3)
Waargenomen	0,5	30	170	60	70
	1	15	120	70	80
	2	7,5	90	80	85
"Haalbaar"	0,5	30	120	70	80
	1	15	80	80	90
	2	7,5	50	90	90

1) CZV-influent, niet gefiltreerd circa 600 mg/l, gefiltreerd circa 400 mg/l.

2) CZV-reductie, gebaseerd op gefiltreerde influenten en effluenten.

3) CZV-reductie, gefiltreerd effluent t.o.v. niet gefiltreerd influent.

5.3 NITRIFICATIE

Bij enkele proeven is nitrificatie opgetreden. Zie tabel 5.2. Bij een hydraulische verblijftijd van 1 uur begon zich na ongeveer 80 dagen een nitrificerende populatie te ontwikkelen. Bij langere verblijftijden duurde dit aanzienlijk korter. De resultaten zijn al neergelegd in hoofdstuk 3. Nu wordt volstaan met de samenvatting van deze gegevens in figuur 5.4, waarin het gehalte aan N-Kjeldahl in gefiltreerde effluënten is uitgezet tegen de CZV-volumebelasting. De proeven op 2 l schaal wijzen uit dat bij een verblijftijd van meer dan 1,5 uur (CZV-volumebelasting < 10 kg CZV/m³.dag) nitrificatie mogelijk is.

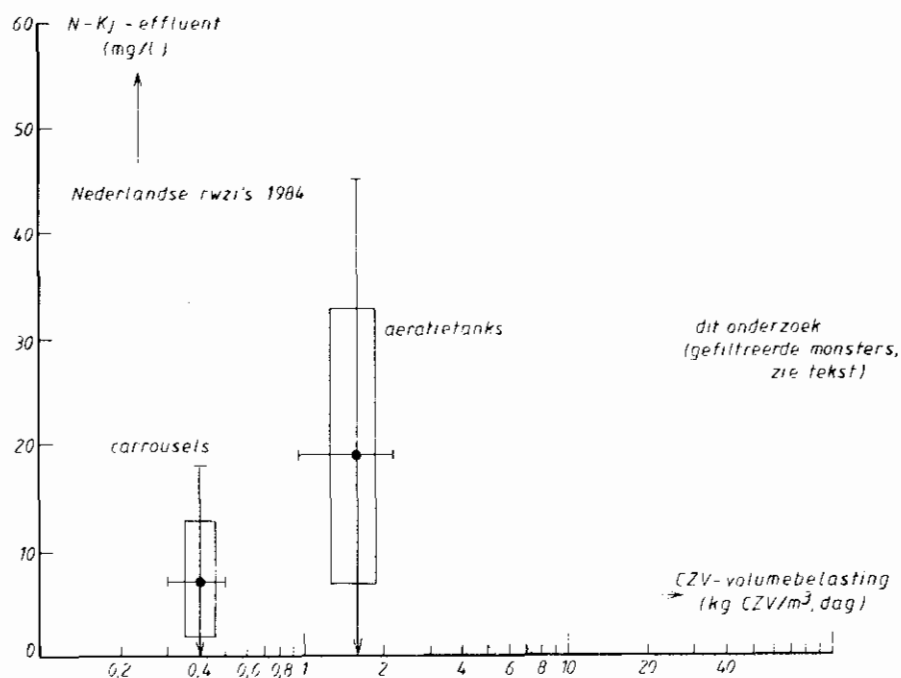


Fig. 5.4 N-Kj in effluent als functie van de CZV-volumebelasting.

- Opmerking: Nederlandse rwzi's in 1984: Gegevens ter beschikking gesteld door CBS (zie ook [4]).

5.4 SLIBPRODUKTIE

Stedelijk afvalwater bevat, ook na bezinking, veel gesuspendeerd materiaal. Bij serie 4 (proeven op 25 l-schaal) kon 35% van het CZV door filtreren over een vouwfilter worden afgescheiden. In tabel 5.4 zijn CZV-vrachten (kg CZV per dag per m³ beluchttingsruimte, voor influent is dit de CZV-volumebelasting) over de periode dag 51 - 93 van serie 4 opgenomen. De hoeveelheden gesuspendeerd materiaal zijn berekend uit de CZV's voor en na filtreren.

Tabel 5.4 CZV-vrachten (kg CZV/m³ beluchttingsruimte.dag) in de periode dag 51 - dag 93, 25 l-schaal, serie 4.

Kolom nummer	6	7	8	9 ¹⁾
Verblijftijd (uur)	0,5	1	0,5	0,5
<u>Influent</u>				
CZV-totaal	31	15	31	23
CZV-opgelost (na filtreren)	20	10	20	10
CZV-gesuspendeerd ²⁾	11	5	11	13
<u>Effluent</u>				
CZV-totaal	22	10	23	21
CZV-opgelost (na filtreren)	10	4	10	9
CZV-gesuspendeerd ²⁾	11	6	13	13
Verwijdering opgelost CZV	9,5	6,0	9,4	1,9

1) In serie met kolom 8

2) CZV-gesuspendeerd = (CZV-totaal)-(CZV-F)

Uit tabel 5.4 blijkt dat in de kolommen vrijwel geen verandering van de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal plaatsvindt. Het CZV van gesuspendeerd materiaal in het influent en het effluent is vrijwel gelijk. Het is nog onduidelijk of het gesuspendeerde materiaal in het influent doorstroomt of dat het gesuspendeerde materiaal in influent en effluent duidelijk verschillend is.

De hoeveelheid biomassa aan de drager varieerde ten opzichte van de totale stroom gesuspendeerd materiaal door de kolommen maar weinig.

De verwijdering van opgelost CZV bedroeg in de kolommen 6 en 8 circa 9,5 kg CZV/m³.dag bij een verblijftijd van 0,5 uur. De slibproduktie kan voor deze situatie vanuit twee extreme uitgangspunten berekend worden:

- a. Alleen de toename aan gesuspendeerd materiaal wordt als slibproduktie beschouwd. De slibproduktie is dan nagenoeg nihil en er zou voor de biofilm op de drager sprake zijn van een "maintenance situatie". Dit is de situatie zonder slibgroei, zoals ook gerealiseerd is bij proefnemingen door Gist-brocades bij zuivering van gefiltreerd afvalwater [2, 3].
- b. Al het gesuspendeerde materiaal in het effluent is slibproduktie. De slibproduktie bedroeg dan in de periode dag 51-93 11-12 kg CZV/m³.dag of circa 0,6 kg CZV/kg verwijderde CZV.dag. Dit zou echter inhouden dat alle sediment van het influent zou worden omgezet in de airliftreactor, hetgeen bij deze korte verblijftijden onwaarschijnlijk is.

Op de volgende manier kan een meer genuanceerde schatting worden gemaakt. Ervan uitgaand dat de werkelijkheid tussen a) en b) in zal liggen, is hierna een rekenvoorbeeld opgenomen waarbij uitgegaan wordt van een situatie met "geregelde" slibafvoer. Deze slibafvoer zou dan bestaan uit:

- gesuspendeerd, minder goed afbreekbaar materiaal uit het influent;
- uitgespoeld dragermateriaal;
- van biolagen losgeraakte biomassa;
- losse, in suspensie gegroeide, biomassa.

In het rekenvoorbeeld wordt de hoeveelheid biomassa aan de drager op 10 g CZV-biomassa/l gesteld. Tevens wordt ervan uitgegaan, dat de aangroei-snelheid gedurende de "periode van aangroei" representatief is voor de situatie met geregelde slibafvoer en hieraan ook gelijk is. Bij de experimenten in dit onderzoek trad er in de beginfase immers een in de regel lineaire groei van de biomassa op (periode van regelmatige aangroei). De aangroei-snelheid is voor het gebruikte afvalwater redelijk reproduceerbaar. Behalve de aard van de drager hebben ondermeer het CZV van het influent en de verblijftijd (c.q. belasting) hierop invloed. In tabel 5.5 is het rekenvoorbeeld nader uitgewerkt.

Tabel 5.5 Berekende afvoer van begroeide drager en de slibleeftijd voor het handhaven van hoeveelheid biomassa op een niveau van 10 g CZV-biomassa/l

Kolom nummer	6/8	7	9	8+9
Verblijftijd (uur)	0,5	1,0	0,5 ¹⁾	0,5+0,5
Aangroeisnelheid (mg CZV-biomassa/l.dag)	470	340	190	$\frac{470+190}{2}$
Afvoer begroeide drager met 10 g CZV-biomassa/l (%-kolominhoud per dag)	4,7	3,4	1,9	3,3
Berekende "slibleeftijd" (dagen)	21	29	53	30

1) In serie met kolom 8.

De gegevens uit tabel 5.5 zijn verder verwerkt in tabel 5.6. De hoeveelheid biomassa wordt ook hier op 10 g CZV-biomassa/l gesteld en de dragerconcentratie op 200 g/l. De afvoer van begroeide drager in tabel 5.5 was de grondslag voor de berekening van het bijvullen van de schone drager, bijvoorbeeld voor $t = 0,5$ uur: $200 \text{ g/l} \times 0,047 \text{ l/l.d} = 9,4 \text{ g/l.d} = 9,4 \text{ kg/m}^3\text{.d}$.

Tabel 5.6 Slibproductie, berekend uit CZV-balans en aangroeisnelheid (25 l schaal)

Kolom nummer	6/8	7	8+9
Verblijftijd (uur)	0,5	1	0,5+0,5
Aantal i.e./m ³ *	300	150	150
bijvullen schone drager			
(kg/m ³ .dag)	9,4	6,8	6,6
(g/i.e.dag)	31	45	44
groei op de drager (uit tabel 5.5)			
(kg CZV-biomassa/m ³ .dag)	0,470	0,34	0,33
(g CZV-biomassa/i.e.dag)	1,6	2,3	2,2
gesuspendeerd materiaal in effluent (uit tabel 5.4)			
(kg CZV/m ³ .dag)	12	6	6
(g CZV/i.e.dag)	40	40	40

* 1 i.e. = 1 inwonerequivalent; komt bij voorbezonken afvalwater overeen met 100 g CZV/dag.

Bij een hydraulische verblijftijd van 0,5 uur bedraagt de slibaangroei aan de drager 1,6 g CZV biomassa/i.e.dag. Bij 1 uur 2,2-2,3 g CZV biomassa/i.e.dag. Het maakt niet veel uit of deze verblijftijd van 1 uur in één kolom of in twee in serie geschakelde kolommen werd gerealiseerd. De hoeveelheid gesuspendeerd materiaal in het influent en het effluent kwam overeen met circa 40 g CZV/i.e. dag.

In figuur 5.5 is de hiervoor berekende slibproductie voor een verblijftijd van 0,5-1 uur in twee stromen weergegeven:

- water : afscheiding van gesuspendeerd materiaal in een nabehandelingsstap;
- drager: a) recirculatie van drager na geheel of gedeeltelijk afscheiden van biomassa (onthechten/afkalven);
b) afvoer van begroeide drager en suppletie van schone drager.

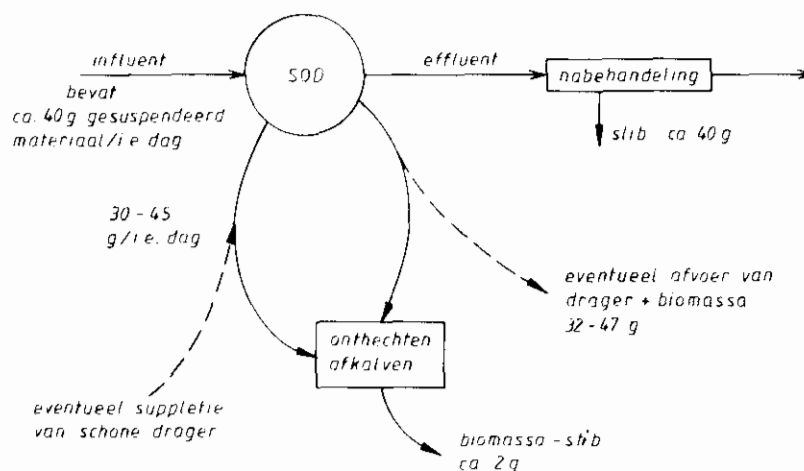


Fig. 5.5 Schematisch overzicht van de berekende slibafvoer bij een ingestelde CZV-biomassa van 10 g/l, gebaseerd op gegevens van serie 4, 25 l kolommen.

Het is duidelijk dat gezien alle onzekerheden die aan de berekeningswijze kleven deze figuur met de nodige voorzichtigheid gehanteerd moet worden. De reden om deze figuur toch te presenteren is dat deze als "kapstok" voor discussie over deze materie kan dienen.

6. EVALUATIE

Het onderzoek was primair gericht op de vraag of het Gist-brocades ontwerp voor een airliftreactor in beginsel mogelijkheden biedt voor de zuivering van stedelijk afvalwater. Bij de uitgevoerde experimenten is vooral aandacht geschonken aan:

- ontwikkeling van een stabiele biofilm op het dragermateriaal bij stedelijk afvalwater;
- selectie van dragermaterialen;
- de mogelijkheid een hoge biomassaconcentratie (15-30 kg/m³) in de reactor te verkrijgen te handhaven bij een korte vloeistofverblijftijd (0,5 -1,0 uur);
- het zuiveringsrendement voor CZV en N;
- effect van een meertrapsconfiguratie op het zuiveringsrendement;
- ontwikkeling van methoden t.b.v.: karakterisering biofilm, monstername uit een airliftreactor en dergelijke.

6.1 BIOFILMVORMING EN PROCESSTABILITEIT

Er is vastgesteld dat de turbulente omstandigheden in een airliftreactor de vorming van een biofilm niet verhinderen, tenzij het luchtdebiet tot een tamelijk extreem niveau (zeer veel hoger dan nodig is om in de O₂-behoefte te voorzien) wordt opgevoerd.

De biofilmvorming wordt bepaald door:

- de vloeistofverblijftijd in de reactor, c.q. de belasting van de kolom;
- het beschikbare hechtingsoppervlak (m²/m³);
- de systeemtemperatuur;
- de eigenschappen van het oppervlak van het dragermateriaal;
- de aanwezigheid van draadvormende organismen.

De snelheid van biofilmvorming wordt vooral bepaald door de eerste drie van deze parameters. De combinatie van een korte vloeistofverblijftijd (< 1 uur), een relatief klein hechtingsoppervlak (circa $2500 \text{ m}^2/\text{m}^3$) en een vrij hoge systeemtemperatuur (15 à 17°C) leidt tot een zeer snelle ontwikkeling van de biofilm. De filmvorming verloopt trager, maar lijkt beter controleerbaar, zodra van deze combinatie wordt afgeweken.

De ontwikkeling van een biofilm verloopt, bij een opstelling in serie, in de eerste kolom (uiteraard) veel sneller dan in de 2e, 3e enz. kolom.

Bij een snelle groei van de biofilm blijken de microorganismen zich niet alleen in de poriën, maar ook op gladde "buitenoppervlakken" te hechten. Bij een langzame ontwikkeling start de hechting daarentegen preferent op beschutte plaatsen. Dit betekent dat dragermaterialen die erg poreus zijn (puimsteen), of die over een ruw oppervlak beschikken (lava) in beginsel beter bruikbaar zijn dan b.v. zilverzand (vrij glad en nauwelijks poreus). De hechting van de biomassa aan poreuze, ruwe drager is ook bijzonder stevig, hetgeen overigens niet zonder meer een voordeel behoeft te zijn. Bij de laatste proefserie in de 2 l kolommen werd vastgesteld dat een snelle biofilmvorming door draadvormende organismen de vorming van een echte biofilm, op nieuwe korrels, verhinderde.

Er was vrijwel steeds sprake van een redelijke overeenstemming tussen de microscopische waarnemingen van de biofilmontwikkeling en de uitkomsten van de analyses waarmee het proces kwantitatief gevolgd werd. Het verschil tussen de microscopische waarnemingen bestaat vooral uit de vroegtijdige opmerking van een ongewenste ontwikkeling (bijv. de groei van draadvormende organismen of een massale vlokvorming) of juist gewenste ontwikkelingen (bijv. groei van protozoën). Op deze wijze werd al enig kwalitatief inzicht in de biofilmvorming (vorming) verkregen. Ook het zuiveringsrendement (b.v. *welgeen* of *malg* of *malg* oxidatie) zegt iets over de samenstelling van de biofilm. Daarnaast is er heel weinig informatie over de kwalitatieve aspecten van biofilmontwikkeling beschikbaar. Een verbreding van de kennis, vooral van processen die de samenstelling, de activiteit en de vorm van de biofilm bepalen, is dus noodzakelijk voor de verdere ontwikkeling van het slibopdragerconcept.

De hoeveelheid biomassa in het systeem nam bij de meeste proeven vrijwel lineair in de tijd toe, tot een soort stabilisatieniveau werd bereikt. De zeer snelle, en niet controleerbare, ontwikkeling van de biofilm bij serie 1 vertoonde een logaritmisch aangroepatroon. Met puimsteen als dragermateriaal werden "lineaire" aangroeisnelheden van 300 - 830 mg CZV-biomassa/l reactor.dag vastgesteld. Dit proces lijkt goed reproduceerbaar te zijn. De aangroeisnelheid wordt primair bepaald door de belasting van de kolom en secundair door de systeemtemperatuur. Een groter hechtingsoppervlakte leidt niet tot een andere aangroeisnelheid, maar beïnvloedt wel de dikte van de biofilm (minder biomassa per korrel drager).

Lava, biogrog en puimsteen zijn alle drie geschikt om als drager in een airliftreactor te worden gebruikt. De aangroeisnelheid op lava en biogrog bleef iets achter bij die op puimsteen. Zilverzand (te glad → slechte hechting), zirkoonzand (te zwaar) en elektrografiet worden minder geschikt geacht om als dragermateriaal in een airliftreactor te fungeren.

De aangroeiperiode duurde 4-8 weken (serie 1: 1-2 weken). De hoeveelheid biomassa aan de drager, na de aangroeiperiode, bedroeg bij een verblijftijd van 0,5-1 uur 10-30 g CZV-biomassa/l (globaal = droogrest). Bij het verkennend onderzoek met langere verblijftijden bleef de hoeveelheid biomassa aan de drager in de 2e, 3e of 4e trap beperkt tot 3-5 g CZV biomassa/l.

De dikte van de biolaag bedroeg maximaal 250 μm . Een groter hechtingsoppervlak leidt tot een dunnere biofilm. Het bleek dat niet alleen de hoeveelheid biomassa van belang is, maar ook de dikte van de biolaag. Er zijn aanwijzingen dat een biolaag met een dikte van 25 - 50 μm optimaal is.

De hoeveelheid biomassa in de kolom fluctueerde na de aangroEIFase vaak aanmerkelijk. De aanwezigheid van zeer veel draadvormende organismen (*Thio-trix*) was in een aantal gevallen de voornaamste oorzaak van de onvoldoende processtabiliteit. Deze bacteriën ontwikkelden zich echter alleen bij vloeistofverblijftijden van 0,4 - 0,8 uur zeer massaal. Dit had na verloop van tijd steeds uitspoeling van dragermateriaal tot gevolg.

Hoge aangroeisnelheden resulteerden daarnaast bij enkele experimenten in het ontstaan van aggregaten, door het samenballen van deeltjes, en/of actief-slibvlokken. Ook dit ging gepaard met grote verliezen aan dragermateriaal.

De grote schommelingen in de hoeveelheid biomassa kunnen overigens niet steeds hierdoor worden verklaard. Het lijkt waarschijnlijk dat ook een te

hoog gehalte aan biomassa in het systeem vrijwel automatisch leidt tot een instabiele situatie. De reactor groeit min of meer vol waardoor gemakkelijk uitspoeling zal plaatsvinden.

Resumerend kan worden gesteld dat het kweken van voldoende, gehechte biomassa in een airliftreactor mogelijk is, ondanks de turbulente omstandigheden in het systeem. De beste resultaten (snelste aangroei en hoogste gehalte aan biomassa) werden verkregen met het dragermateriaal puimsteen. De relatief lage dichtheid en geringe mechanische sterkte van puimsteen zijn echter nadelig. Bovendien heeft verkennend onderzoek uitgewezen dat de biomassa zeer sterk aan de korrels puimsteen is gebonden. Lava en biogrog zijn waarschijnlijk redelijke alternatieven indien naast de biofilmontwikkeling ook het gewicht van korrel + film en de mogelijkheden voor onthechting belangrijke selectiecriteria gaan vormen.

De processtabiliteit laat vooralsnog, vooral vanuit het oogpunt van biolaagdiktebeheersing, te wensen over en verdient een hoge prioriteit bij verder onderzoek.

6.2 DE ZUIVERING VAN STEDELIJK AFVALWATER IN EEN DRIE-FASEN AIRLIFTREACTOR

De kennis omtrent de zuiveringstechnische aspecten is vooral verkregen met puimsteen en lava als drager (korreldiameter: 0,175 - 0,3 mm). Proefnemingen met andere dragers (korreldiameter 0,1-0,2 mm) duurden meestal te kort om tot een "stabiele" bedrijfsvoering te komen.

Bij een verblijftijd van 0,5-1 uur varieerde de slibbelasting, afhankelijk van de hoeveelheid biomassa in de reactor, van 1 tot 2,5 kg CZV/kg CZV-biomassa/dag. Voor de vergelijking van een slib-op-dragersysteem met een actief-slibstelsel of met oxydatiebedden is de toegepast volumebelasting een betere maat (10-30 kg CZV/m³.dag).

Het zuiveringsrendement dat bij deze hoge volumebelastingen werd gerealiseerd, werd in sterke mate beïnvloed door het hoge gehalte aan zwevende stof in het effluent. Dit bestond niet uit slibvlokken e.d., maar uit fijn gesuspenderd materiaal dat niet/nauwelijks sedimenteerde in een nabezinktank.

De hoeveelheid gesuspendeerd materiaal in het effluent was, zolang geen grote verliezen aan begroeide drager plaatsvonden, globaal gelijk aan dat in het voorbezonden influent. Dit suggereert dat een biolaag in een drie-fasen airliftreactor, bij een hydraulische verblijftijd van 0,5-1,0 uur, voornamelijk opgelost materiaal op zou nemen. Deze opname zou bovendien niet gepaard gaan met de produktie van surplusslib! Deze mogelijkheid lijkt vooralsnog weinig reëel. Er zijn aanwijzingen, hoewel deze nog niet gekwantificeerd konden worden, dat het gesuspendeerde materiaal in het effluent voor een deel bestaat uit resten van biofilms. Voor de verdere ontwikkeling van het slib-op-dragersysteem dient onderzoek gericht op de karakterisering en de verwijdering van dit gesuspendeerde materiaal een hoge prioriteit te krijgen.

Wanneer de effluentkwaliteit wordt beoordeeld op basis van de analyses van gefiltreerde monsters, dan wordt bij een hydraulische verblijftijd van 0,5 uur (volumebelasting circa 30 kg CZV/m³.dag) een CZV-verwijdering van 70-80% gerealiseerd. Bij een verblijftijd van 1 uur stijgt dit percentage tot 80-85%.

Het was opvallend dat de toename van de CZV-verwijdering geen gelijke tred hield met de ontwikkeling van de biofilm. De ontwikkeling van de biofilm duurde bij de meeste proeven 4-8 weken, terwijl 1-2 weken na de start vaak al CZV-verwijderingsrendementen > 50% werden vastgesteld. De hiervoor genoemde, uiteindelijke gerealiseerde percentages werden al bereikt voordat de aangroefase van de biofilm was voltooid. Dit betekent dat het dikker worden van de biofilm niet gepaard ging met een stijging van het zuiveringsrendement. Dit lijkt in beginsel uiteraard het streven naar een zo hoog mogelijk gehalte aan biomassa in een airliftreactor te ondergraven, maar toont aan dat (te) dikke biofilms moeten worden vermeden. Veel biomassa in dunne lagen bij een groot specifiek drageroppervlak (fijn dragermateriaal) is in dit opzicht te prefereren.

Een overweging om echter niet te streven naar een maximale hoeveelheid biomassa betreft het effect hiervan op de hydraulische verblijftijd. In deze rapportage worden steeds verblijftijden van 0,5 en 1,0 uur genoemd. Dit zijn echter verblijftijden berekend voor een lege reactor. De toevoeging van dragermateriaal en de fractie van luchtbellen leidt tot een kortere verblijftijd. Dit proces wordt uiteraard versterkt naarmate de biofilmvorming

toeneemt. Een schatting, op basis van de diameter van drager + biofilm van het na verloop van tijd nog resterende "vrije" volume levert percentages op van circa 20% (serie 1) tot 70% (serie 2). Dit is exclusief het volume dat door de mantel van draadvormende organismen werd ingenomen! Dit heeft als consequentie dat de hydraulische verblijftijd tijdens het verloop van een proef daalde tot soms extreem lage waarden. De consequenties hiervan voor het airlifreactor-principe en de mogelijke gevolgen voor de ontwikkeling van de biofilm in het systeem kunnen nog niet goed worden overzien.

Bij diverse experimenten werden de korrels na verloop van tijd massaal gekoloniseerd door sessiele ciliaten. Er zijn aanwijzingen dat hun aanwezigheid gepaard gaat met een verbetering van het zuiveringsrendement, of een betere verwijdering van gesuspendeerd materiaal. De beschikbare resultaten zijn nog ontoereikend om deze hypothese kwantitatief te ondersteunen.

Gezien de geringe nitrificatie in hoger belaste actief-slibinstallaties is de nitrificatie in de drie-fasen slib-op-dragerreactor eigenlijk van nog grotere betekenis. Er kon een vergaande nitrificatie worden bereikt bij hoge hydraulische belastingen gecombineerd met CZV-verwijdering. De ontwikkeling van een nitrificerende populatie duurde bij een vloeistofverblijftijd van 1 uur circa 100 dagen; bij langere verblijftijden ging het uiteraard sneller. Het is te verwachten dat bij een verblijftijd van 1,5-2,5 uur een volledige nitrificatie mogelijk is.

Door de grote doorvoer van gesuspendeerd materiaal konden nog geen betrouwbare cijfers over de slibproductie worden verkregen. Er zijn indicaties dat de slibproductie laag was; de aangroei aan de drager was relatief gering ten opzichte van de hoeveelheid verwijderde CZV: $< 0,1$ kg CZV-slib/kg verwijderde CZV.dag (actief slib: circa 1 kg CZV slib/kg verwijderde CZV.dag).

Resumerend kan worden gesteld, dat ook voor het zuiveringstechnische gedeelte van de vraagstelling geldt dat de, bij Gist-brocades ontwikkelde, airlifreactor in beginsel bruikbaar is voor de zuivering van stedelijk afvalwater. Aan de oorspronkelijke vraagstelling is hiermede voldaan. In hoeverre het systeem daadwerkelijk toekomstperspectieven heeft zal in sterke mate afhangen van het feit of de tijdens dit onderzoek gesignaleerde knelpunten

opgelost kunnen worden. Voorlopig heeft dit onderzoek, zoals bij de ontwikkeling van een nieuw proces niet ongebruikelijk is, meer vragen opgeroepen dan opgelost. Hierop wordt in de laatste paragraaf nader ingegaan.

Uit de resultaten van het onderzoek is duidelijk geworden dat het voor een uitvoerige vergelijking met andere (slib-op-drager) systemen nog te vroeg is. Een gedetailleerde haalbaarheidsstudie is thans niet opportuun, gezien de vele vragen die vooral op het gebied van de microbiologische processen nog open blijken te staan.

6.3 PUNTEN VOOR NADER ONDERZOEK

In de loop van het uitgevoerde onderzoek werden knelpunten en vragen gesignaleerd. Sommige van deze vragen moeten worden beantwoord om de toepasbaarheid van het slib-op-drager principe beter te kunnen beoordelen. Andere punten betreffen de fundamentele onderbouwing van het proces, omdat een zuiver empirische basis vaak ontoereikend is voor het optimaliseren van een proces of voor het efficiënt oplossen van gesignaleerde problemen. Het actiefslibproces is wat dit betreft een sprekend voorbeeld.

In deze paragraaf wordt in feite een opsomming gegeven van onderwerpen die in de toekomst zouden kunnen/moeten worden onderzocht. Ter afsluiting worden prioriteiten gesteld.

Biofilmvorming en processtabiliteit

Het onderzoek heeft vrij veel informatie opgeleverd over de factoren die de biofilmvorming bepalen. Op basis van dit inzicht zijn enkele vragen geformuleerd die bij verder onderzoek aan de orde dienen te komen.

De periode volgend op de lineaire aangroefase werd veelal gekenmerkt door vrij sterk fluctuerende gehalten aan biomassa in de kolommen. Er was meestal geen sprake van een stabiele situatie. Hierdoor kon onvoldoende inzicht worden verkregen in de relatie CZV-volumebelasting/uiteindelijk gehalte aan biomassa, en de daarmee gepaard gaande zuiveringsrendementen. De sterke fluctuaties kunnen maar ten dele worden verklaard uit bijvoorbeeld de aanwezigheid van draadvormende organismen, het aggregeren van dragermateriaal of de vorming van een actief-slibstelsel in de kolommen.

In aansluiting op het uitgevoerde onderzoek kunnen o.a. de volgende vragen worden gesteld:

A. Fundamentele

- welk gedeelte van de biofilm is actief;
- is bij een snelle of langzame aangroei sprake van verschillende hechtingsmechanismen;
- beïnvloeden de aangroeijsnelheid en de populatiesamenstelling elkaar;
- welke biopolymeren spelen een rol bij het hechtingsproces;
- is het mogelijk de productie van deze biopolymeren te stimuleren;
- kunnen de biopolymeren "eenvoudig" vernietigd worden;
- kan een concentrisch begroeide korrel meer/sneller substraat opnemen dan een niet-concentrisch begroeid deeltje;
- vindt in een niet uniform begroeid systeem (weinig korrels met een dikke film, veel korrels met weinig/geen aangroei) de toename van de biomassa voornamelijk via groei aan de al dik begroeide korrels plaats en leidt dit automatisch tot uitspoeling van dit soort korrels na verloop van tijd;
- is een dunne film, uit het oogpunt van substraat- en zuurstofopname te verkiezen, bij welke dikte van de biolaag vindt diffusielimitering plaats;

B. Toepassings- en probleemgerichte

- ontwikkelen draadvormende organismen zich uitstekend massaal bij vloeistofverblijftijden < 1 uur;
- is de groei van o.a. *Thiothrix* een gevolg van de aanwezigheid van sulfide in het influent of van de C/N-verhouding;
- kan een te snelle ontwikkeling van de film voorkomen worden door een kolom bij de start te vullen met al bezwaard drage materiaal. Tot welke startprocedure leidt dit;

- moet de biolaagdikte "actief" beheerst worden. Zoja, moet dit gebeuren door mechanische verwijdering of via de belasting van de reactor;
- welke gehalten aan biomassa kunnen na een lange, stabiele periode worden bereikt;
- wordt de dikte van de biofilm beïnvloed door de turbulentie in het systeem;
- kan de biomassa kwalitatief gekarakteriseerd worden;
- op welke wijze wordt het bezinkgedrag van de korrels beïnvloed door de aanwezige biofilm, biedt dit mogelijkheden om het begroeide materiaal te fractioneren;
- hoe verloopt de herangroei op deeltjes waarvan de film (gedeeltelijk) is verwijderd.

C. Met de reactor samenhangende

- heeft het creëren van een substraatgradiënt over de reactor een gunstige invloed op de samenstelling van de biomassa (vergelijk 'tapered aeration');
- kunnen tijdelijke variaties in de filmdikte gerelateerd worden aan de bedrijfsomstandigheden;
- kan gesuspendeerd materiaal in de biomassa van het reactorsysteem worden gevangen;
- op welke wijze wordt het functioneren van een airliftreactor beïnvloed door een sterke toename van de biomassa in het systeem ("vol raken" van reactor).

Zuiveringsprestatie

Vergeleken met conventionele actief-slibinstallaties is een aanzienlijke volumebesparing mogelijk. Het lijkt erop dat een verblijftijd van 1 uur of hoger gunstig is, zowel voor het zuiveringsrendement als voor een stabiele bedrijfsvoering. Bij een vervolgonderzoek zullen dan ook, naast experimenten met korte verblijftijden, proeven bij langere verblijftijden moeten worden

uitgevoerd. Dit vooral gezien de mogelijk vergaande nitrificatie onder die omstandigheden. Overigens is, vergeleken met conventionele zuiveringsinrichting een "langere" verblijftijd van 1-2 uur nog kort.

De hoeveelheid gesuspendeerd materiaal in het effluent is bij een verblijftijd van 0,5-1 uur groot. De hoeveelheden in influent en effluent zijn nagenoeg gelijk. De herkomst van het gesuspendeerde materiaal in het effluent is niet bekend; is dit doorgespoelde zwevendstof uit influent, gevormde biomassa of een combinatie van beide? Onderzoek met gefiltreerd of gecentrifugeerd influent zou nader inzicht kunnen verstrekken omtrent de herkomst van het gesuspendeerde materiaal. Daarnaast kan gedacht worden aan een voor- of nabehandeling met een actief-slibinstallatie voor de verwijdering van zwevendstof.

Op basis van het voorafgaande kan een aantal voornamelijk toepassingsgerichte vragen worden geformuleerd:

- welke rendementen kunnen bij een stabiele bedrijfsvoering en bij verschillende vloeistofverblijftijden worden bereikt;
- heeft de dikte van de biofilm invloed op de effluentkwaliteit;
- welke rol spelen de soms zeer massaal aanwezige ciliaten (verwijdering gesuspendeerd materiaal ?);
- wat is de herkomst van het in het effluent aanwezige gesuspendeerde materiaal;
- is het mogelijk dit gesuspendeerde materiaal in een airlifthereactor te verwijderen;
- op welke manier beïnvloedt de temperatuur het zuiveringsrendement?
- welke voordelen biedt een denitrificatiekolom als tweede of derde trap.

Biofilmcontrole

Geblijken is dat, zeker bij verblijftijden van 0,5 uur, slijfvoer plaats zal moeten vinden ten behoeve van biofilmcontrole. Deze gecontroleerde afvoer lijkt minder nodig bij verblijftijden van 1 - 2 uur. Nauwkeurige informatie over de slibproductie is nog niet beschikbaar. De afgevoerde drager kan

vervangen worden door schoon materiaal. Het is waarschijnlijk ook mogelijk om de aanwezige film te verwijderen en het schone materiaal terug te voeren. Daarnaast kan ook worden overwogen of het misschien mogelijk is om alleen dik begroeide korrels selectief uit het systeem te verwijderen en op deze wijze de afvoer van surplusslib te regelen. Bij verder onderzoek moet aandacht worden gegeven aan:

- slibproductie bij diverse vloeistofverblijftijden;
- methoden om (gehecht) surplusslib aan een slib-op-dragersysteem te onttrekken;
- karakterisering van het surplusslib (indikkingseigenschappen, ontwateringsmogelijkheden, e.d.).

Prioriteiten bij toekomstig onderzoek

Stabiliteit en rendement van het zuiveringsproces zijn essentiële factoren bij de verdere ontwikkeling van slib-op-dragersystemen.

Toekomstige experimenten zouden dan ook primair gericht moeten zijn op:

Het realiseren en beheersen van een constant gehalte aan biomassa in de reactor. Dit impliceert dat de groei van draadvormende bacteriën en het ontstaan van actief-slibvlokken in elk geval moeten worden voorkomen. Op basis van de nu beschikbare informatie lijkt een vloeistofverblijftijd 1 á 2 uur een redelijke garantie te bieden ter voorkoming van dit soort problemen. Te veel biomassa in de airliftreactor lijkt daarnaast ook bij te dragen tot een instabiel proces. Een logische verklaring (te volle reactoren?) voor dit verschijnsel is nog niet beschikbaar. Een experiment waarbij voorkomen wordt dat de biofilm doorgroeit tot het stabilisatieniveau is bereikt zou deze hypothese kunnen bevestigen. Bij zo'n experiment zou tevens kunnen worden nagegaan of het uit het oogpunt van effluentkwaliteit wel wenselijk/noodzakelijk is dat zoveel mogelijk biomassa in de reactor aanwezig is.

Het zuiveringsrendement wordt tot nu in sterke mate negatief beïnvloed door het hoge gehalte aan zwevend stof in het effluent. Gerichte maatregelen kunnen pas worden genomen zodra de herkomst en de kwaliteit van dit materiaal bekend zijn.

7. LITERATUUR

1. Voorneburg, F. van en B.A. Heide
Mogelijkheden van slib-op-dragersystemen voor de aërobe biologische zuivering van stedelijk afvalwater (literatuurstudie).
TNO, Gist-brocades, Ministeries VROM, EZ, L&V en V&W, STORA, 1986.
Uitgegeven door STORA, 's-Gravenhage.
2. Heijnen, J.J. en P.A. Lourens
Biologische afvalwaterzuivering met behulp van fluid bed systemen.
Interimrapport 1977-1982, Gist-Brocades N.V., Delft, mei 1984.
3. Heijnen, J.J.
Biological industrial waste-water treatment minimizing biomass production and maximizing biomass concentration.
Proefschrift Technische Hogeschool Delft,
Delft Universiteitspress, 1984.
4. Centraal Bureau voor de Statistiek
Waterkwaliteitsbeheer, deel b, zuivering van afvalwater 1982-1983.
Staatsuitgeverij/CBS-publicaties, 's-Gravenhage, 1986.
5. Eikelboom, D.H. en H.J.J. van Buijsen
Microscopic Sludge investigation manual.
Report A 94a, second edition, March 1983, TNO, Delft.