

NN31085.90-07

i g e

g e n e r e l e r i o o l w a t e r -
z u i v e r i n g s i n r i c h t i n g e n

rwzi
2000

R90-07

LINPOR-SPONSJES ALS DRAGERMATERIAAL BIJ DE AEROBE ZUIVERING VAN RIOOLWATER



Ministerie van Volkshuisvesting,
Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

directoraat-generaal milieubeheer
postbus 450, 2260 MB Leidschendam 070- 3209367

RIZA

rijkswaterstaat
rijksinstituut voor integraal zoetwaterbeheer
en afvalwaterbehandeling

postbus 17, 8200 AA IJlstad 03200-70411



stichting toegepast onderzoek
reiniging afvalwater

postbus 80200, 2508 GE den haag 070-3512710

ie rioolwaterzuiveringsinrichtingen RWZI 2000

postbus 17, 8200 AA Lelystad 03200 - 70467



STANHOOGBOUW

LINPOR-SPONSJES ALS DRAGERMATERIAAL BIJ DE AEROBE ZUIVERING VAN RIOOLWATER

STANHOOGBOUW



VROM MT 1990/8

RWZI 2000 90-07

21 MAART 1991

auteur(s):

TNO - MT:

ir. D.H. Eikelboom
dr. E.A.M.A. Bral

INHOUD

	pag.
VOORWOORD	3
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	7
2. HET LINPOR PROCES	9
3. SAMENVATTING VAN FASE I EN DE INTERIMPERIODE	11
4. PROGRAMMA EN UITVOERING VAN FASE II	15
4.1 Onderzoekprogramma	15
4.2 Proefinstallaties en procesomstandigheden	16
4.3 Bemonstering en analyses	19
5. RESULTATEN	21
5.1 Ontwikkeling van de gehechte biomassa	21
5.2 Belastingen	22
5.3 Microscopisch onderzoek	24
5.4 Bezinkeigenschappen van de vrije slibben	28
5.5 CZV-verwijdering	29
5.6 Nkj-verwijdering/stikstofomzettingen	32
5.7 Activiteitsmetingen	36
5.8 Slibproductie	39
5.9 Processtabiliteit	40
6. DISCUSSIE	43
6.1 Droge-stofgehalte in de sponsjes	43
6.2 Kwaliteit en transport	44
6.3 Evaluatie van de uitgevoerde proeven	49
6.4 Praktijkervaringen en zuiveringstechnische perspectieven	55
6.5 Enkele economische aspecten	59

INHOUD (vervolg)

	pag.
7. CONCLUSIES	63
8. REFERENTIES	65
BIJLAGE A ZUURSTOFGEHALTES IN DE REACTOREN 1 t/m 4	71
BIJLAGE B ANALYSE-UITKOMSTEN (CZV EN Nkj) VAN DE REACTOREN 1t/m 4	73
BIJLAGE C DE INVLOED VAN TRANSPORT VAN VOEDINGS- STOFFEN OP DE BIJDRAGE VAN HET SLIB IN DE SPONSJES AAN HET ZUIVERINGSPROCES	75

VOORWOORD

Sinds enkele jaren besteedt MT-TNO aandacht aan de toepassingsmogelijkheden van slib-op-dragersystemen bij de zuivering van stedelijk afvalwater. Met de toepassing van dragermaterialen wordt beoogd het gehalte aan biomassa in een reactor aanmerkelijk op te voeren, waardoor bij gelijkblijvende zuiveringsprestaties hogere volumebelastingen toegepast kunnen worden.

Bij het Linpor-proces worden kubusvormige sponsjes van polyurethaanschuim als drager van biomassa toegepast in de beluchtingsruimte van een actief-slibinstallatie of in een aparte tank voor nitrificatie van effluent.

Het voorliggende rapport geeft de resultaten van het onderzoek naar de toepassing van het Linpor-proces bij de zuivering van stedelijk afvalwater. Gebleken is dat door het gebruik van de sponsjes een stabiel zuiveringsproces wordt verkregen en een betere nitrificatie, met name bij lagere temperaturen. De CZV-verwijdering nam enigszins toe, maar een lagere slibproductie is niet geconstateerd.

Het Linpor-proces lijkt derhalve geschikt voor de toepassing in specifieke omstandigheden, zoals verbetering van de processtabiliteit bij overbelaste actief-slibinstallaties of verbetering van de nitrificatie bij net niet of onvolledig nitrificerende installaties. Het proces is echter relatief duur.

Het onderzoek is uitgevoerd door MT-TNO in kader van het onderzoekprogramma RWZI-2000 (projectnr. 3.2.2.8), de Stimuleringsregeling Milieutechnologie (projectnr. 15120/0310) en het door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat gefinancierde doelsubsidieprogramma. De begeleidingscommissie bestond uit Ir. C. van Beersum, Ir. C.H. van Haastrecht, Ir. P.C. Stamperius, Prof.Dr A.H. Stouthamer, Ir. A.J. van der Vlugt en Ir. T.W.M. Wouda.

Lelystad, september 1990

Voor de Stuurgroep RWZI-2000

Dr. J. de Jong
(voorzitter)

SAMENVATTING

MT-TNO heeft de toepassingsmogelijkheden van het Linpor-proces bij de aërobe zuivering van stedelijk afvalwater onderzocht. Bij dit proces worden kubusvormige sponsjes (grootte ca. $2,5 \text{ cm}^3$; porositeit 94%) van polyurethaanschuim als drager van biomassa toegepast, in de beluchtingsruimte van een actief-slibinrichting (Linpor C en C/N) of in een aparte tank voor nitrificatie van effluent (Linpor N). Met de toepassing van dragermaterialen wordt beoogd het gehalte aan biomassa in een reactor aanmerkelijk op te voeren en zo de volumebelasting te verhogen, zonder dat het zuiveringsrendement daalt.

De toevoeging C of N betekent dat primair CZV-verwijdering respectievelijk nitrificatie wordt nagestreefd.

Het onderzoek was vooral gericht op de volgende vragen:

- is er een kwaliteitsverschil tussen het vrije en het geïmmobiliseerde slib;
- welke bijdrage kan het geïmmobiliseerde slib aan de omzetting van CZV en Kjeldahl-stikstof leveren;
- leidt de toepassing van deze poreuze drager tot een stabiel proces en minder slibproductie.

Er werden experimenten uitgevoerd op 100 l-, 600 l- en op 18 m^3 -schaal. De installaties met deze drager waren voor maximaal 20 vol.% gevuld met sponsjes. De actief-slibsystemen werden gevoed met voorbezonden, stedelijk afvalwater (volumebelasting $0,8\text{-}2,6 \text{ kg CZV/m}^3\text{.dag}$), de Linpor N installatie met effluent. Bij één experiment werd het effect van 20 vol.% sponsjes op het zuiveringsresultaat vergeleken met een andere optie om een overbelasting op te vangen, namelijk het voorschakelen van een A-trap.

diffusie-gelimiteerd transport

In/op deze drager kan $12,5\text{-}25 \text{ kg biomassa/m}^3$ sponsjes worden geïmmobiliseerd; 20 vol.% sponsjes leidt dus tot $2,5\text{-}5,0 \text{ kg gehechte biomassa/m}^3$ reactor. Het transport van voedingsstoffen in/uit de sponsjes blijkt echter diffusie-gelimiteerd te zijn, indien het droge-stofgehalte in de sponsjes groter is dan circa 10 kg d.s./m^3 sponsjes. Daarom kunnen voornamelijk de micro-organismen aan de buitenkant van de sponsjes bijdragen aan de omzetting van CZV en Nkj. De hoeveelheid actieve biomassa is dus aanmerkelijk kleiner dan deze $2,5\text{-}5 \text{ kg d.s./m}^3$ reactor. In feite wordt met de toevoeging van 20 vol.% sponsjes alleen circa 100 m^2 hechtingsoppervlak per m^3 reactor gecreëerd.

De zuurstofvoorziening in de sponsjes zal heel vaak bepalend zijn voor de bijdrage die het geïmmobiliseerde slib aan het zuiveringsproces kan leveren. Met 20 vol.% sponsjes en 2 mg O_2/l in de omringende waterfase wordt deze bijdrage onder enig voorbehoud geschat op omzettingen die corresponderen met een zuurstofverbruik van 0,5 kg O_2/m^3 reactor.dag. Dit is toereikend voor de omzetting van circa 1,5 kg CZV/ m^3 reactor.dag òf de nitrificatie van 0,11 kg N/ m^3 reactor.dag. Er moet echter wel gerekend worden op een daling van de activiteit van het vrije slib, waardoor het netto resultaat dus kleiner is. De bijdrage van het geïmmobiliseerde slib kan worden verhoogd door het zuurstofgehalte en/of het percentage sponsjes op te voeren.

zuiveringstechnische perspectieven

De toepassing van dit poreuze dragermateriaal in actief-slibinrichtingen leidt tot een (wat) betere CZV-verwijdering, vooral door de hogere zwevend-stofreductie.

Bij de voor nitrificatie kritische slibbelasting van 0,15 à 0,2 kg BZV/kg d.s.dag, is op de sponsjes een relatief grote nitrificerende populatie aanwezig. Ook gedurende de winter lijkt vergaande nitrificatie daardoor mogelijk. Bij hogere slibbelastingen verdwijnen de nitrificeerders.

De bijdrage van het geïmmobiliseerde slib aan simultane denitrificatie wordt beperkt door de relatief trage diffusiesnelheid van nitraationen en organische verbindingen.

In een Linpor N installatie, met 30 vol.% sponsjes en 5-6 mg O_2/l , kan 0,3-0,5 kg N/ m^3 reactor. dag genitrificeerd worden.

De toepassing van deze drager zal alleen tot een lagere slibproductie kunnen leiden, indien in de sponsjes een omvangrijke wormenpopulatie gehandhaafd kan worden. Dit punt vereist nader onderzoek.

Linpor leidt tot een iets beter CZV-rendement dan het voorschakelen van een A-trap. De overige verschillen tussen deze twee opties om een overbelasting op te vangen waren minimaal.

conclusie

Het Linpor-proces lijkt met name geschikt om de nitrificatie te verbeteren in actief-slibinrichtingen die net niet of onvolledig nitrificeren. Deze nitrificatie kan ook door toepassing van Linpor N bewerkstelligd worden. De investeringskosten van Linpor bedragen circa f 350,-/ m^3 tankvolume (20 vol.% sponsjes). Daarnaast moet gerekend worden op een hoger energieverbruik. Het proces is dus relatief duur.

1. INLEIDING

Aan de huidige generatie aërobe afvalwaterzuiveringsinrichtingen (= awzi's) zijn enkele bezwaren verbonden. Dit betreft, naast de forse slibproductie, vooral de lage volumebelasting die toegepast moet worden om aan de gestelde effluenteisen te kunnen voldoen. Een lage volumebelasting betekent een grote installatie, dat wil zeggen hoge bouwkosten, een fors ruimtebeslag en kostbare voorzieningen voor het bestrijden van stankemissie en geluidhinder.

De limitering van de volumebelasting is het gevolg van het lage gehalte aan (actieve) biomassa dat in conventionele systemen kan worden gehandhaafd en de lage slibbelasting die toegepast moet worden om vergaand te kunnen zuiveren. In actief-slibinrichtingen bijvoorbeeld beperken de bezinkeigenschappen en het volumineuze karakter van de slibvlokken het gehalte aan biomassa tot 2-4 kg/m³. Dit leidt tot maximaal mogelijke volumebelastingen van 0,2-0,4 kg BZV/m³.dag, indien ook gedurende de winter praktisch volledig genitrificeerd moet worden.

Toepassing van dragermaterialen, waaraan micro-organismen kunnen hechten, biedt mogelijkheden het gehalte aan biomassa in een reactor aanmerkelijk op te voeren en zo de volumebelasting te verhogen, zonder dat het zuiveringsrendement daalt. Hieraan draagt ook bij dat langzaam groeiende micro-organismen zich in zo'n reactor via hechting kunnen handhaven, onafhankelijk van de slibleeftijd en de hydraulische verblijftijd. Dit aspect is vooral belangrijk voor de kwetsbare, nitrificerende populatie.

Het idee om afvalwater met behulp van gehechte micro-organismen te zuiveren is niet nieuw, maar bekende, reeds decennia toegepaste slib-op-dragersystemen als oxydatiebedden en biorotoren hebben onder andere als nadeel dat een groot gedeelte van de gehechte biomassa inactief is. Het gebruik van niet geïmmobiliseerde dragermaterialen als sponsjes, zandkorreltjes of glaspereels, lijkt echter meer perspectieven te bieden, omdat bij toepassing van kleine en in het water gesuspendeerde dragerdeeltjes een veel groter hechtingsoppervlak per m³ reactor voor de micro-organismen gecreëerd kan worden [7]. Er is op veel plaatsen, en met wisselend succes, geëxperimenteerd met een grote verscheidenheid aan dragermaterialen en typen reactoren. Uit een literatuurstudie naar de mogelijkheden van diverse slib-op-dragersystemen, werd geconcludeerd dat het Linpor-proces misschien perspectieven biedt voor de zuivering van afvalwater [17]. Bij dit proces worden kleine sponsjes van polyurethaanschuim als dragermateriaal toegepast. In hoofdstuk 2 wordt het

Linpor-proces, dat ook door de EPA als veelbelovend werd beoordeeld [4], meer in detail beschreven. In het kader van het project "RWZI 2000", en met financiële ondersteuning door het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, zijn de belangrijkste toepassingsmogelijkheden bij de zuivering van stedelijk afvalwater nader onderzocht.

Het onderzoek is gefaseerd uitgevoerd. De resultaten van fase I zijn in referentie 5 gerapporteerd, ze worden samengevat in hoofdstuk 3. Opzet, uitvoering en resultaten van fase II worden in de hoofdstukken 4 t/m 6 behandeld. Conform de wens van de begeleidingscommissie is gekozen voor een zoveel mogelijk beknopte weergave van de resultaten. In hoofdstuk 6 wordt tevens ingegaan op de ervaringen die elders met dit proces zijn opgedaan.

2. HET LINPOR PROCES

Bij het in 1986 door de firma Linde* geöctrooieerde Linpor-proces [20], worden kubusvormige sponsjes van polyurethaanschuim als dragermateriaal toegevoegd aan de beluchtingsruimte van een actief-slibinrichting, of aan een aparte tank voor nitrificatie van effluent [15, 26]. De sponsjes kunnen tot maximaal 40 vol.% van de tank toegepast worden; meestal wordt echter volstaan met 20 vol.%. De sponsjes blijven permanent in de tank. Ze worden dus niet, zoals bij het Captor proces het geval is [35], periodiek uit de reactor gehaald, uitgeperst om de biomassa te verwijderen en weer gerecirculeerd.

Het idee om dit soort poreuze dragers bij de zuivering van afvalwater toe te passen is overigens niet nieuw, het oudste octrooi dateert al uit 1935 [37].

Er worden drie uitvoeringsvormen van het proces onderscheiden: Linpor C, Linpor N en Linpor C/N [22]. De toevoeging van C of N betekent dat met de toepassing van sponsjes CZV-verwijdering respectievelijk nitrificatie wordt nagestreefd. Hiertoe heeft Linde twee typen sponsjes ontwikkeld, die voornamelijk qua poriëndiameter en specifiek oppervlak van elkaar verschillen (Tabel 1).

Tabel 1 Karakteristieken van de sponsjes.

		C-spons	N-spons
poriëndiameter ¹⁾	(mm)	0,2	1
afmetingen ¹⁾	(mm)	13x13x15	13x13x15
volume ¹⁾	(cm ³)	2,5	2,5
soortelijke massa	(kg/m ³)	60	64
porositeit	(%)	93,6	94,0
specifiek oppervlak	(m ² /m ³)	2-5.10 ³	1-2.10 ³

1) globaal

De C-sponsjes zouden door hun grotere specifiek oppervlak meer slib kunnen binden dan de N-sponsjes. Ze worden toegepast bij het Linpor C proces. Hierbij worden de sponsjes toegevoegd aan de aëratietank van hoogbelaste actief-slibinrichtingen, waardoor hierin

* Deze firma heeft de sponsjes voor de diverse proeven gratis geleverd.

zowel vrij gesuspendeerd slib als op/in sponsjes geïmmobiliseerd slib aanwezig is. De hoeveelheid biomassa in de sponsjes kan oplopen tot 15 à 20 kg droge stof/m³ spons [15, 22]; met 20 vol.% sponsjes kan de slibconcentratie in een aëratietank dus globaal worden verdubbeld. Dit zou leiden tot een beter CZV-verwijderingsrendement, een lagere SVI van het vrije slib, een stabiel proces en minder slibproductie [14, 15, 26, 30].

Bij het Linpor N proces worden N-sponsjes als dragermateriaal toegepast in een aparte tank voor nitrificatie van effluent. De N-sponsjes hebben grotere poriën dan de C-sponsjes, waardoor de benodigde zuurstof gemakkelijker kan toetreden. Omdat bij deze tertiaire zuiveringsstap nauwelijks vrij gesuspendeerde biomassa wordt geproduceerd, is geen extra bezinktank vereist [12, 40]. In de literatuur worden maximale nitrificatiecapaciteiten van 0,5-0,7 kg Nkj-N/m³.dag vermeld [12, 15]. In hoofdstuk 6 wordt hier nader op ingegaan. Gelijktijdig zou het gehalte aan nog resterende BZV, CZV en zwevend stof met enkele tientallen procenten gereduceerd worden [12, 40].

Linpor C/N is een combinatie van voornoemde twee processen. Het is bedoeld voor actief-slibinrichtingen die nauwelijks nitrificeren, omdat de slibleeftijd net te kort is. Met de toepassing van N-sponsjes wordt beoogd een gehechte nitrificerende populatie van voldoende omvang in de aëratietank te handhaven, zodat genoemde voordelen van het Linpor C proces uitgebreid zouden kunnen worden met vergaande nitrificatie en soms ook gedeeltelijke denitrificatie [16, 27].

Een normale bellenbeluchting - bij propstroming gecombineerd met een mammoetpomp voor de terugvoer van de sponsjes naar het begin van de tank - is meestal toereikend voor een homogene verdeling van de sponsjes in de tank. Om bezinken van de begroeide sponsjes te voorkomen, moet soms echter wel wat meer worden belucht dan gelet op de zuurstofvraag noodzakelijk is [21]. Of de sponsjes ook in combinatie met oppervlaktebeluchting toegepast kunnen worden, is nog niet nagegaan [28].

Uitspoeling van de sponsjes wordt verhinderd door een zeefplaat met openingen van 0,8 cm voor de uitstroomopening van de tank te plaatsen. Het verstopping van de zeefplaat wordt voorkomen door ter plaatse enkele extra beluchtingselementen te installeren.

De investeringskosten van het Linpor-proces bedragen circa f 350,-/m³ tankvolume. Dit bedrag omvat 20 vol.% sponsjes, de mammoetpomp, de zeefplaat en de installatie door de firma Linde [28].

Op praktijkschaal is het proces tot nu toe in een beperkt aantal awzi's toegepast [16, 22, 27, 30].

3. SAMENVATTING VAN FASE I EN DE INTERIMPERIODE

Het onderzoek was met name gericht op de volgende vragen [5]:

- gaan laagbelaste awzi's beter nitrificeren door de toevoeging van sponsjes (= Linpor C/N);
- leidt het gebruik van deze poreuze drager tot een verbeterde CZV-reductie in hoogbelaste awzi's (= Linpor C).

De proef met Linpor C/N werd uitgevoerd in twee cascade-reactoren (R1 en R2), met elk vier compartimenten. Aan het laatste compartiment van R1 werd 20 vol.% N-sponsjes toegevoegd, R2 bevatte geen sponsjes. Voor de proef met Linpor C werden twee volledig gemengde reactoren (R3 en R4) gebruikt, waarbij aan R3 20 vol.% C-sponsjes werden toegevoegd en R4 als referentie fungeerde. De inhoud van alle reactoren bedroeg 600 l. De reactoren werden gevoed met voorbezonden, stedelijk afvalwater.

Daarnaast werd een oriënterende proef uitgevoerd in een 60 l reactor, met eveneens 20 vol.% N-sponsjes. Dit experiment was gericht op het gebruik van sponsjes voor de nazuivering van effluent, c.q. nitrificatie en zwevend-stofverwijdering (= Linpor N). Deze reactor (R5) werd gevoed met effluent van de hoogbelaste reactor zonder sponsjes (R4).

Er werd vastgesteld dat actief-slibvlokken gemakkelijk in lege sponsjes migreren. Het droge-stofgehalte in de sponsjes stabiliseerde na verloop van tijd op 10 à 15 kg d.s./m³ spons. Het gehalte aan biomassa in de beluchtingsruimte kan dus aanmerkelijk worden verhoogd door de toevoeging van deze sponsjes. Uit enkele oriënterende metingen werd voorlopig geconcludeerd dat de kwaliteit van het slib in de sponsjes niet wezenlijk leek te verschillen van het actiefslib in suspensie.

In de nazuivering (R5) nam het gehalte aan biomassa in de sponsjes echter aanmerkelijk minder snel toe dan werd verwacht. Bij het beëindigen van dit oriënterende experiment was in de sponsjes slechts 4 kg d.s./m³ spons aanwezig, hetgeen mogelijk het gevolg was van de aanwezigheid van talrijke slibconsumerende wormen in de sponsjes.

In Tabel 2 zijn enkele zuiveringsresultaten van deze proeven samengevat. De verschillen qua zuiveringsrendementen en uitkomsten van enkele procestechnologische parameters waren echter niet altijd even consistent, waarschijnlijk mede door het tijdelijk matig functioneren van de proefinstallaties.

Tabel 2 CZV-belasting (kg CZV/m³.dag) en zuiveringsrendementen (%).

	dag 0-61		dag 62-89		dag 90-106	
	R1*	R2	R1*	R2	R1*	R2
CZV-belasting	0,8	0,8	2,1	2,1	1,9	1,9
CZV-rendement	71	76	79	60	63	57
CZV-F-rendement ¹⁾	68	69	76	79	76	74
Nkj-F-rendement ¹⁾	86	77	26	39	65	65
	dag 0-61		dag 62-106			
	R3*	R4	R3*	R4		
CZV-belasting	1,2	1,2	2,6	2,6		
CZV-rendement	65	37	67	54		
CZV-F-rendement ¹⁾	59	58	72	67		

* met sponsjes

1) F = gefiltreerde monsters

Door de aanwezigheid van de sponsjes verbeterden de processtabiliteit en de CZV-rendementen. Deze hogere rendementen werden voornamelijk door de lagere gehalten aan zwevend stof in de effluënten van de reactoren met sponsjes veroorzaakt. Het ontstaan van licht slib werd door de sponsjes echter niet verhinderd.

In de cascade-reactoren was de omzetting van kjeldahlstikstof in aanwezigheid van sponsjes slechts tijdelijk beter. Betrokken op de totale aëratietank, was in R1 echter ook maar 5 vol.% van deze drager aanwezig.

In de reactor met Linpor C en in de nazuivering nitrificeerde de biomassa niet of nauwelijks. De geringe nitrificatie door het sponsjesslib bij de proef met Linpor N was opmerkelijk en werd misschien mede veroorzaakt door de aanwezigheid van slibconsumerende wormen in de sponsjes. Daarnaast speelde ook de lage temperatuur een rol.

In de 600 l reactoren kon geen duidelijk effect van de sponsjes op de slibproductie worden vastgesteld, in de nazuivering was de slibaanwas opmerkelijk gering. Hierin vond zelfs een opvallend grote zwevend-stofreductie plaats (circa 90%).

Uit fase I werd geconcludeerd dat de resultaten weliswaar minder positief waren dan volgens de leverancier van de sponsjes mocht worden verwacht, maar dat de toepassing van dit dragermateriaal toch perspectieven lijkt te bieden bij de zuivering van stedelijk afvalwater.

Interimperiode

De proeven voor fase I zijn maart 1987 afgesloten, fase II is in augustus 1988 gestart. De reactoren zijn tijdens deze interimperiode in bedrijf gehouden, waarbij de procesomstandigheden tijdens de laatste periode van fase I zoveel mogelijk gecontinueerd werden. Hier toe werd een beperkt meet- en controleprogramma uitgevoerd, ook werden tijdens de eerste maanden de zuiveringsrendementen nog wekelijks bepaald.

Uit deze resultaten kan echter niet veel geconcludeerd worden. Vrijwel chronische licht-slibproblemen veroorzaakten een zeer instabiele situatie in alle vier reactoren. De aanwezigheid van sponsjes leidt dus niet zonder meer tot het voorkòmen van licht slib.

4. PROGRAMMA EN UITVOERING VAN FASE II

4.1 Onderzoekprogramma

Het onderzoek in de cascade-reactoren met Linpor C/N werd gecontinueerd, met het zwaartepunt op de invloed van sponsjes op de stikstofomzettingen, c.q. nitrificatie en denitrificatie. Teneinde een indruk te verkrijgen van het effect van de hoeveelheid drager in de reactor werd successievelijk, en gespreid in de tijd, aan de compartimenten A t/m C van R1 ook 20 vol.% sponsjes toegevoegd; in het laatste compartiment van deze reactor waren de sponsjes al vanaf de start van fase I aanwezig. De andere cascade-reactor (R2) fungeerde weer als referentie.

De proef met Linpor C werd niet voortgezet, omdat bij de andere experimenten voldoende informatie over de bijdrage van in sponsjes geïmmobiliseerd slib aan de CZV-verwijdering kon worden verkregen. De reactoren R3 en R4 werden in plaats hiervan gebruikt voor een proef waarbij de toepassing van sponsjes vergeleken werd met het voorschakelen van een zogenaamde A-trap (de hoogbelaste 1e trap van het A/B-Verfahren). Op deze wijze werden twee opties om het functioneren van een awzi te verbeteren met elkaar vergeleken. In R3 waren sinds fase I al 20 vol.% C-sponsjes aanwezig, R4 werd in serie geschakeld met een A-trap.

De proef met Linpor N (de nazuivering) werd eveneens gecontinueerd. Deze reactor werd tot dag 185 gevoed met het effluent van R4, daarna met dat van R1.

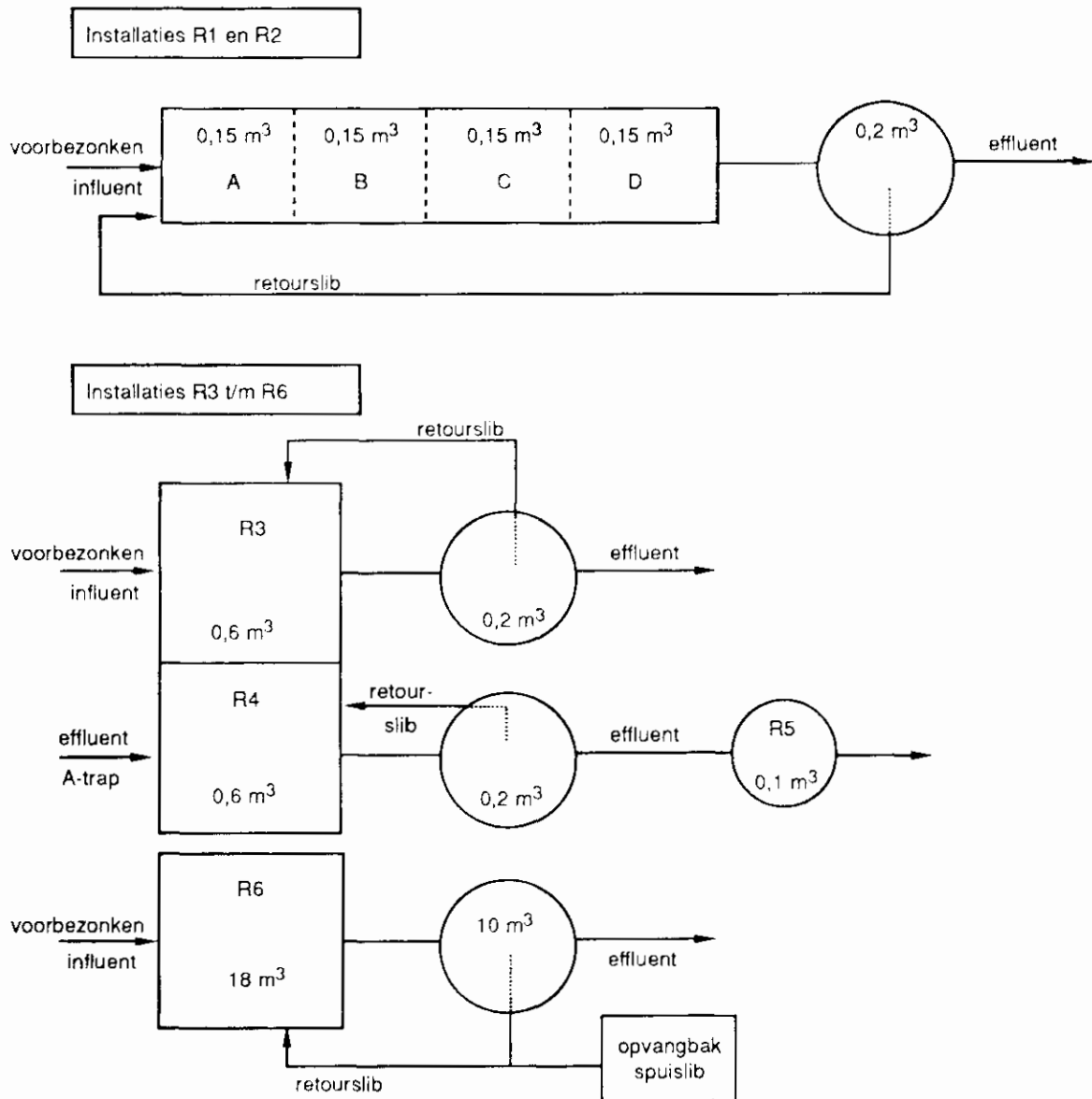
Het functioneren van de reactoren werd beoordeeld op basis van:

- de zuiveringsrendementen: CZV-verwijdering, oxydatie van Kjeldahlstikstof en eventuele denitrificatie;
- de slibeigenschappen van het vrije en het gehechte slib: microscopisch beeld, diverse activiteitsbepalingen en het bezinkgedrag (alleen van het vrije slib);
- de stabiliteit van het proces;
- de slibproductie.

De relatief kleine schaal (0,6 m³) van de proefinstallaties zou tot een vertekend beeld van de slibproductie kunnen leiden. Teneinde dit, voor de praktijk zo belangrijke aspect beter te kunnen onderzoeken werd een experiment uitgevoerd op 18 m³-schaal (R6). Deze reactor werd onder Linpor C/N-condities bedreven.

4.2 Proefinstallaties en procesomstandigheden

In Figuur 1 worden de proefinstallaties uit fase II schematisch weergegeven. De reactoren met sponsjes waren voorzien van roosters, met openingen van 0,8 cm, om uitspoelen van de sponsjes te voorkomen. Hetzelfde soort roosters was boven de beluchtingselementen gemonteerd, omdat bij fase I was vastgesteld dat zonder zo'n rooster een gedeelte van de sponsjes op de bodem bleef liggen.



Figuur 1 Schematisch overzicht van de proefinstallaties.
Sponsjes aanwezig in: R1, R3, R5 en R6.
R5 vanaf dag 185 in serie met R1.

In R1-D en R3 waren de sponsjes bij de start van fase II al ruim twee jaar aanwezig. Aan de compartimenten A t/m C van R1 werd op respectievelijk dag 12, 52 en 115 van fase II 20 vol.% sponsjes toegevoegd. Het volume van R5 werd bij fase II uitgebreid van 60 naar 100 l; om het dragervolume op 20% te handhaven, werden extra sponsjes toegevoegd. In R6 werd gestart met kale C-sponsjes, omdat N-sponsjes in die periode niet leverbaar waren.

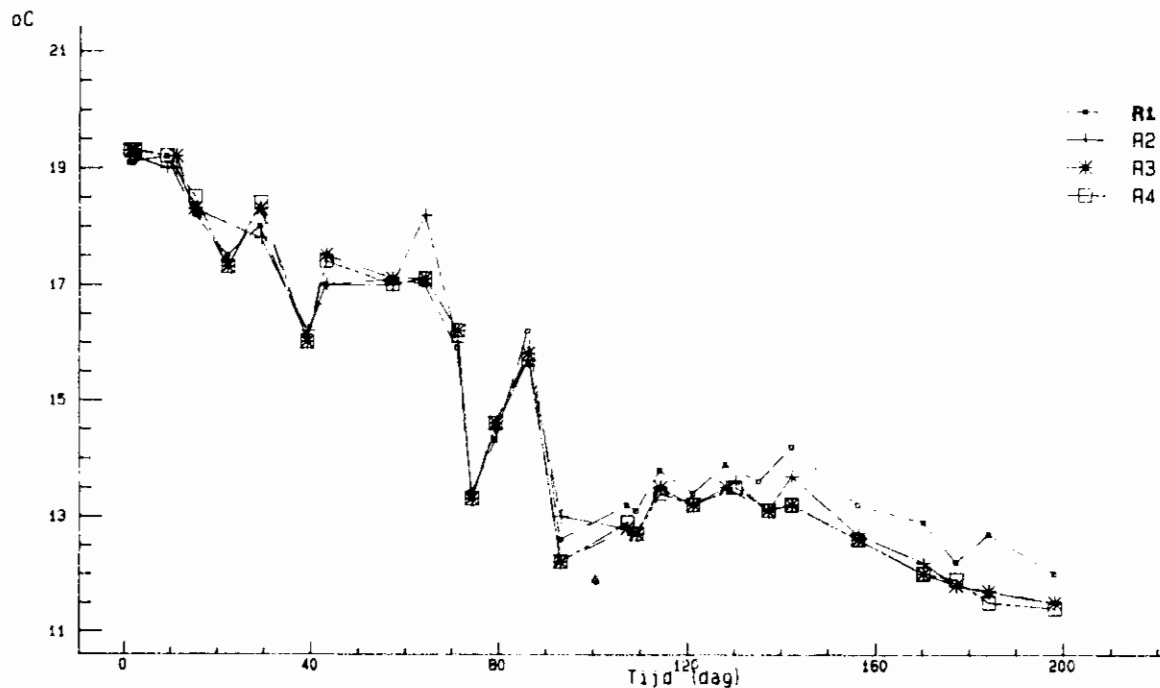
Voorafgaande aan fase II, werden de reactoren R1 t/m R5 in juli/augustus 1988 ingesteld op de gewenste condities. De proeven in deze reactoren zijn gestart op 23 augustus 1988 (= dag 1) en hebben geduurd tot februari/maart 1989.

Reactor 6 werd in december 1988 gevuld met nitrificerend oxydatieslootslib, waarna de sponsjes werden toegevoegd. Het meetprogramma werd gestart op 1-1-1989 en na 108 dagen beëindigd.

Het gehalte aan vrij slib in de diverse reactoren werd geregeld op circa 3 kg d.s./m³.

Het verloop van de temperatuur in de reactoren 1 t/m 4 is weergegeven in Figuur 2. Door de zeer zachte winter bleef de temperatuur relatief hoog, hetgeen uiteraard gunstig was voor de nitrificatie. Ook in R6, die in de buitenlucht stond opgesteld, was de temperatuur vrijwel steeds > 10°C.

De pH werd regelmatig gemeten. Hierbij werden vrijwel nooit waarden ≤ 6.5 vastgesteld.

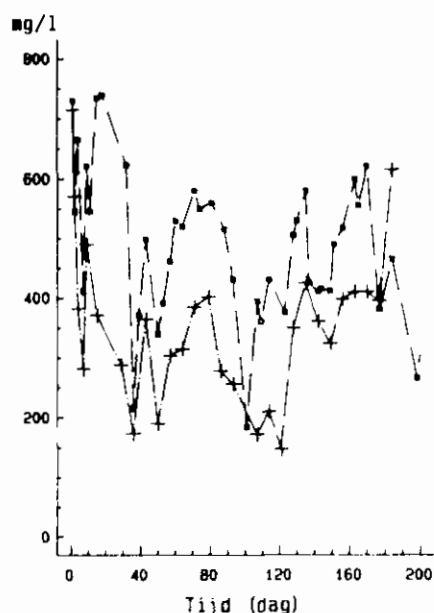


Figuur 2 *Temperatuur in de reactoren 1 t/m 4.*

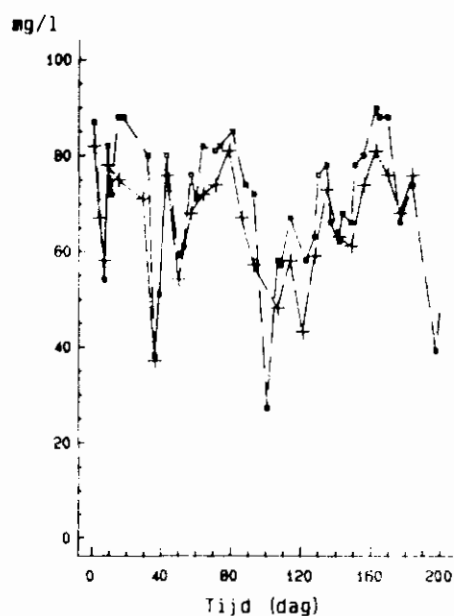
De meeste reactoren werden continu gevoed met voorbezonden, stedelijk afvalwater uit Delft; R4 echter met effluent van een A-trap en R5 met effluent van R4 (vanaf dag 185 met dat van R1). In de figuren 3 en 4 wordt het verloop van het CZV en het gehalte aan Kjeldahlstikstof (= Nkj) in de influenten van R1 t/m R4 weergegeven. De voorbehandeling in de A-trap leidde tot een aanmerkelijk lager CZV, het gehalte aan Nkj werd hierdoor echter niet noemenswaardig beïnvloed.

Het influent van R6, die veel later werd gestart, verschilde met een gemiddeld ($n=12$) CZV en Nkj-gehalte van respectievelijk 540 en 65 mg/l niet wezenlijk van dat van R1 t/m R3.

In R1 en R2 werd steeds een hydraulische verblijftijd van 8 uur aangehouden. In R3 en R4 werd hiermee ook gestart, maar op de dagen 102 en 124 werd deze in beide reactoren verkort tot respectievelijk 6 en 4,8 uur teneinde de belasting te verhogen. Dit had tevens tot gevolg dat de hydraulische verblijftijd in R5 van 1,3 via 1,0 tot 0,8 uur daalde. In R6 werd een waterverblijftijd van 9,5 uur gehandhaafd.



Figuur 3 CZV (mg/l) van het influent
■—■ voorbezonden influent
+—+ effluent A-trap



Figuur 4 Nkj (mg/l) in het influent
■—■ voorbezonden influent
+—+ effluent A-trap

Het zuurstofgehalte daalde slechts incidenteel onder het niveau van 1,5 à 2,0 mg O₂/l. In feite was het O₂-gehalte vaak aanmerkelijk hoger dan dit niveau (zie Bijlage A), omdat tamelijk fors belucht moest worden om bezinken van de sponsjes te voorkomen.

4.3 Bemonstering en analyses

Influent en effluent van de cascade-reactoren werden twee maal per week bemonsterd, dat van de overige proefopstellingen één maal per week (steeds continu gedurende 24 uur). De monsters werden geconserveerd, indien ze niet aansluitend geanalyseerd werden.

De compartimenten van R1 en R2 werden éénmaal per week steekproefsgewijs bemonsterd, om het verloop van het nitrificatieproces in de reactoren te kunnen volgen.

Het gehalte aan vrij gesuspendeerd slib werd vrijwel dagelijks bepaald, teneinde de hoeveelheid spuislib te kunnen vaststellen. De spuislibproductie van R6 werd steeds volledig opgevangen in een aparte bak. Dagelijks werd de inhoud van deze bak intensief gemengd, waarna monsters voor de droge-stofbepaling werden genomen. De bak werd vervolgens leeggepompt.

De analyses van CZV, Nkj, SVI en droge stof werden volgens NEN-voorschriften uitgevoerd, de geroerde index (SSVI) conform de methode in referentie 39. Nitriet en nitraat werden bepaald volgens de autoanalyzer-methode van Technicon [36].

Teneinde de hoeveelheid zwevend stof in influent en effluent te kunnen bepalen, werden ook CZV- en Nkj-bepalingen uitgevoerd van de bovenstaande vloeistof, na centrifugeren van de monsters bij 4000 x G gedurende 15 minuten. Deze analyse-uitkomsten worden aangegeven met CZV-c en Nkj-c.

De hoeveelheid gehechte biomassa in een reactor werd éénmaal per week bepaald, volgens een door de firma Linde ontwikkelde methode. Hierbij worden 2 sponsjes in 30 ml water gebracht en 8-10 maal met een stamper stevig uitgeperst. Het slibwater wordt vervolgens afgeschonken, waarbij de sponsjes ingedrukt worden gehouden. De "uitstampprocedure" wordt nog drie maal herhaald, waarbij steeds 30 ml schoon water wordt toegevoegd. Uiteindelijk worden de vier slibwaterfracties samengevoegd, waarna hierin het droge-stofgehalte volgens NEN-voorschrift wordt bepaald. De uitkomst wordt omgerekend naar kg droge stof/m³ spons, waarbij per sponsje een volume van 2,5 cm³ wordt aangehouden. Voor de bepaling van de hoeveelheid gehechte biomassa in een reactor moeten volgens Linde in totaal 10 sponsjes in bewerking worden genomen. De methode leidt tot goed reproduceerbare uitkomsten, met een standaardafwijking van 6-8% [29]. Omdat de werkwijze tamelijk arbeidsintensief is, werd bij het onderhavige onderzoek het aantal sponsjes per droge-stofbepaling na enkele maanden teruggebracht tot zes.

Bij de activiteitsbepalingen van de gehechte biomassa werd deze niet eerst uit de sponsjes verwijderd. De metingen werden uitgevoerd in reactievaatjes, met 40 sponsjes/l gefiltreerd

effluent. Voor het meten van de nitrificatiesnelheid werd NH_4Cl toegevoegd, tot een eindconcentratie van $84\text{ mg NH}_4^+\text{-N/l}$, waarna het verloop van het gehalte aan resterende $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en het gevormde $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ gedurende tien uren werd gevolgd. Voor de bepaling van de CZV-opnamesnelheid werd natriumacetaat als substraat toegepast (beginconcentratie: 570 mg/l). Bij alle metingen werd tevens een fosfaatbuffer ($\text{pH} = 7,2$) toegevoegd. Aangezien een intensieve beluchting nodig was voor een homogene verdeling van de sponsjes in het reactievaatje was het zuurstofgehalte hierin hoog ($6\text{-}8\text{ mg O}_2/\text{l}$).

Ter vergelijking zijn van de vrije slibben uit de verschillende reactoren dezelfde activiteiten bepaald.

Bij de bepaling van de respiratiesnelheid werd het werkelijke niveau gemeten; slib of sponsjes werden dus niet voorafgaande aan de bepaling 24 uur belucht ($\rightarrow$ endogene niveau).

Alle metingen zijn uitgevoerd bij de systeemtemperatuur in deze periode (circa 13°C).

Voor het microscopisch onderzoek werden actiefslib en sponsjes vanaf dag 29 van de experimenten éénmaal per week met behulp van fase-contrast- en stereomicroscopie beoordeeld.

5. RESULTATEN

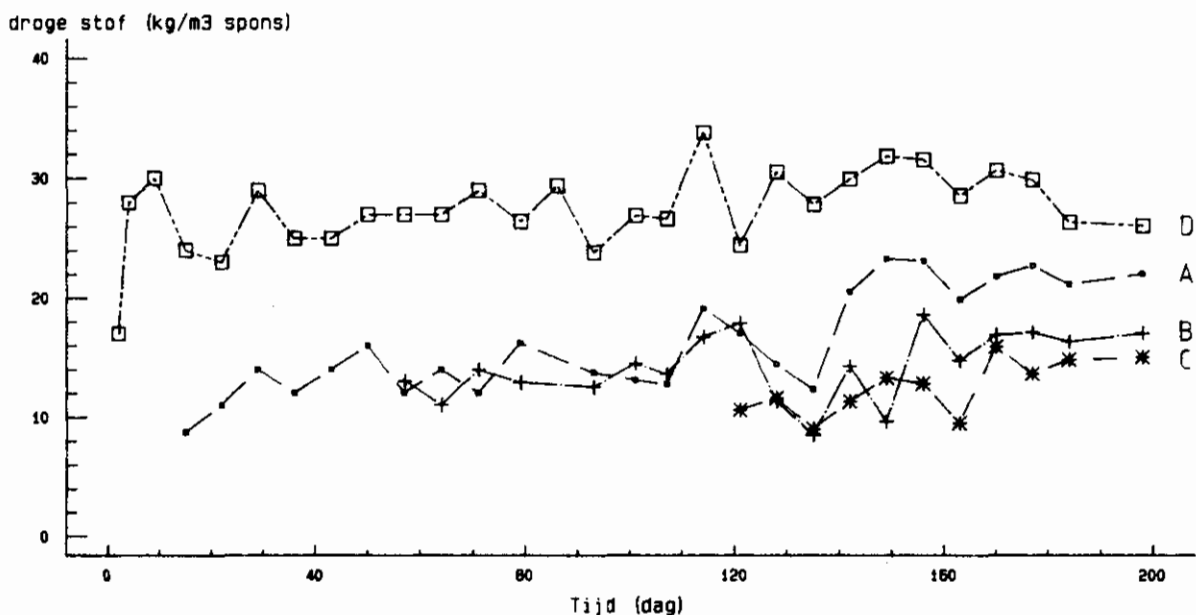
In dit hoofdstuk wordt een zoveel mogelijk beknopt overzicht van de resultaten gegeven. Enkele uitkomsten worden in Bijlage B gedetailleerd gepresenteerd. De gehanteerde onderverdeling in perioden correspondeert met het verder vullen van R1 met sponsjes en het verkorten van de hydraulische verblijftijd in R3 t/m R5.

De proef in R6 was voornamelijk bedoeld om de slibproductie op semi-praktijkschaal te kunnen meten. Om deze reden wordt alleen in paragraaf 5.8 kort ingegaan op het functioneren van deze reactor.

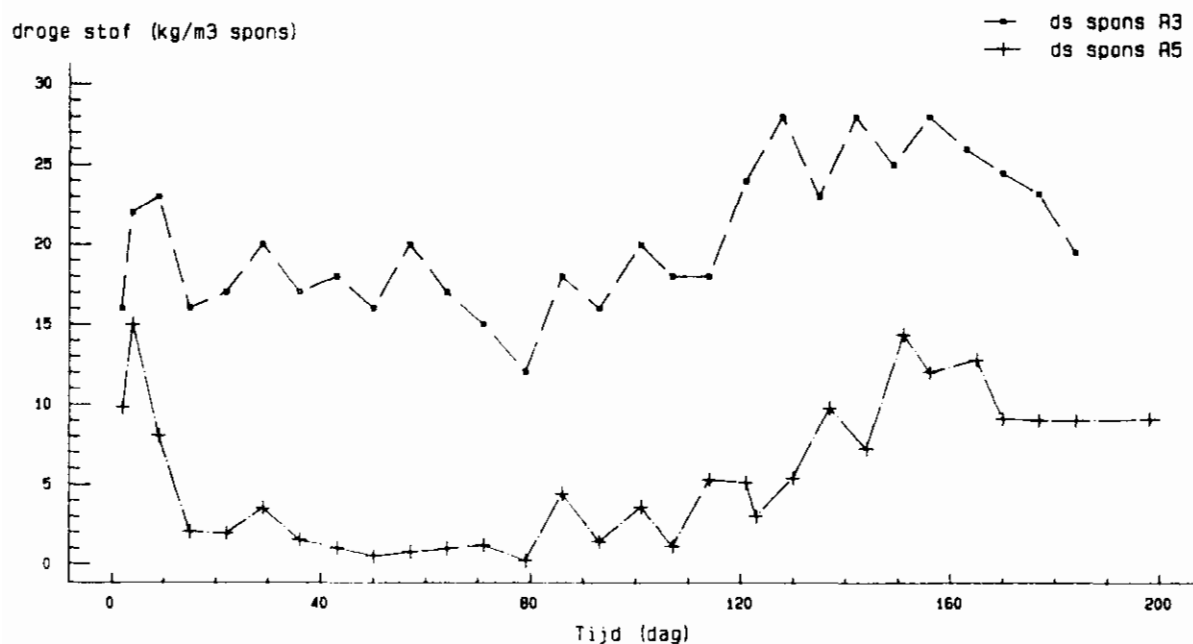
5.1 Ontwikkeling van de gehechte biomassa

Het verloop van het gehalte aan biomassa in de sponsjes is weergegeven in de figuren 5 en 6. Actief-slibvlokken migreren gemakkelijk in lege sponsjes; het droge-stofgehalte in de sponsjes steeg na het toevoegen in enkele dagen tot circa 10 kg d.s./m³ spons, het gehalte aan vrij slib daalde dienovereenkomstig. De verdere toename van de hoeveelheid gebonden biomassa verliep veel trager, de sponsjes lijken maximaal circa 25 kg d.s./m³ spons te kunnen bevatten, de aard van de sponsjes (C of N) heeft hier nauwelijks invloed op. (Vergelijk: R1 met N-sponsjes en R3 met C-sponsjes).

Op het verloop van het biomassagehalte in de sponsjes in R5 wordt in paragraaf 5.3 nader ingegaan.



Figuur 5 Biomassa-ontwikkeling in de sponsjes in R1; A t/m D: opeenvolgende compartimenten.



Figuur 6 Biomassa-ontwikkeling in de sponsjes in R3 en R5.

5.2 Belastingen

De volume- en slibbelastingen zijn vermeld in de tabellen 3 en 4. Bij de slibbelastingen in de reactoren 1 en 3 zijn twee waarden opgegeven, ex- en inclusief de gehechte biomassa (I en II).

Door chronische licht-slibproblemen in R2, was het gehalte aan vrije biomassa in deze reactor voortdurend lager dan in R1, waardoor ook de slibbelasting-I in de reactor met sponsjes steeds (wat) lager was dan R2.

Het successievelijk vullen van de compartimenten met sponsjes had weinig invloed op de slibbelastingen in R1, omdat het effect van de toename van de hoeveelheid gehechte biomassa gecompenseerd werd door een daling van het gehalte aan vrij slib en/of veranderingen van de volumebelasting.

Door de aanmerkelijke CZV-reductie in de A-trap waren de volumebelasting en de slibbelasting-I in R3 vrijwel steeds aanmerkelijk hoger dan in R4. Inclusief de bijdrage van de gehechte biomassa, was het verschil in slibbelasting tot dag 123 echter klein. Alleen tijdens de laatste periode waren de slibbelastingen in R3 $\leq$ die in R4.

Tabel 3 Per periode gemiddelde waarden van de CZV-belastingen, de droge-stofgehalten en de temperaturen in de reactoren 1 en 2.

periode (spons in) ¹⁾ reactor	D		AD		ABD		ABCD	
	1	2	1	2	1	2	1	2
vrij slib (kg/m ³)	4,2	2,9	3,6	3,3	3,3	2,8	3,3	2,8
gehecht slib (kg/m ³)	1,0		1,7		2,2		3,1	
temperatuur (°C)	19	19	17	17	14	15	13	13
volumebelasting ²⁾	1,7	1,7	1,5	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5
slibbelasting-I ²⁾	0,41	0,59	0,42	0,46	0,42	0,50	0,46	0,54
slibbelasting-II ²⁾	0,34		0,30		0,28		0,26	

- 1) sponsjes in de compartimenten A t/m D van R1. De vier perioden zijn: dag 1-12, dag 13-52, dag 53-115 en dag 116-184.
- 2) volumebelasting in kg CZV/m³.dag, slibbelastingen in kg CZV/kg d.s.dag. Het onderscheid I en II betreft: alleen ten opzichte van het vrije slib (= I) en vrij + gehecht slib (= II).

Tabel 4 Per periode gemiddelde waarden van de CZV-belastingen, de droge-stofgehalten en de temperaturen in de reactoren 3 t/m 5.

dagen na start reactor ³⁾	29-101			107-123			128-184		
	3	4	5 ¹⁾	3	4	5	3	4	5
waterverblijftijd (h)	8	8	1,3	6	6	1,0	4,8	4,8	0,8
vrij slib (kg/m ³)	3,1	2,8	<0,1	3,7	2,9	<0,1	3,7	3,1	<0,1
gehecht slib (kg/m ³)	2,8		0,7	3,3		0,8	4,3		1,8
temperatuur (°C)	16	16	16	13	13	13	13	13	13
volumebelasting ²⁾	1,4	0,89	1,4	1,6	0,70	1,1	2,5	2,1	2,8/10,1 ⁴⁾
slibbelasting-I ²⁾	0,45	0,32		0,43	0,24		0,68	0,68	
slibbelasting-II ²⁾	0,27		2,0	0,26		1,4	0,34		1,6/5,6 ⁴⁾

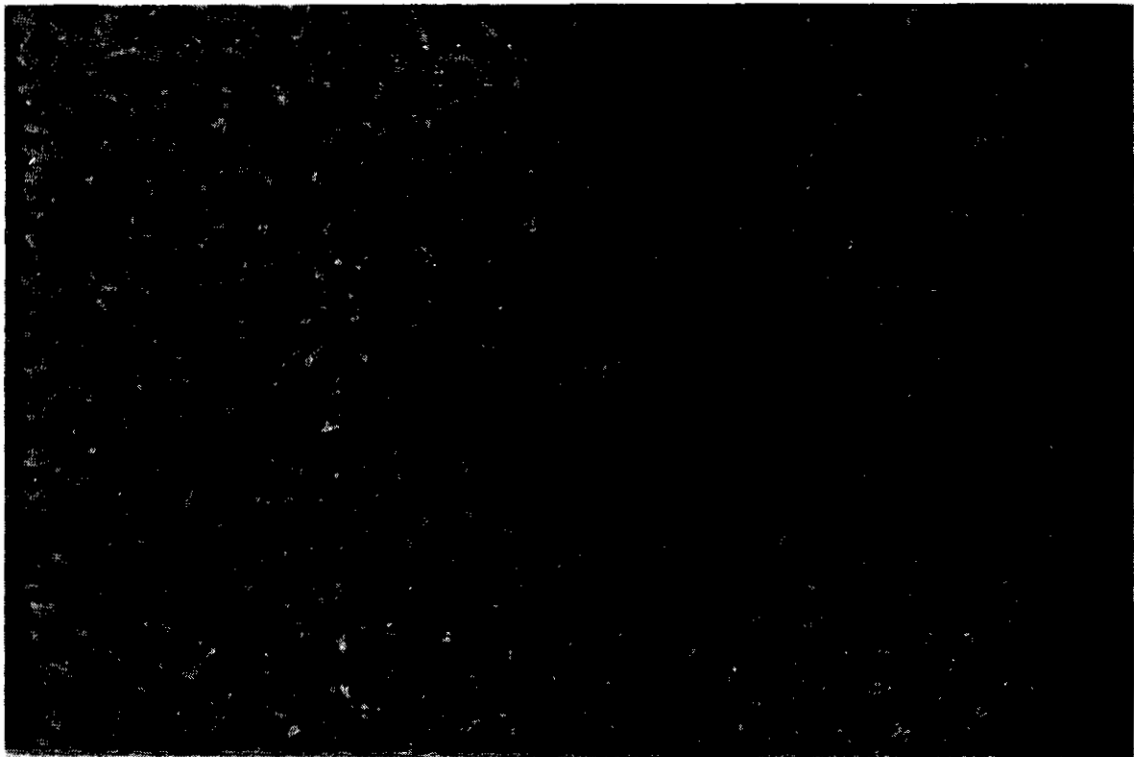
- 1) R5: dag 1-101
- 2) zie legenda Tabel 3
- 3) sponsjes in: R3 en R5
- 4) ex-/inclusief twee extreme CZV-influent waarden, door forse slibverliezen uit R4

De korte hydraulische verblijftijden in R5 leidden automatisch tot forse CZV-belastingen in deze reactor. Dit betrof echter wel de rest-CZV in het effluent van R4 en actiefslib dat uit deze reactor spoelde tijdens de laatste periode. Overigens was het gehalte aan vrij slib in R5 steeds $< 0,1 \text{ kg d.s./m}^3$.

5.3 Microscopisch onderzoek

sponsjes in R1 en R3

De sponsjes die aan de compartimenten A t/m C van R1 toegevoegd werden, waren binnen enkele weken praktisch volledig gevuld met slib, net als bij die in R1-D en R3 al vanaf de start het geval was (Figuur 7). Open poriën werden slechts incidenteel waargenomen. Er is niet nagegaan welk gedeelte van het "sponsjesslib" daadwerkelijk aan de drager was gehecht.



Figuur 7 *Het oppervlak van een dichtgegroeid sponsje.*

De sponsjes in R1-A en R3 werden na verloop van tijd omgeven door een dunne laag "slijmerig" slib, waardoor sponsjes aan elkaar plakten. In de overige compartimenten van R1 trad dit verschijnsel niet op.

Aan de buitenkant van de sponsjes waren enorm veel gehechte ciliaten aanwezig, in de sponsjes voornamelijk veel vrije ciliaten en soms ook talrijke rotiferen, nematoden en (schaal)amoeben. Al deze organismen zijn op hetzelfde soort voedsel aangewezen, i.c. losse bacteriecellen, kleine organische deeltjes, minuscule slibvlokjes of andere protozoën [11]. In de sponsjes werden slechts incidenteel enkele aquatische wormen waargenomen. Deze organismen kunnen relatief grote deeltjes zoals actief-slibvlokken consumeren.

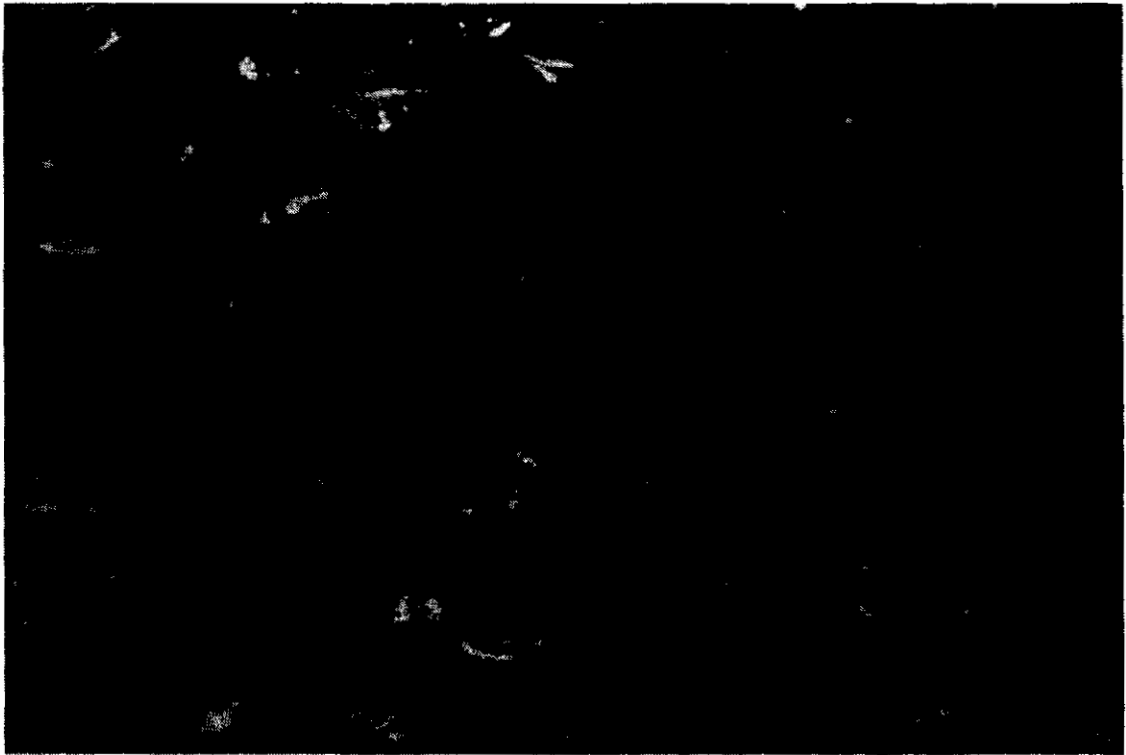
Het microscopisch beeld van het slib in de sponsjes uit 1A t/m 1C leek de eerste weken na het toevoegen van de drager nog veel op dat van het vrije slib; na verloop van tijd werden de verschillen echter steeds groter. Bij het slib in de sponsjes verdwenen de draadvormende organismen, het aantal losse bacteriecellen nam sterk toe, de genoemde populaties van protozoën e.d. ontwikkelden zich en de structuur van de vlokken veranderde van stevige, compacte deeltjes naar een veel minder samenhangend geheel. Het beeld begon steeds meer op dat van het sponsjesslib in R1-D en R3 te lijken, slibben die regelmatig met "puin" gekwalificeerd werden. Hiermee wordt bedoeld dat het slib in deze sponsjes veel dood materiaal leek te bevatten en het geheel er niet erg actief uit zag.

sponsjes in R5

Bij de start van het microscopisch onderzoek (dag 29) werd vastgesteld dat de biomassa in de sponsjes uit R5 voor een belangrijk gedeelte uit aquatische wormen leek te bestaan (Figuur 8). De poriën waren verder, op wat gehechte ciliaten na, praktisch leeg. Er werden soms wel tientallen wormen in één sponsje waargenomen.

Deze situatie heeft ruim twee maanden geduurd. Na dag 107 daalde het aantal wormen enigszins, vanaf dag 135 was de populatie-omvang echter nog hooguit 10 à 20% van die tijdens de eerste maanden.

Op de dagen 102 en 124 werd de hydraulische verblijftijd verkort, c.q. de belasting van de reactor opgevoerd (Tabel 4). De hoeveelheid biomassa in de sponsjes nam vervolgens sterk toe (Figuur 6), vooral na de laatste belastingverhoging. Uiteindelijk groeiden de sponsjes praktisch dicht, net als in de andere reactoren. Op het mogelijk oorzakelijk verband tussen deze aspecten wordt bij de evaluatie nader ingegaan.



Figuur 8 *Aquatische wormen in/op een sponsje.*

het vrije slib

Bij het microscopisch onderzoek van het vrije slib werd voornamelijk gekeken naar het aantal draadvormende organismen, de vlokstructuur en de populatie-omvang van protozoën en metazoën.

Het verloop van het categoriegetal, een maat voor het aantal draadvormende organismen [9], is weergegeven in Tabel 5. In R1 t/m R3 werd in feite gestart met licht slib, alleen in R4 waren bij het begin van de proeven nauwelijks draadvormende organismen aanwezig. In de reactoren met sponsjes daalde het aantal draden vervolgens tot categorie 2 à 3, in R2 bleven permanent veel draadvormende organismen aanwezig. In R4 nam het aantal draden geleidelijk toe, de tijdelijke afname rond dag 120 was mogelijk het gevolg van de wat lagere belasting tijdens de tweede periode.

Tabel 5 Categoriegetal van de vrije slibben.
Schaal 0-4⁺ = geen - zeer veel draadvormende organismen aanwezig [9].

dag	R1 2)	R2	R3 2)	R4
29	3-4	4 ⁺	4	0-1
36	4	3-4	4	0
43	4	4	4	1
50	4	4 ⁺	3-4	0-1
57	3-4	4 ⁺	4	0-1
71	4	4	4	1
79	4	4 ⁺	3-4	1
86	4	4	3-4	2
93	3-4	4	3-4	2
101	3	4	4	3
107	3	4	3-4	2
114	2-3	4	3	2
121	2-3	4 ⁺	3	1
128	2	4	3-4	0-1
135	2	4	3	2
142	2-3	4 ⁺	2	3-4
149	2-3	4	2-3	4
156	2	4	2	3-4
163	2	4	4 1)	3-4
170	2-3	4	3	4
184	2-3	3-4	1	4

- 1) wel veel draadvormende organismen aanwezig, maar van een soort die het bezinken van actiefslib nauwelijks beïnvloedt (Type 1863).
2) reactoren met sponsjes.

Er werden voornamelijk soorten waargenomen die karakteristiek zijn voor de toegepaste slibbelasting, zoals bijvoorbeeld: *Thiothrix*, *S. natans*, *H. hydrossis* en de typen 021N, 1701 en 1863 [10]. Het was wel opvallend dat de populatiesamenstellingen in R1 en R2 qua dominerende soorten voortdurend van elkaar verschilden. In R1 was Type 1701 vrijwel voortdurend dominant, in R2 waren vooral draden van het Type 021N aanwezig.

Overigens bestaat in deze proefinstallaties pas bij een categoriegetal van 4 kans op slibuitspoeling door de aanwezigheid van licht slib.

De vlokken in R2 waren aanmerkelijk compacter dan die in R1, een verschil dat veroorzaakt werd door het soort draadvormend organisme dat in de betreffende reactor aanwezig was. Vlokvormende bacteriën hechten gemakkelijk aan de draden van Type 1701, waardoor vlokken met een open structuur ontstaan. Ook in R3 en R4 waren de vlokken minder compact, naarmate meer draden aanwezig waren.

Het aantal ciliaten en (schaal)amoeben was in R2 en R4 veel groter dan in de reactoren waarin naast actief-slibvlokken ook sponsjes aanwezig waren. Hiervoor is al opgemerkt dat op de sponsjes enorm veel gehechte ciliaten aanwezig waren. Kennelijk consumeren deze zo'n groot gedeelte van het beschikbare voedsel, dat onvoldoende overblijft voor de protozoën in het vrije slib.

Metazoën als rotiferen, nematoden of wormen werden in het vrije slib slechts incidenteel waargenomen.

5.4 Bezinkeigenschappen van de vrije slibben

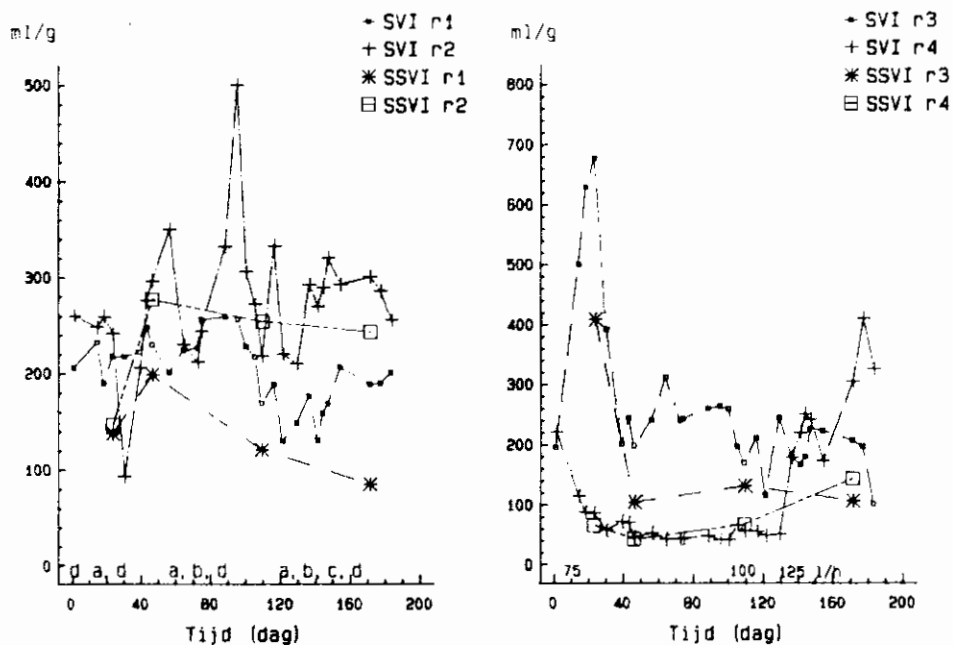
Figuur 9 toont het verloop van de slibvolume-indices, de bezinksnelheden zijn in Tabel 6 vermeld. Deze uitkomsten stemmen redelijk overeen met hetgeen in de vorige paragraaf over het aantal draadvormende organismen is opgemerkt, de bezinkeigenschappen waren slechter naarmate meer van deze organismen aanwezig waren.

Licht slib leidde in R2 tot frequente slibverliezen; bij de referentiereactor met sponsjes vond nauwelijks slibuitspoeling plaats. Ook uit R3 (tijdens de eerste weken) en R4 (na dag 128) werd nogal wat slib met het effluent afgevoerd.

Tabel 6 Bezinksnelheden (m/h).

periode ¹⁾	R1	R2	periode	R3	R4
D	4,8	2,0	dag 29-101	3,5	> 10
A D	2,9	1,8	dag 107-123	2,7	4,2
A B D	4,2	2,1	dag 128-149	3,1	3,5
A B C D	3,5	2,0			

1) met sponsjes in de betreffende compartimenten van R1.



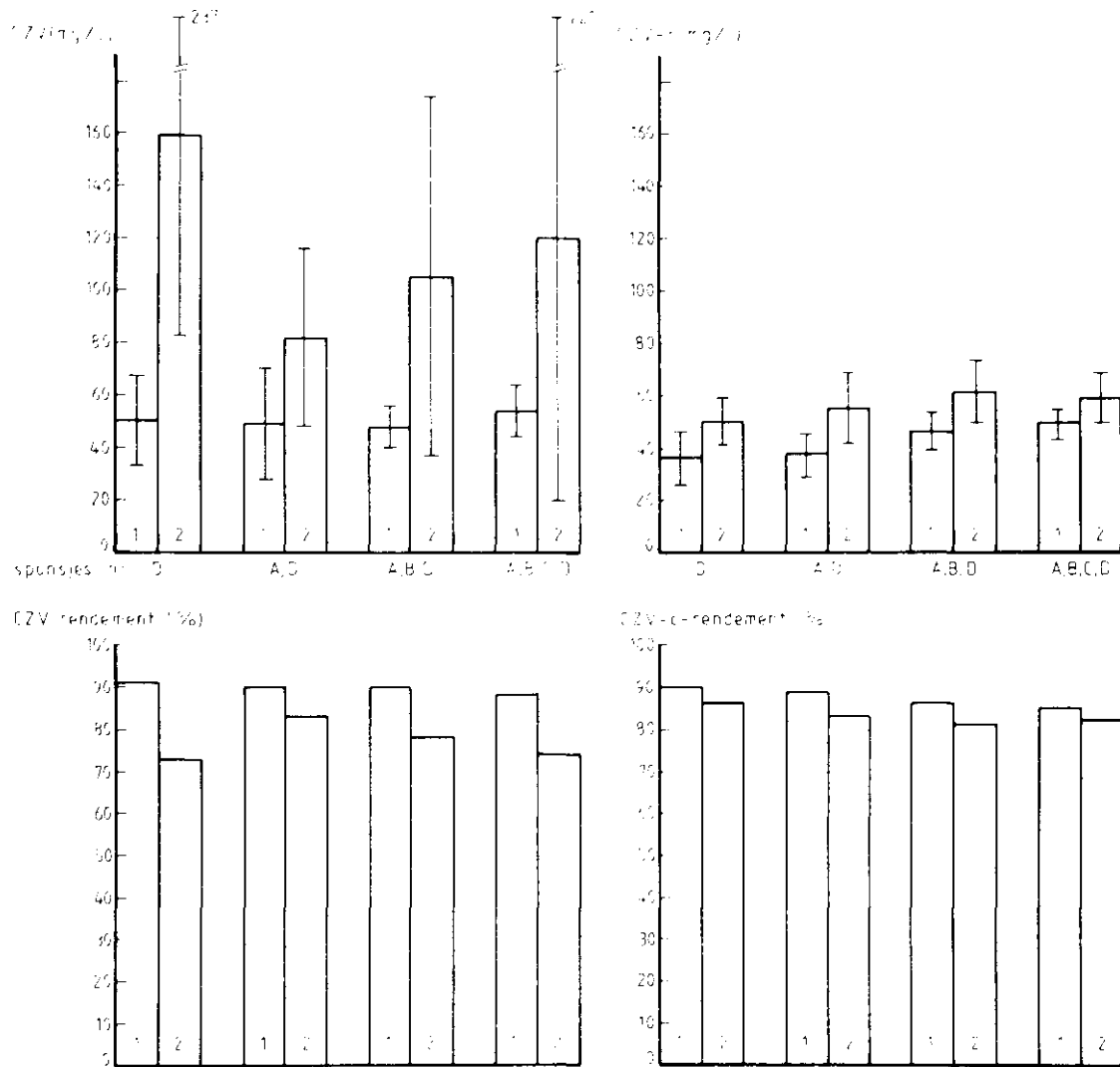
Figuur 9 Slibvolume-indices (ml/g).

5.5 CZV-verwijdering

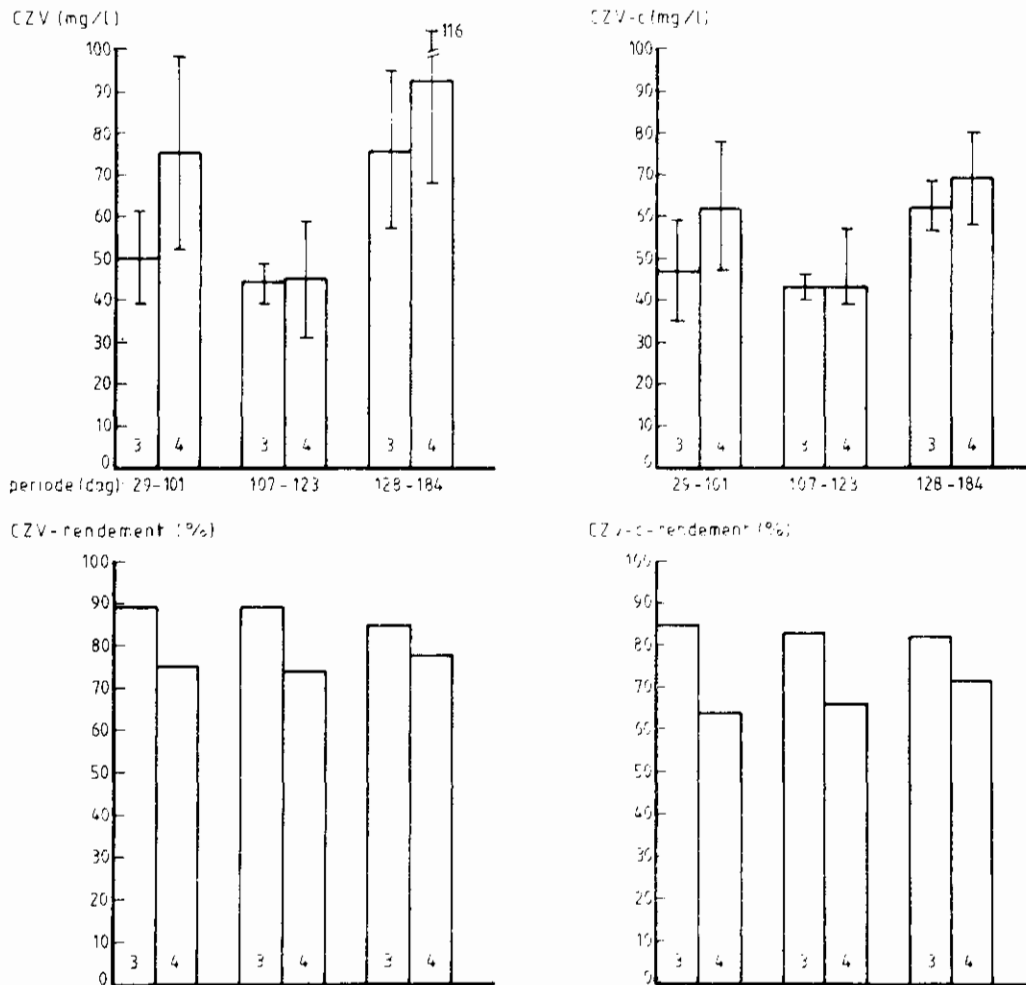
In de figuren 10 en 11 zijn de per periode gemiddelde waarden van de effluent-CZV's en de CZV-rendementen van de reactoren 1 t/m 4 grafisch weergegeven. Enkele, door de aanwezigheid van veel uitgespoeld slib in de effluënten van R2 en R4, extreme CZV-waarden zijn hierbij overigens buiten beschouwing gelaten.

Het zuiveringsrendement van de cascaderactor met sponsjes was voortdurend beter dan dat van de referentie-installatie R2. Het verschil werd voor een belangrijk gedeelte veroorzaakt door het aanmerkelijk hogere gehalte aan zwevend stof in het effluent van R2, bij het CZV-c waren de verschillen veel kleiner.

Qua CZV en CZV-c was het effluent van R3 beter dan dat van de reactor met de voorgeschakelde A-trap (Figuur 11). De forse belastingverhoging tijdens de laatste periode beïnvloedde de rendementen weliswaar weinig, maar de effluentkwaliteit van beide reactoren verslechterde aanmerkelijk.



Figuur 10 Effluent-CZV's (boven) en CZV-rendementen (onder) van de reactoren 1 en 2.



Figuur 11 Effluent-CZV's (boven) en CZV-rendementen (onder) van de reactoren 3 en 4.

De resultaten van de CZV-bepalingen van in- en effluent van reactor 5 zijn samengevat in Tabel 7. De laatste kolom betreft de periode waarin de nazuivering met R1 in plaats van met R4 in serie geschakeld was (vanaf dag 185). In deze periode werd aan influent van R5 ook circa 50 mg actief-slib/l toegevoegd, om het zwevend-stofgehalte hierin te verhogen.

Tabel 7 Gemiddelde CZV-waarden (mg/l) en CZV-rendementen (%) van reactor 5.

	dag 0-101	dag 107-123	dag 128-184	dag 198-227
CZV-influent	89	45	340	111
CZV-effluent	128	43	154	95
rendement	negatief	4	55	14
CZV-c-influent	69	43	69	46
CZV-c-effluent	75	40	63	47
rendement	negatief	7	9	negatief

De tabel toont dat de zuiveringsrendementen tot dag 101 negatief waren, een resultaat dat volledig veroorzaakt werd door de forse afname van de hoeveelheid gehechte biomassa uit R5 tijdens de eerste weken (zie Figuur 6).

Tijdens de tweede periode was het influent van de reactor dermate goed, dat een verdere CZV-reductie ook nauwelijks mogelijk was. Gedurende de volgende periode was het CZV van het influent, door forse slibverliezen uit R4, gemiddeld zeer hoog. In dezelfde periode steeg het biomassagehalte van de sponsjes aanzienlijk. Het hoge rendement van 55% omvat daarom tevens de zwevend-stofreductie door de filtrerende werking van de sponsjes. Het CZV-c-rendement was met 9% laag.

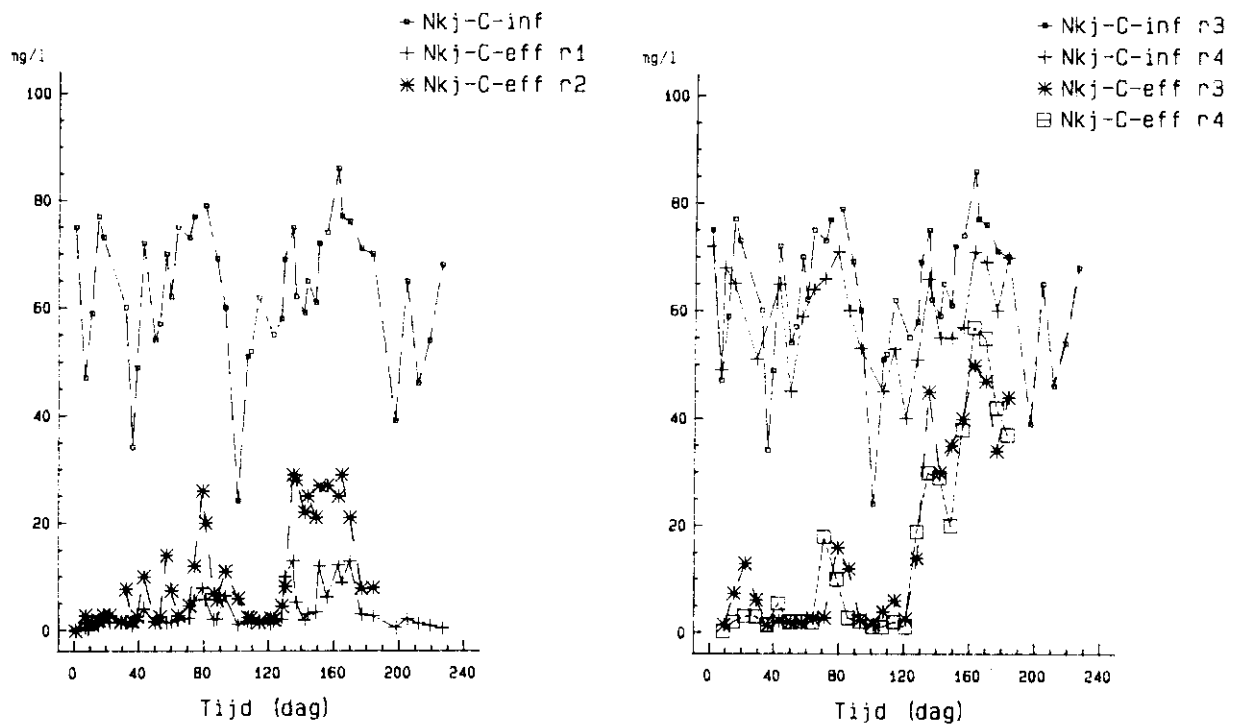
Gedurende de laatste maand was de nazuiverende werking van de reactor opnieuw gering.

5.6 Nkj-verwijdering/stikstofomzettingen

Omdat de effluenten soms veel uitgespoeld slib bevatten, zou de uitkomst van de analyse op Nkj in ruwe monsters een vertekend beeld kunnen geven van het Nkj-zuiveringsrendement en het verloop van het nitrificatieproces. In deze paragraaf wordt daarom alleen ingegaan op de omzettingen van Nkj-c. De Kjeldahlstikstof in het voorbezonden influent bestond voor circa 90% uit Nkj-c (voornamelijk ammonium-N).

In Figuur 12 is het verloop van de Nkj-c-gehalten in de in- en effluenten van R1 t/m R4 weergegeven; Figuur 13 toont de per periode gemiddelde uitkomsten van de Nkj-c-analyses van de effluenten en de rendementen. Het verschil tussen de concentratie aan Nkj-c in het influent en de som van $\text{Nkj-c} + \text{NO}_2^- \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}$ in het effluent is vermeld in

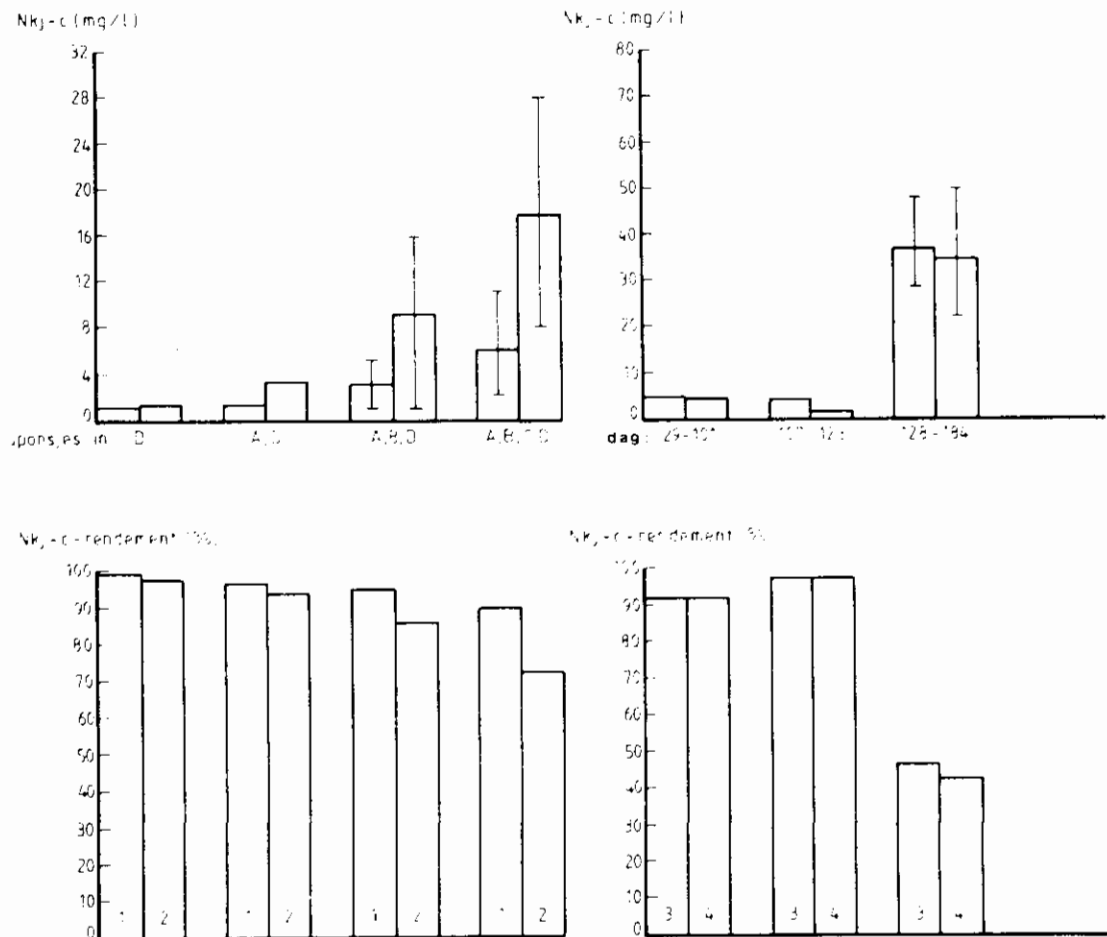
Tabel 8. Dit betreft dus de stikstof die via synthese van celmateriaal en denitrificatie uit de waterfase verdween.



Figuur 12 Het verloop van de Nkj-c-concentraties (mg/l) in in- en effluent van de reactoren 1 t/m 4. Links: reactoren 1 en 2; Rechts: reactoren 3 en 4.

Tabel 8 N-verwijdering door assimilatie plus denitrificatie (mg N/l).

sponsjes in	R1	R2	dagen	R3	R4
D (dag 1-12)	17,2	28,5	29-101	25,3	11,0
A D (dag 13-52)	19,1	22,3	107-123	23,1	2,0
A B D (dag 53-115)	18,1	21,4	128-184	25,4	11,8
A B C D (dag 116-184)	23,9	20,5			



Figuur 13 Per periode gemiddelde waarden van de Nkj-c-concentraties (mg/l) in de effluenten en de Nkj-rendementen (%).

Links : reactoren 1 en 2

Rechts : reactoren 3 en 4

reactoren 1 en 2

In het effluent van R1 werden voortdurend de laagste Nkj-c-concentraties gemeten. Het verschil werd bovendien groter naarmate het rendement, waarschijnlijk door de afname van de temperatuur, in de loop van de tijd daalde. De toevoeging van sponsjes aan de overige compartimenten van R1 verhinderde echter niet dat de nitrificatie ook in deze reactor geleidelijk afnam. De Kjeldahlstikstof werd voor een belangrijk gedeelte omgezet in nitraat. Het effluent van R2 bevatte daarnaast ook 1-4 mg/l aan nitrietstikstof.

In beide reactoren werd, vooral tijdens de eerste drie perioden, een groot gedeelte van de beschikbare Nkj al in het eerste compartiment omgezet in nitraat. De resterende Nkj werd in de twee volgende compartimenten genitrificeerd, waardoor in compartiment D vrijwel geen substraat meer beschikbaar was voor de nitrificeerders. Dit laatste was gedurende de vierde periode wel het geval. Desondanks werd ook toen in compartiment D nauwelijks Nkj-c omgezet in NO_3^- -N.

Geschat wordt dat van de beschikbare Nkj-c 10 à 15 mg/l werd omgezet in nieuw slib. Een vergelijking van deze waarde met de totale N-reductie (Tabel 8) toont dat in de cascade-reactoren denitrificatie slechts een beperkte bijdrage leverde aan de N-verwijdering en dat het toevoegen van sponsjes de denitrificatie niet stimuleerde.

reactoren 3 en 4

In deze reactoren waren de verschillen qua Nkj-c-gehalten in de effluenten en de Nkj-c-rendementen minimaal. Na de verhoging van de volume-/slibbelasting op dag 123 verslechterden de rendementen bovendien in gelijke mate. Evenals bij de cascaderectoren, waren de nitrietconcentraties in de effluenten laag ($< 3 \text{ mg NO}_2^-$ -N/l).

De N-verwijdering door celsynthese + denitrificatie was in R3 aanmerkelijk groter dan in R4. Aangezien echter de C/N-verhouding in de voeding van R3 hoger was dan in het influent van R4, werd in de reactor met sponsjes een groter gedeelte van de beschikbare N voor celsynthese gebruikt, waardoor het verschil in stikstofverwijdering tussen beide reactoren niet volledig aan denitrificatie in R3 toegeschreven mag worden.

reactor 5

In Tabel 9 worden de concentraties van diverse stikstofverbindingen in het influent en het effluent van reactor 5 gegeven. Tot dag 124 was het gehalte aan Kjeldahlstikstof in het influent dermate laag, dat een verdergaande reductie nauwelijks mogelijk was, alleen de resterende nitriet werd omgezet in nitraat. Tijdens de derde periode was weliswaar sprake van een forse Nkj-reductie (28%), maar dit resultaat moet, mede gelet op de concentraties van Nkj-c en N-NO_3^- in in- en effluent, voornamelijk aan de filtrerende werking van de sponsjes worden toegeschreven (zie ook paragraaf 5.5). Een afname van het gehalte aan Nkj-c met 4 mg/l correspondeert met een omzetting van $0,12 \text{ kg N/m}^3 \text{ reactor.dag}$.

Tabel 9 Gehalte (in mg/l) van diverse stikstofverbindingen in in- en effluent van reactor 5.

	dag 0-101	dag 107-123	dag 128-184
Nkj-influent	4,6	1,3	53
Nkj-effluent	5,8	1,3	38
Nkj-c-influent	4,0	1,4	36
Nkj-c-effluent	3,1	1,6	32
N-NO ₂ ⁻ -influent	2,6	0,6	1,2
N-NO ₂ ⁻ -effluent	0,7	0,1	0,6
N-NO ₃ ⁻ -influent	41	42	13
N-NO ₃ ⁻ -effluent	44	43	18

5.7 Activiteitsmetingen

Tijdens de laatste maand van de experimenten zijn op vier dagen activiteitsbepalingen uitgevoerd. De gemiddelde uitkomsten zijn vermeld in Tabel 10. De respiratie-, de nitrificatie- en de CZV-omzettingssnelheid zijn in gescheiden experimenten bepaald.

Tabel 10 Resultaten (steeds in mg/g slib.uur) van de activiteitsmetingen.

	slib in sponsjes						vrij slib			
	1D	1A	1B	1C	3	5	R1	R2	R3	R4
O ₂ -consumptie	4,2	12	16	11	12	26	15	12	15	17
N-NH ₄ -afname	1,1	1,1	1,6	2,0	1,4	5,2	1,0	1,4	0,7	1,4
N-NO _x -vorming ¹⁾	0,5	0,3	1,2	1,5	0,8	3,5	0,9	1,0	0,5	1,3
CZV-omzetting ²⁾	5	16	19	26	15	22	49	61	52	33
kg d.s./m ³ spons	29	20	16	12	21	11				

1) NO_x = NO₂⁻ + NO₃⁻

2) met natriumacetaat als substraat

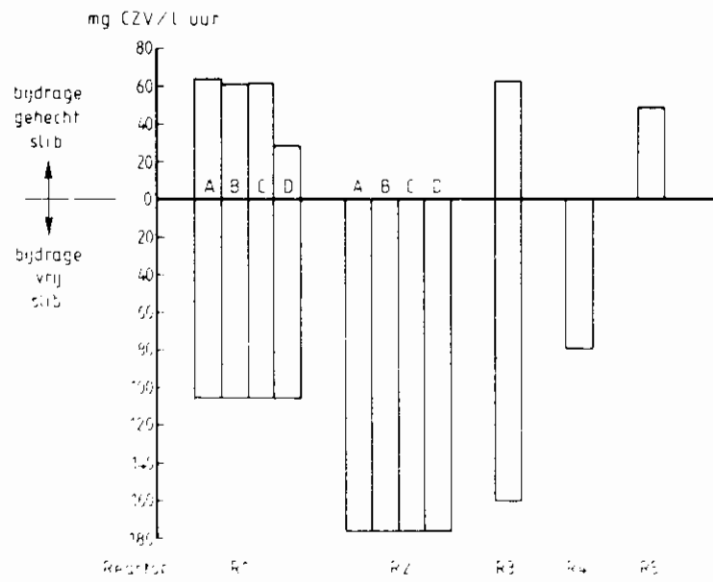
De weergegeven volgorde van het sponsjesslib in R1 correspondeert met die van het successievelijk toevoegen van de sponsjes aan de compartimenten; in 1D waren ze (veruit) het langst aanwezig, in 1C het kortst.

Uit de onderlinge verschillen kunnen enkele opmerkelijke conclusies worden getrokken:

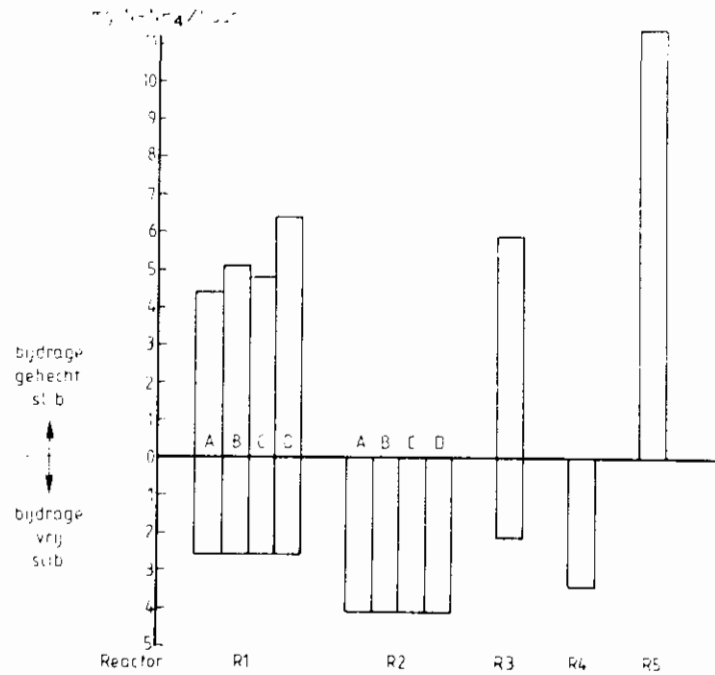
- de CZV-omzettingssnelheid was bij het vrije slib veel groter dan bij het sponsjesslib;
- qua nitrificatie-activiteit waren er, met uitzondering van het slib uit R5, geen grote verschillen tussen de slibben;
- de N-NH₄-afname was bij de sponsjes aanmerkelijk groter dan de hoeveelheid N-NO_x die werd gevormd. Dit duidt op denitrificatie in de sponsjes;
- het vrije slib uit R1 was qua reductie van CZV en N-NH₄ minder actief dan het vrije slib uit R2. Dit betekent dat de activiteit van het vrije slib afneemt, indien de omzettingen voor een deel door sponsjesslib worden uitgevoerd;
- van de sponsjesslibben vertoonde 1D de laagste en R5 de hoogste activiteit;
- de resultaten van de metingen met sponsjes uit R1 suggereren dat sponsjesslib minder actief wordt, naarmate de drager langer in de reactor aanwezig is. Zo'n ondubbelzinnige conclusie mag echter niet worden getrokken, omdat, naast het tijdseffect, nog twee factoren een rol kunnen spelen. Dit betreft het droge-stofgehalte van de sponsjes, dat ongetwijfeld invloed heeft op het transport in/uit deze poreuze drager, en de voorgeschiedenis qua belasting (A>B>C>D). In het volgende hoofdstuk wordt hier nader op ingegaan.

Vermenigvuldiging van de gemeten activiteit met de hoeveelheid biomassa leidt tot de "potentiële capaciteit" die voor de omzetting van bijvoorbeeld CZV of N-NH₄ beschikbaar was. In de figuren 14 en 15 is dit grafisch weergegeven. Deze tonen dat de potentiële bijdrage van het sponsjesslib vooral de nitrificatie van N-NH₄ betrof, de CZV-afbraak werd vooral door het vrije slib uitgevoerd.

In Tabel 11 wordt de N_{kj}-c-omzetting in de reactoren tijdens de laatste periode (dag 128-184), vergeleken met de potentiële nitrificatiecapaciteiten. In de reactoren zonder sponsjes (R2 en R4) stemmen beide uitkomsten zeer goed met elkaar overeen, in de overige reactoren werd echter veel minder N geoxydeerd dan volgens de activiteitsmetingen mogelijk zou moeten zijn. Vooral bij R5 was het verschil erg groot.



Figuur 14 Potentiële CZV-omzettingscapaciteit in mg CZV/l reactor.uur.



Figuur 15 Potentiële nitrificatiecapaciteit in mg N/l reactor.uur.

Tabel 11 *Gemeten en potentiële nitrificatie (in kg N/m³ reactor.dag).*

	R1	R2	R3	R4	R5
volumebelasting	0,2	0,2	0,35	0,31	1,1
gemeten nitrificatie ¹⁾	0,14	0,11	0,11	0,08	0,12
potentiële capaciteit ²⁾	0,18	0,10	0,20	0,08	0,28

1) Nkj-c-afname tijdens de laatste periode, minus 10 mg N/l voor celsynthese (bij R1 t/m R4)

2) berekend uit de activiteitsmetingen

5.8 Slibproductie

Het experiment op 18 m³-schaal (R6) was primair opgezet om de specifieke slibproductie (= kg geproduceerd slib/kg verwijderd CZV) op semi-praktijkschaal te kunnen meten. In Tabel 12 is informatie over de procesomstandigheden en het functioneren van deze reactor samengevat. Zuiveringsresultaten en microscopisch beeld waren zodanig, dat geconcludeerd mag worden dat de proefinstallatie normaal functioneerde.

De resultaten van de slibproductiemetingen in R6 en in de andere reactoren worden in Tabel 13 gegeven. Perioden met grote slibverliezen door licht slib zijn hierbij buiten beschouwing gelaten.

Tabel 12 *Procesomstandigheden en zuiveringsrendementen van reactor 6 (dag 26-108; n=12).*

vrij slib (droge stof)	:	3,4	kg/m ³
gehecht slib (droge stof)	:	2,8	kg/m ³ (14 kg/m ³ spons)
volumebelasting	:	1,4	kg CZV/m ³ .dag
slibbelasting-I	:	0,41	kg CZV/kg d.s.dag
slibbelasting-II	:	0,23	kg CZV/kg d.s.dag
temperatuur	:	10-14	°C
rendementen			
CZV	:	89	%
CZV-c	:	83	%
Nkj ¹⁾	:	57	%
Nkj-c ¹⁾	:	52	%
microscopisch beeld	:	- weinig draadvormende organismen - geen wormen in de sponsjes	

1) toenemend in de loop van de tijd

Tabel 13 *Specifieke slibproductie in de reactoren.*

reactor	kg slib gevormd/kg CZV verwijderd
1*	0,38
2	0,35
3*	0,46
4	0,42
6*	0,45
Nederlandse awzi's [6]	0,37-0,60

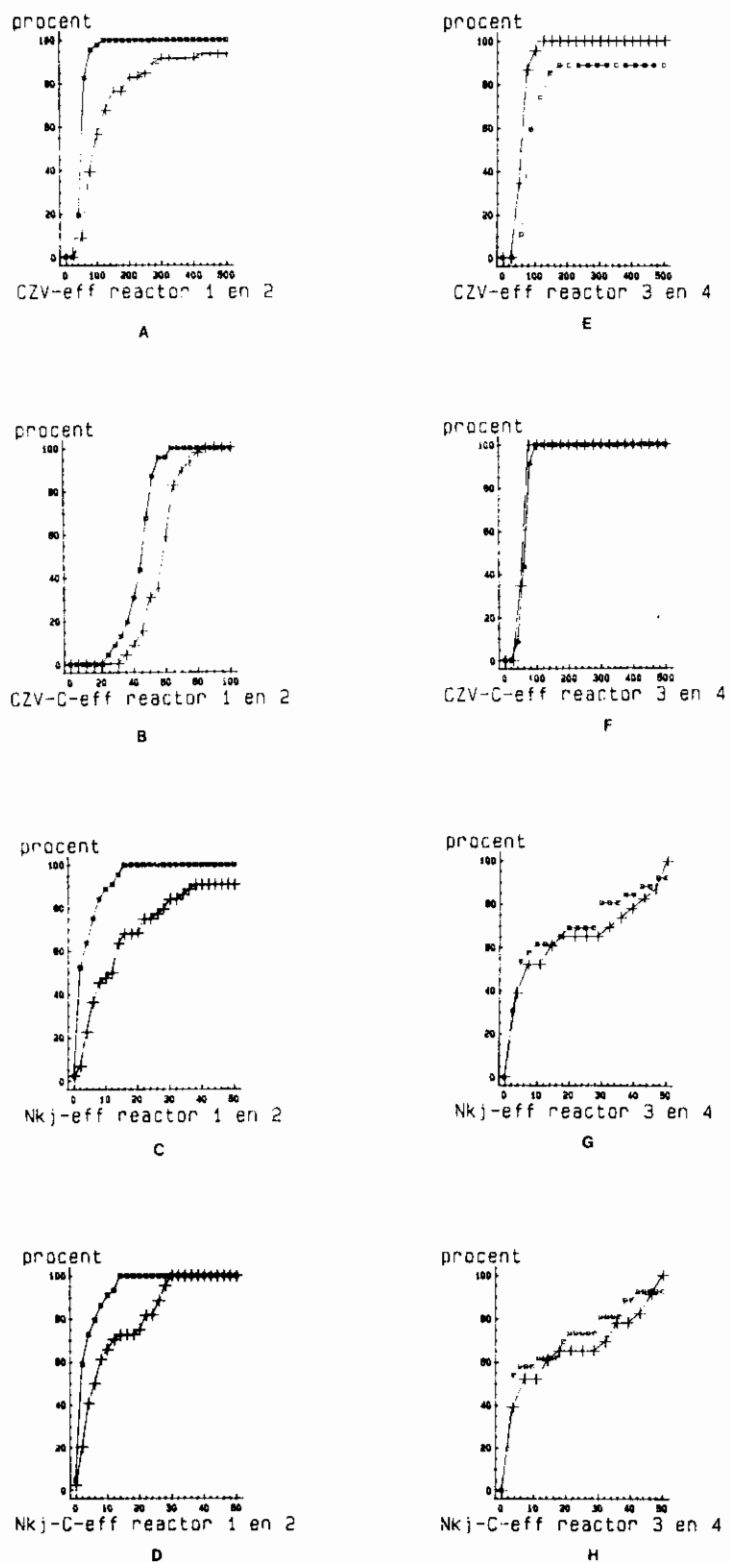
* met sponsjes

Een vergelijking met CBS-cijfers inzake de specifieke slibproductie in Nederlandse awzi's [6] toont dat de slibproductie in geen van de vijf proefinstallaties opvallend laag was. Ook was geen sprake van duidelijke verschillen tussen de referentie-installaties onderling.

5.9 **Processtabiliteit**

Als maat voor het onderling vergelijken van de processtabiliteit van de reactoren wordt de grafische weergave van de cumulatieve relatieve frequentie van de effluentwaarden gebruikt (Figuur 16). Het proces is stabiel naarmate de curve steiler is, c.q. het verschil tussen de 50 en 80 percentiel kleiner.

Figuur 16 toont dat qua verwijdering van CZV, Nkj en Nkj-c reactor 1 stabiel was dan de referentie-installatie R2. De verschillen tussen R3 en R4 waren heel klein.



Figuur 16 Cumulatieve relatieve frequenties.

■—■ : R1 en R4

+—+ : R2 en R3

6. DISCUSSIE

Voor het beoordelen van de perspectieven van het Linpor-proces, is naast de kwantiteit vooral de kwaliteit van de geïmmobiliseerde biomassa van belang. Beide onderwerpen worden daarom eerst besproken, alvorens de uitgevoerde experimenten geëvalueerd worden. Aangezien de kwaliteit gekoppeld is aan de transportmogelijkheden in/uit de sponsjes, worden deze twee aspecten gezamenlijk behandeld.

6.1 Droge-stofgehalte in de sponsjes

Het droge-stofgehalte in de sponsjes, die aan actiefslib toegevoegd werden, steeg in enkele dagen tot circa 10 kg d.s./m³ spons; vervolgens nam het zeer geleidelijk verder toe tot maximaal 25 à 30 kg d.s./m³ spons. De aard van de sponsjes (C of N) had geen invloed op het uiteindelijk droge-stofgehalte. In praktijkinstallaties lijkt het gehalte aan geïmmobiliseerde biomassa zich op een circa 30% lagere waarde te stabiliseren [14, 22], hetgeen mogelijk het gevolg is van het recirculeren van de sponsjes met een mammoetpomp.

Bij het afsluiten van de proef in R5 was in de sponsjes 10 à 15 kg d.s./m³ spons aanwezig, een biomassaconcentratie die ook in de diverse publikaties over Linpor N wordt vermeld [15, 26, 40].

Er mag dus geconcludeerd worden, dat door het toepassen van 20 vol.% sponsjes 2,5-5 kg d.s./m³ reactor kan worden geïmmobiliseerd.

Het is onduidelijk welk gedeelte van de biomassa daadwerkelijk aan de drager is gehecht. Het droge-stofgehalte van de sponsjes daalde - eerst snel met 3 kg d.s./m³ spons, vervolgens geleidelijk verder - indien de turbulentie in de reactor werd verhoogd [40]. Bij het onderhavige onderzoek fluctueerde het slibgehalte van de sponsjes soms fors, hetgeen ook een aanwijzing vormt dat een deel van de biomassa niet is gehecht, maar alleen vastgehouden wordt binnen de ruimtelijke structuur van de sponsjes. Immobilisering van de nitrificeerders [14] en van sommige soorten ciliaten verloopt wel via hechting. Na het uitstampen van de sponsjes voor de droge-stofbepaling, was op de drager nog circa 50% van de oorspronkelijke nitrificatie-activiteit aanwezig [34]; licht-microscopisch lijken de sponsjes na deze behandeling desondanks praktisch leeg te zijn.

Van de bij afvalwaterbehandeling gangbare protozoa en metazoa, zijn alleen de aquatische wormen (o.a. *Nais elingius*) in staat deeltjes ter grootte van slibvlokken te consumeren en

biofilmen fors te begrazen [11]. De opvallend trage toename van het droge-stofgehalte in de sponsjes in R5 tijdens fase I (slibproductie: 0,02 kg d.s./kg CZV_{verwijderd}) werd dan ook uit de aanwezigheid van deze wormen verklaard [5]. Gedurende fase II werden de wormen opnieuw in R5 (en niet in de andere reactoren) waargenomen, echter alleen in een periode met een zeer lage zwevend-stofbelasting van de reactor. De populatie-omvang nam sterk af, nadat de zwevend-stofbelasting sterk was toegenomen, zodat nu geen invloed van hun aanwezigheid op het droge-stofgehalte van de sponsjes kon worden vastgesteld.

6.2 Kwaliteit en transport

Tabel 14 toont dat een opmerkelijke reeks uitkomsten wordt verkregen, indien de activiteiten per gram slib (zie Tabel 10) vermenigvuldigd worden met het droge-stofgehalte van de sponsjes. Dit leidt tot activiteiten in g/m³ spons.uur. De slibben uit 1A, 1B, 1C en 3 verschillen dan nauwelijks van elkaar, bij 1D en 5 is een aantal uitkomsten ook praktisch gelijk aan die van de overige vier slibben. Een min of meer constante activiteit per volume-eenheid dragermateriaal betekent dat het transport van voedingsstoffen vanuit de waterfase naar de biomassa in de sponsjes de snelheidsbeperkende stap vormt. Dit duidt op diffusie als voornaamste transportmechanisme. Een en ander verklaart waarom de activiteit per g biomassa kleiner was naarmate de sponsjes meer slib bevatten.

Tabel 14 Activiteiten van de sponsjesslibben, in g/m³ spons.uur.

	1D	1A	1B	1C	3	5
O ₂ -consumptie	122	240	256	132	252	286
N-NH ₄ -afname	32	22	26	24	19	57
N-NO _x -vorming	15	6	19	18	17	39
CZV-omzetting	145	320	304	312	315	242
Droge stof (kg/m ³ spons)	29	20	16	12	21	11

Voor een gedetailleerde bespreking van dit resultaat wordt verwezen naar Bijlage C, in deze paragraaf worden alleen de conclusies toegelicht en de consequenties van deze transport-limitering besproken.

doorstroming van de sponsjes

De belangrijkste conclusie is dat water gemakkelijk door lege sponsjes kan stromen, maar dat deze doorstroming slechter wordt naarmate het droge-stofgehalte van de sponsjes stijgt. De sponsjes zijn min of meer dichtgeslibd, zodra een droge-stofgehalte van circa 10 kg d.s./m³ spons is bereikt. De geïmmobiliseerde biomassa is dan voornamelijk aangewezen op aanvoer van voedingsstoffen via diffusie. Het relatief forse formaat van de sponsjes (rib lengte 13000 µm versus een vlok diameter van 100-500 µm) vormt dan een grote handicap.

Uit de diverse berekeningen en overwegingen volgt dat alleen de micro-organismen, aanwezig in een dunne laag van hooguit enkele honderden µm's dik, aan de buitenkant van de sponsjes (kunnen) bijdragen aan de aërobe omzetting van CZV en Nkj. Met het vrijwel ontbreken van transport naar binnen, is een kubusvormig sponsje in feite gereduceerd tot een oppervlak van 12 cm², waardoor 20 vol.% niet met 400, maar met circa 100 m² hechtingsoppervlak per m³ reactor correspondeert.

diffusielimitering en zuurstofvraag

Diffusie als voornaamste transportmogelijkheid impliceert dat de grootte van het concentratieverschil in/buiten de sponsjes in sterke mate bepaalt hoeveel naar binnen getransporteerd wordt. Voor de omzetting van CZV en Nkj is veel zuurstof nodig, waardoor de zuurstofvoorziening vaak het knelpunt zal vormen. Uitgaande van 20 vol.% sponsjes en 2 mg O₂/l in de waterfase, wordt de hoeveelheid zuurstof, die via diffusie in de sponsjes getransporteerd kan worden, onder enig voorbehoud geschat op 0,5 kg O₂/m³ reactor.dag. Hierbij gaat het vooralsnog niet zozeer om de absolute waarde van dit getal - dat via nader onderzoek exacter vastgesteld kan worden - maar om de constatering dat slechts een gelimiteerde hoeveelheid zuurstof beschikbaar is voor endogene ademhaling + CZV-omzetting + nitrificatie door het sponsjesslib.

Een hoeveelheid van 0,5 kg O₂/m³ reactor.dag is toereikend voor de omzetting van circa 1,5 kg CZV/m³ reactor.dag of voor de nitrificatie van 0,11 kg N/m³ reactor.dag door het geïmmobiliseerde slib. Dit impliceert bij Linpor C/N tevens een competitie tussen de nitrificerende en de heterotrofe bacteriën om de beschikbare zuurstof, een punt waar nog op wordt teruggekomen.

In Tabel 15 is de theoretische zuurstofvraag voor CZV-omzetting en nitrificatie bij verschillende slibbelastingen vermeld; het endogene verbruik en eventuele denitrificatie blijven buiten beschouwing. Enigszins generaliserend kan worden gesteld dat in actief-slib-inrichtingen bij slibbelastingen $\leq 0,1$ kg BZV/kg d.s.dag ook gedurende de winter nog een vergaande nitrificatie plaats vindt. Bij slibbelastingen van 0,2 à 0,3 kg BZV/kg d.s.dag is alleen tijdens de zomer sprake van (deel)nitrificatie, bij nog hogere belastingen is de slibleeftijd te kort voor dit omzettingsproces.

Tabel 15 *Berekend* zuurstofverbruik voor CZV-verwijdering en nitrificatie bij verschillende slibbelastingen (zie ook de tekst).*

belastingen				O ₂ -vraag (kg O ₂ /m ³ reactor.dag)		
kg BZV kg d.s.dag	kg BZV m ³ .dag	kg CZV m ³ .dag	kg Nkj ¹⁾ m ³ .dag	CZV- afbraak	nitrificatie	totaal
0,1	0,3	0,75	0,075	0,25	0,34	0,59
0,2	0,6	1,5	0,15	0,50	0,69	1,19
0,3	0,9	2,25	0,225	0,75	1,03	1,78
0,4	1,2	3,0	0,3	1,0	1,37	2,37
0,5	1,5	3,75	0,375	1,25	1,71	2,96
0,6	1,8	4,5	0,45	1,50	2,06	3,56

1) hoeveelheid te nitrificeren Nkj (= 0,1 x waarde CZV)

- * aangenomen: slibgehalte = 3 kg d.s./m³
- CZV = 2,5 BZV
- zuiveringsrendement = 90%
- slibproductie = 0,45 kg d.s./kg CZV_{verwijderd}
- 1 kg droge stof = 1,4 kg CZV

Dit betekent dat zonder drager de totale zuurstofvraag, voor het aangegeven belastingstraject, nooit groter zal zijn dan circa 1,5 kg O₂/m³ reactor.dag. Met drager ontstaat een gecompliceerde situatie. In beginsel zou het geïmmobiliseerde slib een forse bijdrage (minimaal 30%) aan het zuiveringsproces kunnen leveren. De totale zuurstofvraag zal echter toenemen, indien de toepassing van sponsjes tot een betere nitrificatie leidt. Bovendien mag de limietwaarde van 0,5 kg O₂/m³ reactor.dag niet zonder meer gebruikt worden als basis voor de zuiveringstechnische mogelijkheden van de Linpor-processen. Het betreft niet alleen slechts een schatting, maar er werd ook vastgesteld dat de activiteit van het vrije slib kan dalen indien sponsjes worden toegevoegd.

In de proefinstallaties was het zuurstofgehalte vaak aanmerkelijk hoger dan 2 mg O₂/l. De totale zuurstofvraag voor CZV-omzetting en nitrificatie varieerde in de reactoren R1 en R3 van 1,3 tot 2,1 kg O₂/m³ reactor.dag. Het sponsjesslib kon dus in beginsel, ondanks de diffusielimitering, een substantiële bijdrage leveren aan het zuiveringsproces.

Bij de activiteitsmetingen was het zuurstofgehalte in de vaatjes hoger dan in de reactoren. Dit verklaart het verschil tussen de gemeten en de potentiële N-NH₄-reducties (zie Tabel 11) in de reactoren met sponsjes.

Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat bij diffusie de transportsnelheid afneemt, naarmate het ion/molecuul groter is. Nitraationen of organische verbindingen worden dus langzamer naar binnen getransporteerd dan O₂.

netto bijdrage

Actief-slibvlokken bestaan maar voor een bepaald percentage uit actieve cellen. De omvang van de actieve populatie wordt tot op zekere hoogte bepaald door de hoeveelheid beschikbaar voedsel. Een toename van de biomassa bij een gelijkblijvende voedselvoorziening (= volumebelasting) zal dus tot een afname van het percentage actieve cellen leiden. De, in vergelijking tot R2, lagere activiteit van het vrije slib in R1 illustreert deze verschuiving. De bijdrage van de geïmmobiliseerde biomassa aan het zuiveringsproces is dus geen "netto winst", maar moet in feite gecorrigeerd worden voor de afname van de activiteit van het vrije slib.

De netto bijdrage van het slib in de sponsjes in R1 kan uit de resultaten van de activiteitsmetingen worden berekend en is weergegeven in Tabel 16.

Tabel 16 Potentiële omzettingcapaciteiten (in kg/m³ reactor.dag) in R1 en R2 bij een hoog zuurstofgehalte in de reactoren.

	Nkj	CZV*
R1 : vrij slib	0,06	3,8
slib in sponsjes	0,12	1,3
totaal	0,18	5,1
R2 : vrij slib	0,10	4,3
extra in R1	0,08	0,8

* met natriumacetaat als substraat

De bijdrage van het geïmmobiliseerde slib aan de verwijdering van natriumacetaat werd ten dele teniet gedaan door de daling van de omzetting capaciteit van het vrije slib. Dit resultaat sluit goed aan bij de waarneming dat de betere CZV-reductie in de reactoren met sponsjes vooral de verdergaande zwevend-stofreductie betrof. In feite toont Tabel 16 dat het vrije slib, gelet op de volumebelasting in de reactoren van circa $1,5 \text{ kg CZV/m}^3 \cdot \text{dag}$, een forse overcapaciteit had voor de verwerking van opgelost, gemakkelijk afbreekbaar substraat.

De netto bijdrage van het slib in de sponsjes aan de nitrificatie bedroeg $0,08 \text{ kg N/m}^3 \text{ reactor} \cdot \text{dag}$. Hoewel dit betekent dat de nitrificatiecapaciteit van het geïmmobiliseerde slib slechts voor 67% mag worden meegerekend, werd de totale capaciteit desondanks fors verhoogd door de aanwezigheid van sponsjes.

Overigens moet nog wel worden opgemerkt dat deze resultaten, door het hoge zuurstofgehalte in de meetvatjes bij de activiteitsmetingen, niet zonder meer gelden voor een praktijk situatie.

competitie

De in Tabel 10 vermelde activiteiten van de sponsjesslibben (in $\text{mg/g slib} \cdot \text{uur}$) zijn eigenlijk fictieve waarden, omdat ze het gemiddelde zijn van de actieve laag aan de buitenkant en het min of meer inerte slib binnenin de sponsjes. Dit betekent onder andere dat de nitrificatie-activiteit van de biomassa aan de buitenkant van de sponsjes aanmerkelijk groter was dan die van het vrije slib. Er was dus sprake van ophoping van nitrificeerders in de buitenste laag van de sponsjes. Gelet op de bijdrage van het geïmmobiliseerde slib aan de nitrificatie, de daarmee corresponderende zuurstofvraag en de hoeveelheid beschikbare zuurstof, wordt geconcludeerd dat de nitrificeerders de competitie met de heterotrofe bacteriën om de beschikbare O_2 winnen, bij een slibbelasting van circa $1,5 \text{ kg CZV/m}^3 \text{ reactor} \cdot \text{dag}$. Dit betekent dat de CZV-omzetting grotendeels door het vrije slib uitgevoerd zal moeten worden, hetgeen tevens impliceert dat onder Linpor C/N condities het toepassen van deze drager de slibleeftijd nauwelijks zal kunnen beïnvloeden.

Of nitrificeerders bij hogere slibbelastingen ook nog in staat zijn de sponsjes te koloniseren, kan op basis van het uitgevoerde onderzoek niet worden aangegeven.

overige aspecten

Naast de overheersende invloed van de diffusielimitering, lijkt de activiteit van het slib uit 1D mede beïnvloed te zijn door de permanent lage belasting van dit laatste compartiment. Bij de nitrificatiecapaciteit van de sponsjesslibben uit R1 en R3 speelde mogelijk tevens de omvang van de nitrificerende populatie een rol.

Over de invloed van de temperatuur op het voorafgaande kan, door het ontbreken van voldoende informatie, niet nader worden ingegaan.

6.3 Evaluatie van de uitgevoerde proeven

In de tabellen 17 t/m 19 is een aantal resultaten van de proefinstallaties tijdens de fasen I en II samengevat. Omdat de procentuele bijdrage van het geïmmobiliseerde slib aan het zuiveringsproces mede afhankelijk is van de volumebelasting, zijn de vermelde slibbelastingen, in de reactoren met sponsjes, alleen indicatief. Tijdens de tweede fase functioneerden de reactoren aanmerkelijk stabielere dan gedurende de eerste periode, waardoor aan de uitkomsten van fase II een grotere betekenis toegekend mag worden. Om deze reden wordt bij de evaluatie vooral ingegaan op deze fase.

CZV-verwijdering

Het CZV van de effluenten van de reactoren 1 en 3 was voortdurend lager dan dat van de referentie-installaties, een verschil dat voor een belangrijk gedeelte teruggevoerd kan worden op een lager gehalte aan zwevend stof in de effluenten van de reactoren met sponsjes. Deze betere verwijdering van zwevend stof kan ten dele uit de bezinkeigenschappen van de slibben worden verklaard. Het lijkt echter waarschijnlijk dat daarnaast ook de filtrerende werking van de sponsjes hierbij een rol heeft gespeeld. Dit kan zowel invangen van minuscule deeltjes betreffen, als daadwerkelijke consumptie hiervan door de forse populatie van op de sponsjes gehechte ciliaten.

Het geleidelijk verder vullen van R1 met sponsjes verhinderde niet dat, door de daling van de temperatuur in deze reactor, het CZV-rendement, net als in R2, geleidelijk met circa 5% verminderde. Het CZV van het effluent van R1 bleef wel voortdurend lager dan dat van R2.

Tabel 17 Samenvatting van een aantal resultaten met de cascadeactoren tijdens de fasen I en II.

		sponsjes in	temp. (°C)	belastingen ²⁾		rendementen (%)			SVI ³⁾ (ml/g)
				volume	slib	CZV	CZV-c	Nkj-c	
F A S E I	R1	D	13	0,8	0,25	71	68	86	100 → 250
	R2		13	0,8	0,23	76	69	77	ca. 100
	R1	D	9	2,1	0,49	79	76	26	250 → 100
	R2		9	2,1	0,46	60	79	39	100 → 300
	R1	D	18 ¹⁾	1,9	0,71	63	76	65	300 à 500
	R2		17 ¹⁾	1,9	0,95	57	74	65	300 à 500
F A S E II	R1	D	19	1,7	0,34	91	90	99	200 à 250
	R2		19	1,7	0,59	73	86	98	ca. 250
	R1	AD	17	1,5	0,30	90	89	97	200 à 250
	R2		17	1,5	0,46	83	83	94	ca. 250
	R1	ABD	14	1,4	0,28	90	86	95	250 → 150
	R2		15	1,4	0,50	78	81	86	250 à 350
	R1	ABCD	13	1,5	0,26	88	85	90	150 à 200
	R2		13	1,5	0,54	74	82	72	250 à 350

1) reactor verwarmd

2) volumebelasting in kg CZV/m³.dag; slibbelasting in kg CZV/kg d.s.dag (inclusief de bijdrage van het slib in de sponsjes aan het droge-stofgehalte)

3) → = verloop

De toepassing van 20 vol.% sponsjes leidde tot een wat betere CZV-verwijdering dan het voorschakelen van een A-trap. De forse verhoging van de volumebelasting in R3 en R4 (derde periode van fase II) beïnvloedde de rendementen weliswaar weinig, maar in absolute zin verslechterden de effluënten van beide reactoren aanmerkelijk (Figuur 11).

Deze resultaten tonen dat de aanwezigheid van in sponsjes geïmmobiliseerd slib het effect van een lagere temperatuur of van een hogere volumebelasting slechts in beperkte mate kan opvangen. Gelet op de gelimiteerde bijdrage die het slib in de sponsjes aan het zuiveringsresultaat kan leveren, mag ook worden verwacht dat een "extra zuiveringsinspanning" voornamelijk door het vrije slib uitgevoerd zal moeten worden.

De CZV-c-rendementen van R5 waren steeds laag, ook tijdens perioden waarin nog voldoende afbreekbaar CZV in het influent aanwezig was (fase I en de derde periode van fase II).

Tabel 18 Samenvatting van een aantal resultaten met de reactoren 3 en 4 tijdens de fasen I en II.

		periode (dag)	temp. (°C)	belastingen ¹⁾		rendementen (%)			SVI ²⁾ (ml/g)
				volume	slib	CZV	CZV-c	Nkj-c	
F A S E I	R3	0- 61	12	1,2	0,5	65	59	2	100 → 300
	R4	0- 61	12	1,2	0,9	37	58	6	100 → 350
	R3	62-106	11	2,6	0,5	67	72	16	ca. 200
	R4	62-106	10	2,6	0,7	54	67	13	50 - 200
F A S E II	R3	29-101	16	1,4	0,27	89	85	92	100 → 250
	R4	29-101	16	0,9	0,32	83 ³⁾	81 ³⁾	92	ca. 50
	R3	107-123	13	1,6	0,26	89	83	92	ca. 200
	R4	107-123	13	0,7	0,24	89 ³⁾	83 ³⁾	97	ca. 50
	R3	128-184	13	2,5	0,34	85	82	46	ca. 200
	R4	128-184	13	2,1	0,68	81 ³⁾	80 ³⁾	42	50 → 350

N.B.: R3 met 20 vol.% sponsjes; R4 alleen tijdens fase II in serie met een A-trap

1) volumebelasting in kg CZV/m³.dag; slibbelasting in kg CZV/kg d.s.dag (inclusief de bijdrage van het slib in de sponsjes aan het droge-stofgehalte)

2) → = verloop

3) inclusief de bijdrage van de A-trap

Tabel 19 Samenvatting van een aantal resultaten met de nazuivering (R5) tijdens de fasen I en II.

	fase I (dag)		fase II (dag)			
	62-106	97-106	0-101	107-123	128-184	198-227
rendementen (%)						
CZV	52	69	negatief	4	55	14
CZV-c	13	7	negatief	7	9	negatief
CZV-zwevend stof	88	96	negatief	1)	66	26
Nkj-c	n.b.	5	1)	1)	11	1)

n.b. = niet bepaald

1) : verschillen te klein om nog rendementen te kunnen berekenen

Tijdens de eerste fase was sprake van een zeer forse reductie van zwevend stof in R5. Dit zwevend stof werd niet teruggevonden als slib in de sponsjes, maar werd daadwerkelijk afgebroken, waarschijnlijk door aquatische wormen die in grote aantallen in de sponsjes werden waargenomen. Gedurende de interimperiode zijn de wormen praktisch verdwenen. Bij de start van het microscopisch onderzoek op dag 29 van fase II werden opnieuw talrijke wormen waargenomen. Voorafgaand hieraan was het droge-stofgehalte van de sponsjes drastisch gereduceerd (Figuur 6).

Tot dag 123 van fase II bevatte het influent van R5 weinig zwevend stof en was de verwijdering hiervan dienovereenkomstig. Tijdens de laatste twee perioden was in het influent van R5 veel zwevend stof aanwezig. De reductie hiervan met 66% (derde periode) moet nu echter wel voor een belangrijk gedeelte op het conto van de forse toename van het droge-stofgehalte van de sponsjes geschreven worden. Gelijktijdig nam het aantal wormen in de sponsjes drastisch af, waardoor in feite ook geen grote zwevend-stofafbraak meer mocht worden verwacht, hetgeen tijdens de laatste periode dan ook niet plaats vond.

stikstofomzettingen

Het gehalte aan Nkj-c in het effluent van R1 bleef steeds lager dan 10 mg N/l en het verschil met R2 werd groter naarmate de temperatuur daalde. Het negatieve effect van de temperatuurdaling op de nitrificatie werd in R1 dus voor een belangrijk gedeelte gecompenseerd door de toevoeging van 20 vol.% sponsjes aan de overige compartimenten. Omdat dit verband bij de CZV-rendementen niet werd waargenomen, werd de extra zuiveringscapaciteit kennelijk hoofdzakelijk voor het op peil houden van de nitrificatie benut. Bij het Ruhrverband [29] werd vastgesteld dat, door sponsjes als drager toe te passen, het nitrificatierendement gedurende de winter (temperatuur 10°C en een voor nitrificatie te korte leeftijd van het vrije slib) langdurig op minimaal 90% gehandhaafd kon worden.

De verschillen qua nitrificatie tussen R3 en R4 waren minimaal. Door de veel hogere belasting tijdens de derde periode daalde het nitrificatierendement in beide reactoren met circa 50%, een verslechtering die voornamelijk de extra te nitrificeren stikstof betrof. Verondersteld mag worden dat de geïmmobiliseerde biomassa in R3 tijdens de 2e periode reeds haar maximaal mogelijke bijdrage aan het zuiveringsproces leverde, waardoor de extra belasting tijdens de laatste periode volledig door het vrije slib moest worden opgevangen. Dit verklaart de praktisch identieke reactie van de reactoren 3 en 4 op deze belastingverhoging. Gelet op de belasting, de temperatuur en de afwezigheid van sponsjes, bleef R4 in feite opmerkelijk goed nitrificeren.

In tegenstelling tot hetgeen in de literatuur is vermeld [16, 27], leidde de aanwezigheid van sponsjes niet tot een duidelijk betere denitrificatie in de reactoren. Aangezien het transport naar binnen van nitraationen en van organische verbindingen eveneens via diffusie plaats moet vinden, mag ook geen forse denitrificatie in de sponsjes worden verwacht. Het lijkt daarom waarschijnlijker dat de in deze praktijk-awzi's waargenomen denitrificatie door het vrije slib werd uitgevoerd.

Het is echter niet goed verklaarbaar waarom tijdens de activiteitsmetingen wel denitrificatie leek plaats te vinden. Door het hoge zuurstofgehalte in de meetvaatjes waren de omstandigheden voor dit proces bij deze metingen in beginsel ongunstiger dan in de reactoren. Ook bij de nitrificatiemetingen door Wolf [40] werd voortdurend een gat in de N-balans vastgesteld, hetgeen uit denitrificatie werd verklaard.

De Linpor N installatie R5 nitrificeerde aanmerkelijk minder goed dan volgens de literatuur (zie Tabel C2 in Bijlage C) en de resultaten van de activiteitsmetingen zou moeten kunnen. Uit deze metingen kan berekend worden dat de populatie-omvang toereikend was om 0,28 kg N/m³ reactor.dag te nitrificeren. Dit stemt redelijk overeen met hetgeen in de literatuur over de maximale nitrificatiecapaciteit van Linpor N (bij 13°C en met 20 vol.% sponsjes) is vermeld. Er werd tijdens de derde periode echter slechts 0,1 kg N/m³ reactor.dag genitrificeerd. Een duidelijke verklaring voor dit grote verschil ontbreekt, het zuurstofgehalte in R5 was in elk geval niet te laag. Mogelijk is het resultaat sterk beïnvloed door de hoge zwevend-stofbelasting tijdens de derde periode of was de menging van de sponsjes in de reactor niet voldoende.

In Tabel 20 wordt de nitrificatiecapaciteit van enkele slib-op-dragersystemen vermeld. De vergelijking met Linpor N toont dat met sponsjes als drager een relatief hoge omzetting per m² hechtingsoppervlak bewerkstelligd kan worden. Door de beperking van de maximaal mogelijke hoeveelheid drager, blijft de nitrificatiecapaciteit van Linpor N desondanks achter bij die van andere slib-op-dragersystemen.

Tabel 20 Nitrificatiecapaciteit (per m² hechtingsoppervlak en/of per m³ reactor) in slib-op-dragersystemen voor nitrificatie van effluënten.

referentie	$\frac{\text{g N}}{\text{m}^2 \cdot \text{dag}}$	$\frac{\text{kg N}}{\text{m}^3 \cdot \text{dag}}$	temperatuur (°C)	drager	naam
2	1,7	0,4	20	n.v.	n.v.
7	0,4-0,7	1,2-2,2	n.v.	zand	Oxitron
24	n.v.	0,45-0,75	12-19	bioliet	Bioflor
24	n.v.	0,50-0,74	12-19	n.v.	Biocarbhone
31	n.v.	0,75	22	n.v.	Biocarbhone
32	0,8-1,3	0,5-0,8	15-20	PVC-pijpjes	n.v.
19	0,50-0,75	1,0-1,5	13-19	lavakorrels	Airlift 1)
31	2,3 2)	0,35	22	30% sponsjes	Linpor N
40	3,3 2)	0,50	18-21	30% sponsjes	Linpor N
40	2,1 2)	0,32	13-17	30% sponsjes	Linpor N
3)	2,8 2)	0,28	13	20% sponsjes	Linpor N
41	1,5-5,0	n.v.	10-20	kunststof	Biorotor

n.v. = niet vermeld

1) geen nazuivering, maar simultaan CZV-afbraak

2) berekend, uitgaande van 50 m² oppervlak per 10 vol.% sponsjes

3) activiteitsmetingen bij het onderhavige onderzoek

bezinkeigenschappen en processtabiliteit

De bezinkeigenschappen van de slibben in de reactoren 1 t/m 4 fluctueerden aanmerkelijk. Het ontstaan van licht slib werd dus niet zonder meer voorkomen door sponsjes als drager toe te voegen. Tijdens fase II nam het aantal draden in R1 en R3 geleidelijk af. Uit de tabellen 17 en 18 zou geconcludeerd kunnen worden dat een verband met de slibbelasting bestaat (alleen veel draadvormers bij slibbelastingen > 0,3 à 0,4 kg CZV/kg d.s.dag). Eenduidig is dit niet aangezien eerder geconcludeerd werd dat de CZV-afbraak voor een belangrijk deel door het vrije slib werd uitgevoerd.

De invloed van de slibbelasting op het ontstaan van licht slib in een bepaalde awzi is van een aantal factoren afhankelijk, waarbij de configuratie van de aërietank een grote rol speelt [10]. Het verlagen van de slibbelasting kan zelfs tot het ontstaan van licht slib leiden.

Dit betekent dat het mogelijk effect van de sponsjes in sterke mate bepaald wordt door de procesomstandigheden in de betreffende awzi. De huidige goede bezinkeigenschappen van het slib in de awzi Freising [16] kunnen niet zonder meer uit de toevoeging van de sponsjes worden verklaard. Het propstromingskarakter van de aëratietanks speelt hierbij een minstens zo grote rol. Gelet op de volumebelasting in deze awzi, zouden zonder sponsjes ook goede bezinkeigenschappen bewerkstelligd moeten kunnen worden, via het toepassen van het selector-mechanisme [10] in het voorste gedeelte van de aëratietanks. Het is in dit kader opvallend dat in een publikatie over de ervaringen gedurende vier jaar met Linpor C niets over de bezinkeigenschappen van het slib wordt vermeld [22], hoewel dit eerder wel als een belangrijk argument bij de beslissing om dit proces te kiezen werd genoemd [30].

De toevoeging van een poreuze drager zal in beginsel tot een stabiel proces leiden [23]. Hierbij spelen zowel de lagere slibbelasting als het zich via hechting kunnen handhaven van bepaalde organismen een rol. De resultaten van het onderhavige onderzoek bevestigen deze conclusie. Hierbij moet echter nog wel worden opgemerkt dat de verschillen qua stabiliteit tussen R3 (met 20 vol.% sponsjes) en R4 (met een voorgeschakelde A-trap) niet eenduidig waren.

slibproductie

De toepassing van sponsjes leidde niet tot een significant lagere slibproductie. Dit mocht echter ook niet worden verwacht, omdat slibconsumerende wormen in R1 t/m R4 en R6 praktisch ontbraken en protozoën niet in staat zijn slibvlokken te consumeren of biofilmen fors te begrazen. Gelet op het feit dat ze uit R5 verdwenen toen de belasting met zwevend stof en N_{kj} van deze reactor sterk toenam, is een goede zuurstofvoorziening in de sponsjes mogelijk doorslaggevend voor het zich kunnen handhaven van deze wormen.

6.4 Praktijkervaringen en zuiveringstechnische perspectieven

In deze paragraaf zal worden besproken of de zuiveringstechnische perspectieven van deze drager, op basis van de verkregen resultaten en de schaarse praktijkervaringen met Linpor, globaal aangegeven kunnen worden.

Het zwaartepunt ligt hierbij op de mogelijkheden die sponsjes bieden bij het nitrificatieproces (Linpor C/N en N). Vooral het antwoord op de vraag of een nitrificerende populatie van voldoende omvang zich via hechting kan handhaven in een actief-slibinrichting, met een voor nitrificatie te korte slibleeftijd, is van groot belang.

Linpor C

In de awzi München I zijn in 1986/1987 aan twee van de drie straten sponsjes toegevoegd. Het toevoegen van de sponsjes was nogal tijdrovend; bovendien heeft het 4-6 maanden geduurd voordat sprake was van een goede menging van de sponsjes in de aëratietank [21]. In de straten met sponsjes wordt op 3 in plaats van 2 mg O₂/l gestuurd, omdat de sponsjes anders niet alleen bezinken - en het moeilijk is om ze vervolgens weer te suspenderen - maar ook volledig anaëroob worden en aanleiding geven tot stankemissie [21]. Technische problemen hebben zich de laatste jaren niet meer voorgedaan; de zeefplaat verstopt niet en de verliezen aan drager zijn minimaal.

In Tabel 21 zijn enkele resultaten vermeld. De iets betere resultaten in de straten met sponsjes kunnen echter ook uit de hogere gehalten aan zuurstof en vrij slib in deze aëratietanks verklaard worden.

Tabel 21 *Bedrijfsresultaten van de awzi München I [22].*

	vol.% sponsjes		
	0	10	30
vrij slib (kg/m ³)	2,8	3,8	3,9
slib totaal (kg/m ³)	2,8	5,1	6,6
SVI (ml/g)	150	140	120
belasting (kg BZV/m ³ .dag)	1,5	1,7	1,6
belasting (kg BZV/kg d.s.dag) ¹⁾	0,58	0,35	0,24
BZV-rendement (%)	92	94	95
CZV-rendement (%)	82	85	86

1) slib in de sponsjes volledig meegerekend

Nitrificatie vindt nauwelijke plaats [21], hetgeen betekent dat de nitrificeerders de sponsjes bij hoge belastingen niet koloniseren.

Het tweede voorbeeld van Linpor C betreft een awzi bij een papierfabriek [22, 30]. Aan de aëratietank is in 1984 20 vol.% sponsjes toegevoegd. De laatste jaren varieerde de volumebelasting van 1,1 tot 1,5 kg BZV/m³.dag en werden zuiveringsrendementen van circa 85%

(CZV) en 96% (BZV) gerealiseerd. Over de bezinkeigenschappen wordt, zoals eerder al is opgemerkt, niets vermeld in de meest recente publikatie over deze awzi. Door het ontbreken van een referentie kan niet worden aangegeven welke netto bijdrage het geïmmobiliseerde slib aan deze goede zuiveringsresultaten leverde.

Linpör C/N

In de awzi Freising was in het verleden sprake van chronische licht-slibproblemen. Na de toevoeging van 20 vol.% sponsjes (in 1985) zijn de bezinkeigenschappen van het slib sterk verbeterd. In Tabel 22 zijn enkele resultaten weergegeven.

Tabel 22 *Bedrijfsresultaten van de awzi Freising [16].*

	periode 1	periode 2
vrij slib (kg/m ³)	5,1	3,9
slib totaal (kg/m ³)	6,8	5,2
volumebelasting (kg BZV/m ³ .dag)	1,1	1,0
slibbelasting (kg BZV/kg d.s.dag) ¹⁾	0,17	0,19
O ₂ -gehalte (mg/l)	0,7-3,8	2,6-4,9
temperatuur (°C)	17	17
SVI (ml/g)	85	103
BZV-rendement (%)	98	98
Nkj-rendement (%)	67	76
CZV-rendement (%)	86	85

1) inclusief de bijdrage van het geïmmobiliseerde slib

Deze kunnen op verschillende wijzen worden geïnterpreteerd. De zuiveringsresultaten zijn uitstekend indien louter gelet wordt op de volumebelasting. Een Nkj-rendement van circa 70% is echter minder spectaculair indien de slibbelasting als maatstaf wordt gehanteerd en gelet wordt op de temperatuur en het zuurstofgehalte in de awzi. Dezelfde slibbelasting ging bij het onderhavige onderzoek gepaard met een duidelijk verdergaande nitrificatie, zonder dat sponsjes aanwezig waren (R2). Het feit dat de awzi Freising bij deze belasting en temperatuur nog steeds niet volledig nitrificeerde, bevestigt eigenlijk dat het geïmmobiliseerde slib slechts een beperkte bijdrage aan het zuiveringsproces kan leveren.

In de awzi Tacherting wordt eveneens 20 vol.% sponsjes toegepast [27]. Aan vrij slib is 4,9 kg/m³ aanwezig, inclusief het geïmmobiliseerde slib bedraagt het droge-stofgehalte 9,1 kg/m³. De CZV- en Nkj-belastingen bedragen respectievelijk 0,7 kg BZV/m³.dag en 0,13 kg N/m³.dag. In deze awzi vindt een vergaande BZV-reductie plaats, het Nkj-rendement is 89%. Deze resultaten stemmen goed overeen met die van R1.

Linpor N

Dit proces wordt slechts in één awzi toegepast [22]. Met 20 vol.% sponsjes werden, bij temperaturen van 10-16°C, omzettingen van 0,19-0,29 kg N/m³ reactor.dag gerealiseerd. De auteur vermeldt niets over het zuurstofgehalte in de tank.

perspectieven

De mogelijkheden van deze drager worden beperkt door de gesignaleerde diffusielimitering, waardoor slechts een deel van het geïmmobiliseerde slib kan bijdragen aan het zuiveringsproces.

Voor Linpor C wordt deze bijdrage geschat op maximaal 1,5 kg CZV/m³ reactor.dag (20 vol.% sponsjes en 2 mg O₂/l). De procentuele bijdrage zal bovendien dalen naarmate de belasting van de awzi hoger is. Bij een belasting van bijvoorbeeld 4,5 kg CZV/m³.dag ($\approx$ 0,6 kg BZV/kg d.s.dag) bedraagt deze hooguit 30%. De effluentkwaliteit zal hierdoor niet drastisch verbeteren; wel mag een betere reductie van zwevend stof worden verwacht en mogelijk een wat stabiel proces. Hier staat tegenover, gelet op de ervaringen in München, dat een relatief hoog zuurstofgehalte gehandhaafd moet worden om anaërobie in de sponsjes te voorkomen.

Linpor C/N lijkt meer perspectieven te bieden, met name in awzi's die net niet of onvolledig nitrificeren (belasting 1 à 1,5 kg CZV/m³.dag). In Nederland zijn in het laatste decennium veel van dit soort awzi's gebouwd. Het geïmmobiliseerde slib levert een relatief grote bijdrage aan de nitrificatie, waardoor Nkj-rendementen van 80 à 90% ook gedurende de winter haalbaar lijken. Er is vastgesteld dat simultaan defosfateren met behulp van ijzer, de nitrificatie door het slib in de sponsjes niet beïnvloedt [29].

Behalve het positieve effect op de nitrificatie mag, net als bij Linpor C, gerekend worden op een betere verwijdering van zwevend stof, een stabiel proces en misschien ook op een lagere SVI.

Bij hogere belastingen neemt het effect van de toepassing van sponsjes op de nitrificatie snel af, waardoor in feite Linpor C-omstandigheden ontstaan.

Met Linpor N wordt een hoge Nkj-omzetting per m^3 reactor nagestreefd. Met 20 vol.% sponsjes en 2 mg O_2/l wordt de omzetting capaciteit geschat op 0,11 kg N/ m^3 reactor.dag. Dit kan worden opgevoerd tot 0,3-0,5 kg N/ m^3 reactor.dag door 30 vol.% sponsjes toe te passen en het zuurstofgehalte op 5 à 6 mg/l te handhaven [31, 40].

Dit laatste illustreert dat de diffusielimitering ten dele ondervangen kan worden door:

- het concentratieverschil te vergroten, dat wil zeggen een hoger zuurstofgehalte in de waterfase toe te passen. Of een zuurstofgehalte $\gg 2$ mg/l in een conventionele awzi, waarin men Linpor C of C/N wil toepassen, economisch aantrekkelijk is, staat echter nog te bezien. Er zijn echter ook systemen waarin een hoger zuurstofgehalte bij het proces hoort (awzi's met zuivere zuurstof voor beluchting, Deep Shaft, Multireactor). In hoeverre dan de toevoer van andere voedingsstoffen de beperkende factor gaat vormen, kan op basis van de verkregen resultaten niet worden aangegeven;
- de lengte van de transportweg te verkleinen, door de vorm of het formaat van de sponsjes te veranderen;
- het volumepercentage sponsjes op te voeren.

6.5 Enkele economische aspecten

Het Hoogheemraadschap West-Brabant heeft medio 1989 overwogen het Linpor C/N proces toe te passen. Het betrof een awzi van circa 100.000 i.e., die 's winters niet en 's zomers onvolledig nitrificeerde (slibbelasting 0,2 kg BZV/kg d.s.dag). In de nabije toekomst zou de belasting nog toenemen en diende aan een Nkj-lozingseis van gemiddeld 20 mg N/l (bij temperaturen $\geq 12^\circ\text{C}$) voldaan te worden. In beginsel zou dit opgelost kunnen worden door de awzi uit te breiden met een vierde aëratietank. Het toepassen van Linpor C/N leek een alternatief. Een derde mogelijkheid, om de slibbelasting te verlagen, betrof de toepassing van voorprecipitatie, omdat toch vergaand gedefosfateerd diende te worden. Bij de eerste twee mogelijkheden kon dit via simultaan defosfateren met FeCl_3 bewerkstelligd worden. Bij alle opties moesten nog enkele andere voorzieningen getroffen worden; onder andere het bouwen van een extra nabezinktank.

Een adviesbureau heeft een kostenvergelijking van de drie mogelijkheden opgesteld. Uitgaande van de op dat tijdstip bekende informatie - de diffusielimitering was toen nog niet

gesignaleerd - werd berekend dat aan de drie bestaande aëratietanks 28 vol.% sponsjes toegevoegd moest worden (totaal: 1750 m³ sponsjes). Hierbij werden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- te nitrificeren : 1700 kg N/dag
- nitrificatie-activiteit : 1,5 mg N/g d.s.uur
- biomassaconcentratie in de sponsjes : 20 kg/m³

De totale jaarlijkse kosten voor kapitaallasten, onderhoudskosten, chemicaliën, energie en slibverwerking werden als volgt begroot:

- Linpor C/N + simultaan defosfateren : f 4.070.000,-
- Voorprecipitatie : f 4.570.000,-
- Vierde straat + simultaan defosfateren : f 3.565.000,-

Hierbij werd het jaarlijks verlies aan sponsjes geschat op 2% en werd voor de levensduur van de drager 15 jaar aangehouden.

Aangezien Linpor C/N, door de hoge prijs van het dragermateriaal, niet tot een duidelijke besparing van kosten zou leiden, werd besloten de awzi uit te breiden met een vierde straat en simultane defosfatering toe te gaan passen.

Bij de kostenvergelijking werd uitgegaan van een prijs van circa f 1500,-/m³ drager. Daarbij komen dan nog de kosten voor de mammoetpomp(en), zeefplaten, extra beluchtingselementen en installatiewerkzaamheden. Volgens de meest recente prijsopgave biedt de firma Linde het totale pakket, met 20 vol.% sponsjes, nu aan voor f 350,-/m³ aëratietank [28]. De bijdrage die het geïmmobiliseerde slib kan leveren correspondeert met een O₂-verbruik voor CZV-omzetting en/of nitrificatie van circa 0,5 kg O₂/m³ reactor.dag. Dit leidt tot een prijs van f 700,-/kg O₂-verbruikt.m³ reactor.dag. Deze waarde kan vergeleken worden met investeringskosten voor conventionele systemen. Uitgaande van 100.000 i.e. bedragen deze voor [38a]:

I: slibbelasting 0,05 kg BZV/kg d.s.dag vergaande nitrificatie 80% denitrificatie	}	f 705,-/kg O ₂ verbruikt.m ³ reactor.dag
II: slibbelasting 0,15 kg BZV/kg d.s.dag geen nitrificatie	}	f 445,-/kg O ₂ ver- bruikt.m ³ .dag

Ook volgens deze berekeningswijze is het toepassen van Linpor niet goedkoop. Het gebruik van 30 vol.% sponsjes, zoals eigenlijk bij Linpor N nodig is, biedt uiteraard nog minder perspectieven.

De kosten moeten nog verhoogd worden met die van het extra energieverbruik. Hierover is nauwelijks informatie beschikbaar. In München schat men dat het sturen op 3 in plaats van 2 mg O₂/l en het recirculeren met mammoetpompen tot een 20% hoger energieverbruik heeft geleid [21].

Samenvattend wordt geconcludeerd dat het Linpor-proces relatief duur is. Uit kostenoverwegingen lijkt toepassing alleen zinvol in awzi's, waarvan de zuiveringscapaciteit vergroot moet worden, maar waarbij uitbreiding ter plaatse door ruimtegebrek niet mogelijk is. Hierbij mag dan echter niet worden vergeten, dat er ook andere mogelijkheden zijn om de capaciteit van een bestaande awzi te vergroten [o.a. 1, 2, 7, 8, 14, 19, 24, 31, 33].

7. CONCLUSIES

Uit het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Met 20 vol.% Linpor-sponsjes kan 2,5-5 kg d.s./m³ reactor worden geïmmobiliseerd.
2. Het transport in/uit sponsjes, met een droge-stofgehalte groter dan circa 10 kg d.s./m³ spons, blijkt echter diffusie-gelimiteerd te zijn. Hierdoor kunnen voornamelijk de micro-organismen aan de buitenkant van de sponsjes bijdragen aan de omzetting van CZV en Nkj.
3. Het toevoegen van 20 vol.% sponsjes correspondeert daardoor met het creëren van circa 100 m² hechtingsoppervlak per m³ reactor.
4. Met 20 vol.% sponsjes en 2 mg O₂/l in de omringende waterfase wordt de bijdrage, die het geïmmobiliseerde slib kan leveren aan de omzetting van Nkj+CZV, onder enig voorbehoud geschat op een hoeveelheid die overeenkomt met een zuurstofverbruik van 0,5 kg O₂/m³ reactor.dag. Deze bijdrage kan worden verhoogd door het zuurstofgehalte en/of het percentage sponsjes op te voeren.
5. De aanwezigheid van slib in sponsjes leidt echter wel tot een wat lagere activiteit van het vrije slib.
6. Het CZV-rendement neemt toe door de toepassing van deze drager. Hieraan draagt vooral de betere verwijdering van zwevend stof bij. Aan de extra "zuiveringsinspanning" die vereist is indien de belasting van een reactor met sponsjes wordt verhoogd, kan het geïmmobiliseerde slib, door de onder 2 genoemde limitatie, echter slechts een beperkte bijdrage leveren.
7. Bij een slibbelasting van circa 0,2 kg BZV/kg d.s.dag is op de sponsjes een relatief forse nitrificerende populatie aanwezig. Het lijkt daardoor mogelijk om met Linpor C/N, in awzi's met deze slibbelasting, ook gedurende de winter vergaand te nitrificeren. Bij nog hogere slibbelastingen kunnen nitrificeerders zich niet in voldoende mate op de sponsjes handhaven.

8. De diffusielimitering heeft tevens tot gevolg dat geen grote bijdrage van het geïmmobiliseerde slib aan de denitrificatie mag worden verwacht.
9. De resultaten van de proef met Linpor N (de nazuivering) waren niet consistent, maar op basis van literatuurgegevens wordt geconcludeerd dat in een reactor met 30 vol.% sponsjes en 5-6 mg O₂/l, 0,3-0,5 kg N/m³ reactor.dag genitrificeerd kan worden.
10. De toepassing van Linpor leidt alleen tot een lagere slibproductie, indien een omvangrijke wormenpopulatie in de sponsjes gehandhaafd kan worden. Realisatie hiervan vereist nader onderzoek.
11. Toepassing van deze drager kan tot betere bezinkeigenschappen van het vrije slib leiden. Het is echter zeker geen algemeen toepasbare licht-slibbestrijdingsmethode.
12. Door de aanwezigheid van extra biomassa in de aëratietank, neemt de processtabiliteit toe.
13. De toepassing van 20 vol.% sponsjes leidt tot een beter CZV-zuiveringsrendement dan de voorschakeling van een A-trap. Qua nitrificatie zijn de verschillen tussen beide configuraties minimaal.
14. Samenvattend wordt geconcludeerd dat het Linpor-proces vooral geschikt is om een wat lagere slibbelasting te bewerkstelligen en zo bijvoorbeeld de nitrificatie te verbeteren in awzi's die net niet of onvolledig nitrificeren. De kosten van dit dragermateriaal zijn echter hoog.

8. REFERENTIES

1. Anderson, B.
Tentative nitrogen removal with fixed bed processes in Malmö sewage treatment plant.
Proc. Conf.: Technical advances in biofilm reactors, Nice, April 1989, p. 265-276.
2. Bonhomme, M., F. Rogalla, G. Boisseau and J. Sibony
Enhancing nitrogen removal in activated sludge with fixed biomass.
Proc. Conf.: Technical advances in biofilm reactors, Nice, April 1989, p. 147-155.
3. Bossier, P., J. Poels, P. van Assche and W. Verstraete
Influence of the dimensional characteristics of polyurethane foam on high rate anaerobic digestion of piggery manure.
Biotechnology Letters, 8, 1986, 901-906.
4. Boyle, W.C. and A.T. Wallace
Status of porous biomass support systems for wastewater treatment: An innovative/alternative technology assessment.
Project Summary EPA/600/S2-86/19 April 1986.
5. Bral, E.A.M.A., J.F. de Kreuk en D.H. Eikelboom
Slib-op-sponsjes. Fase I.
MT-TNO, rapport R 87/234b, 1989.
6. Centraal Bureau voor de Statistiek
Waterkwaliteitsbeheer. Deel B: Zuivering van afvalwater 1984.
Staatsuitgeverij/CBS-Publicaties, 's-Gravenhage, 1986.
7. Cooper, P.F.
Aerobic fluidized and pseudo-fluidized bed.
In: Sidwick, J.M. (Ed.) Topics in wastewater treatment. Critical reports on applied chemistry; Volume 1.
Blackwel Scientific Publications, Oxford, 1965, p. 45-67.

8. Eberhardt, H., O. Klee und W. Weber
Leistungssteigerung einer überlasteten Belebungsanlage durch Einbau submerser Festkörper.
Wasserwirtschaft, 74, 1984, p. 47-53.
9. Eikelboom, D.H. en H.J.J. van Buijsen
Handleiding voor microscopisch slibonderzoek.
STORA, 's-Gravenhage, 1984.
10. Eikelboom, D.H.
Handboek voorkomen en bestrijden van licht slib.
STORA, 's-Gravenhage, 1988.
11. Eikelboom, D.H.
Extra toepassingsmogelijkheden voor protozoa en metazoa bij de zuivering van afvalwater.
MT-TNO, rapport R 88/286, 1988.
12. Fuchs, U.
Linpor-N trägergebundene Ammoniumentfernung ohne freien Belebtschlamm.
Praxisergebnisse aus 4 Fallstudien und einer technischen Anlage.
Abwassertechnik, Heft 6, 1987.
13. Hegemann, W.
Leistungsverbesserung biologischer Anlagen.
Korrespondenz Abwasser, 30, 1983, 704-711.
14. Hegemann, W.
Nitrifikation/Denitrifikation in Belebungsanlagen mit Aufwuchsflächen und Festbettreaktoren.
ATV-Seminar, KFAA Essen, 18/19-9-1986.
15. Hegemann, W. und E. Engelmann
Belebungsverfahren mit Schaumstoffkörpern zur Aufkonzentrierung von Biomasse.
GWf - Wasser/Abwasser, 124, 1983, 233-239.

16. Hegemann, W. und A. Wildmoser
Sanierung einer Belebungsanlage durch den Einsatz von schwimmenden Aufwuchskörpern zur Biomassenanreicherung.
GWF - Wasser/Abwasser, 127, 1986, 415-420.
17. Voorneburg, F. van en B.A. Heide
Mogelijkheden van slib-op-dragersystemen voor de aërobe biologische zuivering van stedelijk afvalwater (literatuurstudie).
STORA, 's-Gravenhage, 1986.
18. Huysman, P., P. van Meenen, P. van Assche and W. Verstraete
Factors affecting the colonization of non porous and porous packing materials in model upflow methane reactors.
Biotechnology Letters, 5, 1983, 643-648.
19. Kampf, R., D.H. Eikelboom en J.F. de Kreuk
Ontwikkeling van een slib-op-dragersysteem voor de aërobe zuivering van stedelijk afvalwater. Fase I: Verkennend onderzoek in een drie-fasen airliftreactor.
STORA, 's-Gravenhage, 1987.
20. Linde, A.G.
Octrooi EP0092159-B1, 1986.
21. Martin
Bedrijfsleider awzi München I. Persoonlijke mededeling, 1989.
22. Morper, M. and W. Wildmoser
Improvement of existing wastewater treatment plant efficiencies without enlargement of tankage by application of the Linpor-processes. Case studies.
Proc. Int. Specialized Conference on: Upgrading of wastewater treatment plants.
Munich, 3-7 September 1989, p. 191-199.
23. Nicol, J.P., L.D. Benefield, E.D. Wetzel and J.A. Heidman
Activated sludge systems with biomass particle support structures.
Biotech. and Bioeng., 31, 1988, 682-695.

24. Paffoni, C., B. Vedry and M. Gonsailles
Tertiary nitrification study carried out specifically for S.I.A.A.P.
Proc. Conf. Technical advances in biofilm reactors, Nice, April, 1989.
25. Pascik, I.
Modified polyurethane carriers for the biochemical wastewater treatment.
Proc. Conf. Technical advances in biofilm reactors, Nice, April, 1989, p. 49-58.
26. Reimann, H.
The Linpor process with fixed biomass on plastic foam. Practical aspects and results.
In: Use of fixed biomass for water and wastewater treatment.
Proc. 37th International Conference CEBEDEAU - Liege, May 1984, p. 353-361.
27. Reimann, H.
Biologie auf Schaumstoffträgermaterial.
Praxisergebnisse des Linpor - Verfahrens.
Arbeitsbericht Fa. Linde, 1 April 1986.
28. Reimann, H.
Firma Linde, Persoonlijke mededeling, 1989.
29. Reinarth, G. und V. Knolle
Unterstützung der Nitrifikation beim Belebtschlammverfahren durch Aufwuchsbiomasse. Laborversuche bei unterschiedlichen Temperaturen.
Ruhrverband, Januar 1990.
30. Renz, G.
Sanierung der Restabwasserkläranlage mit dem Linpor - Verfahren.
Wochenblatt für Papierfabrikation, 113, 1985, 805-808.
31. Rogalla, F. and M. Payraudeau
Tertiary nitrification with fixed biomass reactors.
Water Supply, 6, 1988, 347-354.

32. Saintpierre, O.
Lit bacterien immerge de nitrification tertiaire sur materiaue plastique.
Environ. Technol. Letters, 9, 1988, 1059-1072.
33. Schlegel, S.
Der Einsatz von getauchten Festbettkörpern beim Belebungsverfahren.
GWf - Wasser/Abwasser, 127, 1986, 421-428.
34. Schömig, U.
Physiologische und elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Nitrifikation
beim kombinierten Belebungs-Festkörper verfahren (Linpor-Verfahren).
Diplomarbeit TU München, 1988.
35. Starkenburg, W. van
Het gebruik van poreuze dragermaterialen in de waterzuivering.
H₂O, 20, 1987, 393-394.
36. Technicon
Autoanalyzer II. Industrial method.
Nitriet: voorschrift no. 102 - 70 W/C (december 1977)
Nitraat: voorschrift no. 100 - 70 W/B (januari 1988).
37. Tholin, A.L.
U.S. patent 2 071 591, 1935.
38. Walker, I., P.F. Cooper, H.E. Crabtree and R.P. Aldre
Evaluation of the Captor process for uprating an overloaded sewage work.
Paper presented at the symposium "Process engineering aspects of immobilised cell
systems".
UMIST, Manchester, 28-29 March, 1984.
- 38a. Weesendorp, P.
DHV, persoonlijke mededeling, 1989.
39. White, M.J.D.
Instruction manual for W.R.C. settling apparatus for activated sludge.
Water Research Centre, Stevenage, TR103, 1975.

40. Wolf, F.
Bericht über Untersuchungen in halbertechnischen Massstab am Linpor-N-Verfahren.
Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft, München, Bericht 7/84.
41. Wouda, T.W.M.
Stikstofverwijdering met biorotoren.
H₂O, 15, 1982, 595-600.

BIJLAGE A ZUURSTOFGEHALTES IN DE REACTOREN 1 T/M 4

Fig. Het verloop van het zuurstof-
gehalte in reactor 1

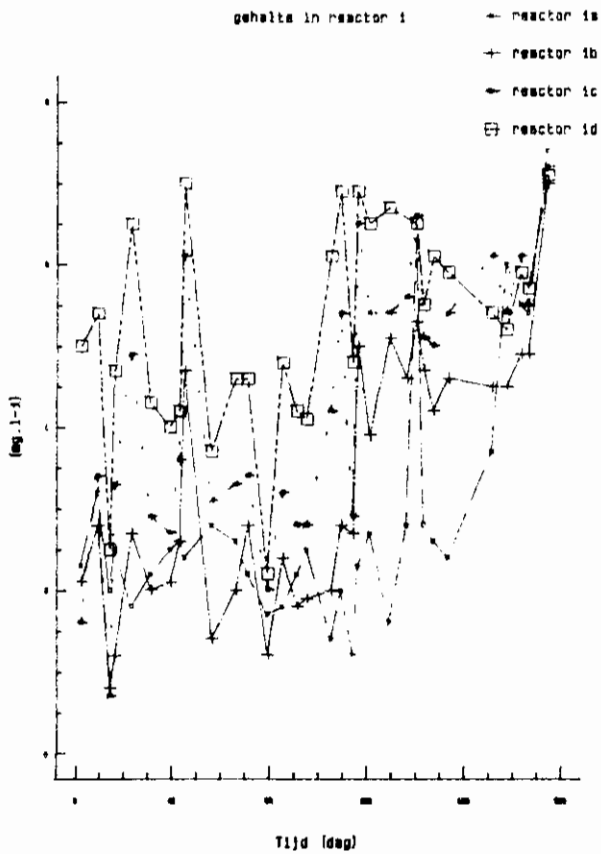


Fig. Het verloop van het zuurstof-
gehalte in reactor 2

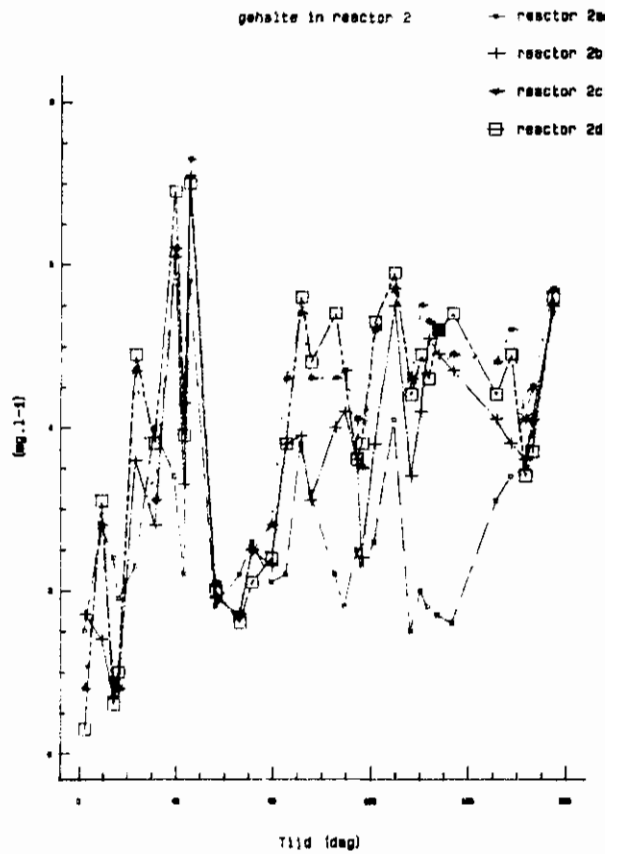


Fig. Het verloop van het zuurstof-
gehalte in reactor 3

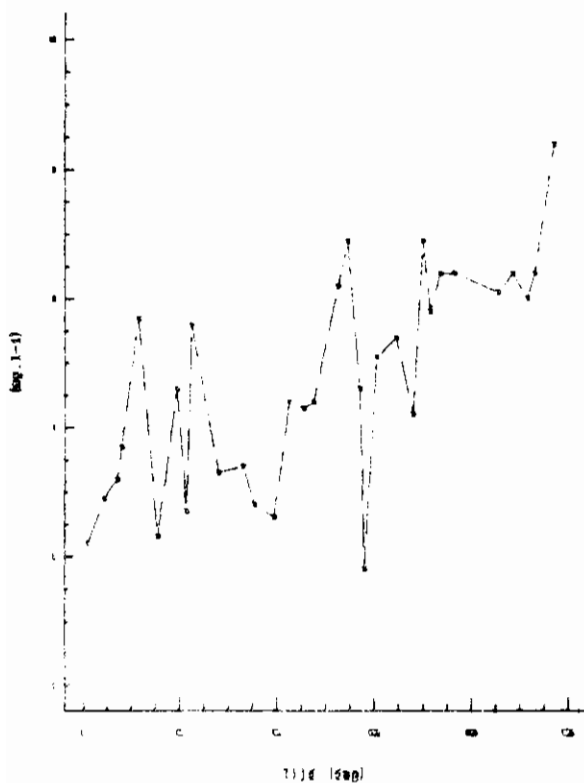
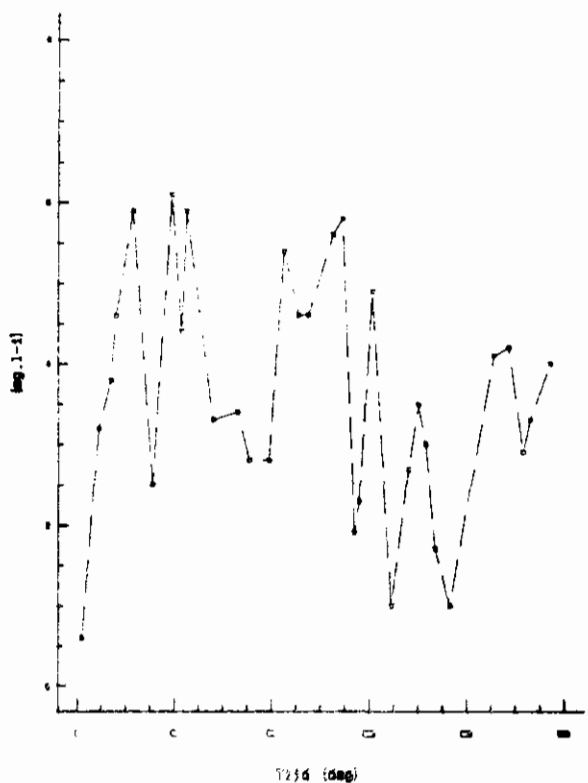


Fig. Het verloop van het zuurstof-
gehalte in reactor 4



BIJLAGE B ANALYSE-UITKOMSTEN (CZV EN Nkj) VAN DE REACTOREN 1 T/M 4

Tabel B1 Gemiddelde CZV-waarden (mg/l) en CZV-rendementen (%) van de reactoren 1 en 2.

sponsjes in ²⁾ reactoren	D		AD		ABD		ABCD	
	1*	2	1*	2	1*	2	1*	2
CZV influent	586	586	485	485	468	468	467	467
CZV effluent	50	159	49	82 ¹⁾	48	105 ¹⁾	54	120 ¹⁾
rendement	91	73	90	83	90	78	88	74
CZV-c influent	363	363	331	331	324	324	324	324
CZV-c effluent	36	50	37	55	46	61	49	59
rendement	90	86	89	83	86	81	85	82

* met sponsjes

1) exclusief enkele extreme waarden

2) A t/m D: compartimenten in de reactoren 1 en 2.

Tabel B2 Gemiddelde CZV-waarden (mg/l) en CZV-rendementen (%) van de reactoren 3 en 4.

periode reactoren	dag 29-101		dag 107-123		dag 128-184	
	3*	4	3*	4	3*	4
CZV influent	450	295	390	176	493	410
CZV effluent	50	75	44	45	76	92 ¹⁾
rendement	89	75	89	74	85	78
CZV-c influent	321	170	256	126	345	248
CZV-c effluent	47	62	43	43	62	69
rendement	85	64	83	66	82	71

* met sponsjes

1) exclusief enkele extreme waarden.

Tabel B3 Gemiddelde concentraties (mg/l) van enkele stikstofverbindingen en de Nkj-rendementen (%) van de reactoren 1 en 2.

sponsjes in reactoren	D		AD		ABD		ABCD	
	1*	2	1*	2	1*	2	1*	2
Nkj influent	74	74	69	69	70	70	70	70
Nkj effluent	2,4	8,1	2,1	5,2	3,0	9,9 ¹⁾	7,0	22 ¹⁾
rendement	97	89	97	92	96	86	90	69
Nkj-c influent	60	60	61	61	63	63	65	65
Nkj-c effluent	0,5	1,4	1,6	3,5	3,0	8,7	6,2	18
rendement	99	98	97	94	95	86	90	72
NO ₂ ⁻ -N effluent	0,3	3,1	0,3	2,2	0,9	3,9	0,9	2,5
NO ₃ ⁻ -N effluent	42	27	40	33	41	29	34	24

* met sponsjes

1) exclusief enkele extreme waarden.

Tabel B4 Gemiddelde concentraties (mg/l) van enkele stikstofverbindingen en de Nkj-rendementen (%) van de reactoren 3 en 4.

periode reactoren	dag 29-101		dag 107-123		dag 128-184	
	3*	4	3*	4	3*	4
Nkj influent	68	66	60	50	75	70
Nkj effluent	4,7	4,9	4,8	1,3	39	33 ¹⁾
rendement	93	93	92	97	48	53
Nkj-c influent	61	59	55	46	70	62
Nkj-c effluent	4,7	4,6	4,2	1,4	38	36
rendement	92	92	92	97	46	42
NO ₂ ⁻ -N effluent	2,0	1,4	2,7	0,6	0,7	1,2
NO ₃ ⁻ -N effluent	29	42	25	42	5,9	13

* met sponsjes

1) exclusief enkele extreme waarden.

BIJLAGE C DE INVLOED VAN TRANSPORT VAN VOEDINGSSTOFFEN OP DE BIJDRAGE VAN HET SLIB IN DE SPONSJES AAN HET ZUIVERINGSPROCES

Actief-slibvlokken zijn meestal enigszins afgeronde deeltjes, met een diameter van 50-500 μm . De organismen aan de rand van de vlok kunnen de voedingsstoffen direct uit de omringende waterfase opnemen. Het grootste gedeelte van de populatie is echter aangewezen op transport via diffusie, hetgeen impliceert dat de voedselconcentratie afneemt naarmate de afstand tot de rand van de vlok groter is. Voor zuurstof bijvoorbeeld geldt de vuistregel dat, bij een O_2 -concentratie van 2 mg/l in de waterfase, het centrum van de vlok zuurstofloos wordt indien de transportweg langer is dan 100 μm . Er mag verondersteld worden dat de plaats en de activiteit van een bepaald organisme in de vlok vooral door zulke gradiënten wordt bepaald.

De Linpor-sponsjes zijn met hun riblengte van 13000 μm gigantisch groot in vergelijking met actief-slibvlokken. Door het forse formaat van de poriën (200 of 1000 μm) en de grote porositeit (94%), zal water gemakkelijk door lege sponsjes kunnen stromen. Experimenteel werd vastgesteld dat het concentratieverschil in/buiten de sponsjes binnen 15 sec. na het toevoegen van een kleurstof was genivelleerd [34].

De doorstroming wordt echter ongetwijfeld beïnvloed door in de sponsjes geïmmobiliseerde biomassa. De kardinale vraag is nu: Hoe groot is dit effect, bij gangbare biomassagehalten van 15-25 kg d.s./m³.spons; stroomt het water dan nog steeds gemakkelijk tussen de naar binnen gemigreerde vlokken door, waardoor de voedselvoorziening van de micro-organismen in de sponsjes niet wezenlijk zal verschillen van die in het vrije slib, of zijn de sponsjes praktisch dichtgeslibd en moeten de voedingsstoffen via lange diffusieroutes worden aangevoerd. Als dit laatste het geval is, zal een groot gedeelte van de oorspronkelijke vlokpopulatie niet meer kunnen bijdragen aan het zuiveringsproces en uiteindelijk door voedselgebrek afsterven.

literatuur

De beschikbare informatie over dit essentiële punt is summier; de conclusies van de diverse onderzoeken zijn bovendien soms strijdig met elkaar of met die van het in deze rapportage behandelde onderzoek.

Volgens Hegeman [15] zouden voldoende open poriën voor transport overblijven en zou "Verschlammung" van de sponsjes niet plaats vinden. Bij het onderhavige onderzoek wer-

den echtere nauwelijks open poriën waargenomen en waren de sponsjes uit R1-A en R3 tijdelijk zelfs volledig omgeven door een slijmerige slibfilm.

Uit de lage laktaatdehydrogenase-activiteit en de bruine kleur van het sponsjesslib werd geconcludeerd dat in de sponsjes sprake was van aërobe condities, met andere woorden: een toereikende zuurstofvoorziening [29]. Dit lijkt echter strijdig met het hoge endogene ademhalingsniveau [24, 34] en de lage mineralisatiegraad [40] van het sponsjesslib bij andere proeven.

Bij toepassing van sponsjes als drager in anaërobe reactoren was geen sprake van diffusie-limitering [3, 18], hetgeen ongetwijfeld verband hield met de hoge voedselconcentratie in zulke systemen. Wolf stelde daarentegen een lineaire toename van de nitrificatie-activiteit vast, indien het zuurstofgehalte in de waterfase van 2 naar 6 mg O₂/l werd verhoogd [40].

Het duurde vier minuten voordat een toegevoegde kleurstof tot in het centrum van de sponsjes was doorgedrongen, hetgeen op een redelijke doorstroming wijst [34]. Dezelfde auteur toonde echter aan dat het sponsjesslib, zelfs als dit eerst uit de sponsjes werd verwijderd, veel minder CZV kon omzetten dan het vrije slib. Dit werd ook bij het onderhavige onderzoek vastgesteld. Het bewijst in feite dat een gedeelte van de oorspronkelijke vlokpopulatie was afgestorven, c.q. niet was vervangen door bacteriën op plaatsen waar de voedselvoorziening wel toereikend was. Dit laatste lijkt bij de nitrificerende populatie wel het geval te zijn [15, 29].

transport via diffusie

Tabel C1 toont dat een opmerkelijke reeks uitkomsten wordt verkregen indien de gemeten activiteiten (Tabel 10 uit het hoofdrapport) omgerekend worden naar g/m³ spons.uur. De slibben 1A, 1B, 1C en 3 verschillen dan nauwelijks van elkaar. De twee afwijkende waarden kunnen bovendien worden verklaard uit de hoge CZV-belasting in het eerste compartiment (→ A bevatte nog niet verwerkt substraat en denitrificeerde daardoor sterker) en de permanent lage belasting in de laatste compartimenten van de cascaderactor (→ gemeten O₂-consumptie betrof voornamelijk zuurstof voor nitrificatie van de resterende N in het effluent). Ook bij 1D en 5 is een aantal uitkomsten praktisch gelijk aan die van de overige vier slibben.

De consequentie van de praktisch identieke uitkomsten per m³ spons is dat de activiteit per g biomassa kleiner was naarmate de sponsjes meer slib bevatten. De totale activiteit was dus gekoppeld aan het volume van de drager. De snelheid waarmee voedingsstoffen naar binnen getransporteerd konden worden, was daarom vaak doorslaggevend voor de gemeten activiteit, hetgeen betekent dat aanvoer via diffusie hierbij een overheersende rol speelde.

Tabel C1 Activiteiten van de sponsjesslibben in g/m³ spons.uur.

	1D	1A	1B	1C	3	5
O ₂ -consumptie	122	240	256	132	252	286
N-NH ₄ -afname	32	22	26	24	29	57
N-NO _x -vorming	15	6	19	18	17	39
CZV-omzetting	145	320	304	312	315	242
Droge stof (kg/m ³ spons)	29	20	16	12	21	11

Dat sponsjes met circa 10 kg d.s./m³ spons praktisch dichtgeslibd zijn, bleek in feite ook al uit het verloop van het droge-stofgehalte in de sponsjes in R1. De aan een goede doorstroming gekoppelde filtrerende werking van de sponsjes leidde tot een snelle toename van de in de sponsjes geïmmobiliseerde biomassa. Vanaf circa 10 kg d.s./m³ spons steeg het droge-stofgehalte echter veel trager en speelde waarschijnlijk alleen groei nog een rol.

Het uitgevoerde meetprogramma was niet specifiek op transport in/uit de sponsjes gericht, waardoor niet alle vragen, die met voornoemde conclusie zijn verbonden, beantwoord kunnen worden. Vooral het ontbreken van informatie over het endogene ademhalingsniveau en de aanwezigheid van N_{kj} bij het meten van de respiratie en de CZV-reductie vormen complicerende factoren bij de interpretatie. Gelet op de grote zuurstofvraag, waarmee aërobe omzettingen gepaard gaan, zal echter de aanvoer van O₂ vaak de snelheidsbeperkende stap hebben gevormd.

Daarnaast lijkt bij slib D de activiteit van de biomassa mede beïnvloed te zijn door de permanent lage belasting van dit laatste compartiment. Bij de nitrificatiecapaciteit van de sponsjesslibben uit R1 en R3 speelde mogelijk tevens de omvang van de nitrificerende populatie een rol.

zuurstofvoorziening

Onder enig voorbehoud wordt uit Tabel C1 geconcludeerd dat in sponsjes, met een droge-stofgehalte > 10 kg d.s./m³ spons en met 5-7 mg O₂/l in de omringende vloeistof, 250 à 300 g O₂/m³ spons.uur via diffusie aangevoerd kan worden. Deze hoeveelheid is dus maximaal beschikbaar voor endogene ademhaling + CZV-omzetting + nitrificatie door de geïm-

mobiliseerde biomassa. In de literatuur worden diverse experimenten met Linpor N beschreven. In Tabel C2 zijn de zuurstofverbruiken vermeld, die met de N-NH₄-omzetting door nitrificatie corresponderen. Hoewel bij deze proeven ook nog O₂ werd verbruikt voor afbraak van resterend CZV en voor endogene ademhaling, bevestigt Tabel C2 dat genoemde maximale O₂-toevoer qua orde van grootte correct lijkt.

Bij processen die diffusiegelimiteerd zijn, heeft het concentratieverschil grote invloed op de hoeveelheid die getransporteerd kan worden. De onderste reeks uitkomsten uit Tabel C2 illustreert de invloed van het O₂-gehalte in de omringende vloeistof op de maximale N-NH₄-omzetting, c.q. het zuurstofverbruik in de sponsjes. Omdat de zuurstofconcentratie bij de activiteitsmetingen wezenlijk hoger was dan in de reactoren, verklaart dit tevens het verschil tussen de gemeten en de potentiële nitrificatiecapaciteit (zie Tabel 11 uit het hoofdrapport).

Bij het onderhavige onderzoek werd de invloed van de zuurstofconcentratie op de activiteit van het geïmmobiliseerde slib niet systematisch nagegaan. Uitgaande van de resultaten van Wolf [40] wordt geschat dat, bij een concentratieverschil van 2 mg O₂/l, circa 90 g O₂/m³ spons.uur via diffusie toegevoerd kan worden. Met 20 vol.% sponsjes is dus maximaal 0,43 kg O₂/m³ reactor.dag beschikbaar voor de bijdrage van het slib in de sponsjes aan de omzetting van CZV en voor de nitrificatie.

In de proefinstallaties was het zuurstofgehalte meestal aanmerkelijk hoger dan 2 mg O₂/l (zie Bijlage A). Bij een gehalte van 4 mg O₂/l in de waterfase wordt de hoeveelheid zuurstof die in de sponsjes beschikbaar was voor CZV-omzetting en nitrificatie geschat op circa 0,8 kg O₂/m³ reactor.dag. De totale zuurstofvraag voor deze twee omzettingen varieerde in de reactoren R1 en R3 van 1,3 tot 2,1 kg O₂/m³ reactor.dag. Het geïmmobiliseerde slib kon dus in beginsel, ondanks de diffusielimitatie, een substantieële bijdrage leveren aan het zuiveringsproces.

Tabel C2 Zuurstofverbruik, berekend uit de $N-NH_4$ -omzetting via nitrificatie bij Linpor N experimenten.

referentie	kg N m ³ reactor. dag	g O ₂ m ³ spons. uur	vol.% sponsjes	droge stof (kg/m ³ spons)	mg O ₂ /l ²⁾	tempera- tuur (°C)
12	0,47	361	25	n.v.	n.v.	9-20
"	0,24	154	30	"	"	12-20
"	0,42	263	30	"	"	ca. 20
"	0,26	166	30	"	"	ca. 20
"	0,23	214/143 ¹⁾	n.v.	"	"	22
"	0,28	264/176 ¹⁾	n.v.	"	"	15
"	0,29	274/183 ¹⁾	n.v.	"	"	24
15	0,40	317	24	"	"	15
"	0,72	392	35	"	"	12,5
"	0,31	159	37	8,7	"	n.v.
"	0,31	159	37	10,2	"	"
"	0,17	139	37	14,6	"	"
"	0,12	62	37	12,5	"	"
22	0,19	181	20	n.v.	"	11
"	0,29	272	20	"	"	16
26	0,36	185	37	10,2	"	17
31	0,35	222	30	n.v.	"	22
40	0,32	201	30	ca. 15	6	13-17
"	0,27	171	30	" "	6	13-17
"	0,50	317	30	" "	6	18-21
"	0,35	218	30	" "	5	18-21
"	0,24	152	30	" "	4	18-21
"	0,20	127	30	" "	3	18-21
"	0,14	89	30	" "	2	18-21

n.v. = niet vermeld door de auteur(s)

1) 20/30 vol.% sponsjes aangenomen

2) in de omringende waterfase

dikte van de actieve laag

Met diffusie als voornaamste transportmechanisme, kan op basis van de gemeten zuurstof-toevoer ($250 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ spons.uur}$) met de wet van Fick berekend worden dat alleen de buitenste $92 \text{ }\mu\text{m}$ van een sponsje aëroob is.

Wet van Fick: $\frac{dm}{dt} = D \cdot q \cdot \frac{dc}{dx}$

dm/dt : $17 \cdot 10^{-8} \text{ g O}_2/\text{sponsje.sec}$

D : diffusiecoëfficiënt = $2,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$

q : oppervlak sponsje = $12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

dc : concentratieverschil = 5 g/m^3

dx : lengte gradiënt in m

De dikte van de actieve laag kan ook worden berekend uitgaande van de veronderstelling dat de biomassa in deze laag net zo snel CZV kan omzetten als het vrije slib. Hierbij wordt de activiteit per gram slib (zie Tabel 10) eerst omgezet in een activiteit per volume-eenheid:

- $\left. \begin{array}{l} \text{activiteit vrij slib} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ g CZV/g d.s.uur} \\ 1 \text{ g d.s.} = 10 \text{ g nat gewicht} \approx 10 \text{ cm}^3 \end{array} \right\} \rightarrow \text{activiteit} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ g CZV/cm}^3 \cdot \text{uur}$
- totale omzetting = $300 \text{ g CZV/m}^3 \text{ spons.uur}$ (zie Tabel C1). Bij $4 \cdot 10^5$ sponsjes per m^3 spons leidt dit tot $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ g CZV/sponsje.uur}$.
- de dikte van de actieve laag (=h) bedraagt dan:

$$h = \frac{7,5 \cdot 10^{-4}}{12 \times 5 \cdot 10^{-3}} = 0,0125 \text{ cm} = 125 \text{ }\mu\text{m}.$$

Er lijkt dus geconcludeerd te mogen worden dat alleen de micro-organismen, aanwezig in een dunne laag van hooguit enkele honderden μm 's, aan de buitenkant van de sponsjes (kunnen) bijdragen aan de omzetting van CZV en Nkj . Dit verklaart tevens de microscopisch zeer matige kwaliteit van de biomassa ("puin") in de sponsjes die lang in de reactor aanwezig waren.

Met het vrijwel ontbreken van transport naar binnen, is een kubusvormig sponsje (met 10 à 15 kg d.s./m³ spons) in feite gereduceerd tot een oppervlak van 12 cm², waardoor 20 vol.% niet met 400, maar met 96 m² hechtingsoppervlak per m³ reactor correspondeert.

Op de invloed van de temperatuur op het voorafgaande kan, door het ontbreken van voldoende informatie, niet nader worden ingegaan.

