

Licht slib; Voorkomen of bestrijden?

Bij het actief slibproces moet het actief slib aan twee belangrijke voorwaarden voldoen. In de eerste plaats moet het slib in staat zijn de zich in het afvalwater bevindende organische stoffen te verwijderen en in de tweede plaats moet het slib het vermogen hebben zich onder invloed van de zwaartekracht te kunnen afscheiden van het gezuiverde water. De zuivering van het afvalwater geeft doorgaans geen aanleiding tot moeilijkheden. Wel is dit het geval met de bezinking van het slib in de nabezinkruimte. Over het algemeen wordt deze



J. H. RENSINK
LH Wageningen



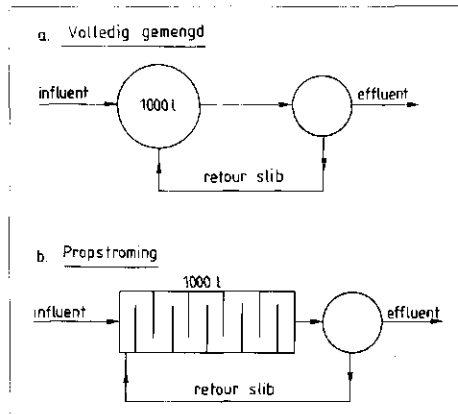
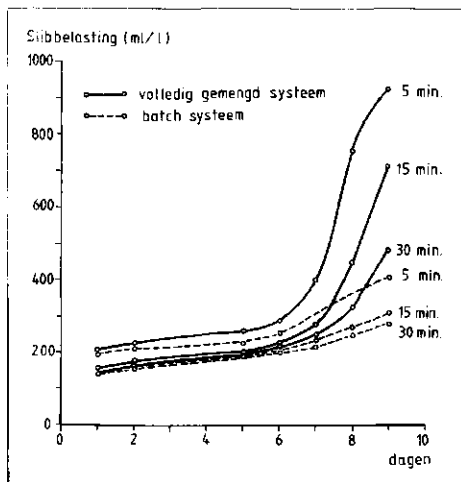
H. J. G. W. DONKER
LH Wageningen



T. S. J. IJWEMA
LH Wageningen

slechte bezinking toegeschreven aan een massale groei van draadvormige bacteriën of zoogloa-slib met slechte bezinkeigenschappen. Van de bestaande actief slibinstallaties in Nederland hebben meer dan 40 % langdurig of incidenteel te kampen met licht slib (Eikelboom 1980) H₂O.

Afb. 1 - Het verloop van de bezinking bij een batch- en een continu belast systeem met zuivelafvalwater bij een slibbelasting van 300 g BZV₅/kg slib . dag.



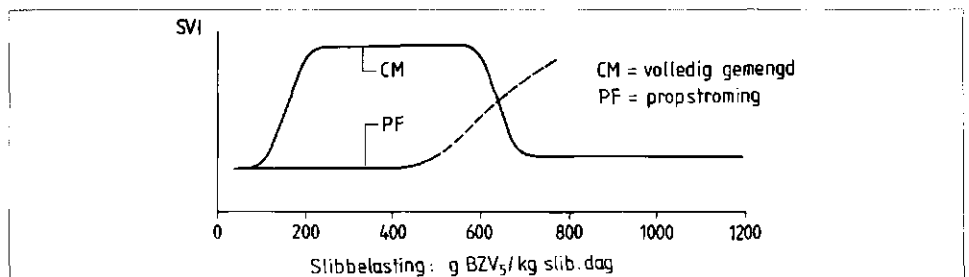
Afb. 2 - Een schematische voorstelling van de twee proefinstallaties.

Over het verschijnsel licht slib is veel gepubliceerd. Over het algemeen wordt ervaren dat de slibbelasting en de BZV₅/N-verhouding een belangrijke plaats innemen bij het al of niet optreden van licht slib. Andere factoren zoals zuurstofgehalte, slibgehalte, temperatuur enz. spelen een minder belangrijke rol.

Speciale aandacht is besteed aan het determineren van draadvormige bacteriën. Hierbij is vooral het onderzoek van Van Veen [1973] en Eikelboom [1975] van bijzondere betekenis geweest.

Nieuwe gezichtspunten aangaande het oplossen van het licht slibprobleem zijn door Rensink [1966a, 1966b] en Chudoba [1973, 1973 en 1974] aangedragen. Door Rensink werd in het verleden geconstateerd, dat licht slib van zuivel-oxydatiesloten op laboratoriumschaal weer in een gezonde conditie kon worden gebracht door het slib chargegewijs te voeden ('fill and draw system'). Onder deze omstandigheden verdwenen de draden in het slib. Wanneer dit goed bezinkbare slib gebruikt werd voor een belast volledig gemengd aeratievat, dan ontstond wederom draadvormig licht slib. Zie afb. 1. Op grond van deze uitkomsten werd vermoed dat de wijze van voeden van het actief slib een beslissende rol speelt bij het ontstaan van licht slib. De wijze van voeden wordt bij een continue toevoer van afvalwater bepaald door het type instal-

Afb. 3 - Het verloop van de SVI van de propstroming en het volledig gemengde systeem bij verschillende slibbelastingen.



latie, zoals met name het volledig gemengde systeem en het propstromingssysteem. Aan de LH werd naderhand onderzoek verricht naar de relatie licht slib en slibbelasting in een gemengd en propstromingssysteem. Als voeding werd gebruikt synthetisch [Rensink, 1974a, 1974b], huishoudelijk en industrieel afvalwater. In een later stadium werd aandacht geschonken aan de betekenis van een voorschakelvat (contact-tank) bij de bestrijding van licht slib. De aanpak en resultaten van de voornoemde onderzoeken met huishoudelijk en industrieel afvalwater zijn onderstaand weergegeven. Tevens wordt met de verworven kennis oplossingen aangereikt voor bestaande praktijkinstallaties, die met licht slib te kampen hebben.

1. Onderzoek huishoudelijk afvalwater

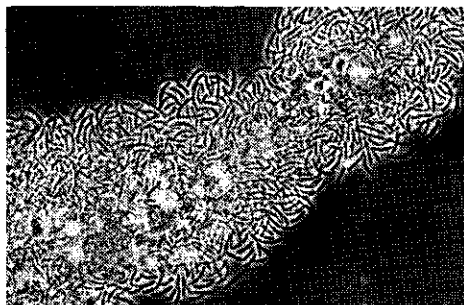
Op de proefinstallatie Bennekom werd in eerste instantie het optreden van licht slib bij verschillende slibbelastingen in een volledig gemengde en propstromingstank van elk 1000 l bestudeerd [Rensink, 1979]. Zie afb. 2. Bij droogweeraanvoer had het mechanisch bezonken rioolwater de volgende gemiddelde samenstelling:

CZV	: 500 mg/l
BZV ₅	: 300 mg/l
N _{Kjeldahl}	: 70 mg/l
P _{totaal}	: 17 mg/l
pH	: 7,2 mg/l
Ca	: 50 mg/l
Alcaliteit	: 7 mgeq/l
Hardheid	: 7°D
BZV ₅ : N : P	= 100 : 23 : 6

In beide typen installaties was steeds voldoende zuurstof aanwezig. Een slibgehalte van 2 g/l werd nagestreefd. Het spuislib werd continu afgevoerd. Teneinde verschillende slibbelastingen te realiseren kon de afvalwateraanvoer worden gewijzigd. De resultaten van dit onderzoek zijn weer gegeven in afb. 3.

Resultaten volledig gemengd systeem

Beneden een slibbelasting van 100 g BZV₅/kg slib . dag was de bezinkbaarheid van het slib meestal goed. Wanneer licht slib op-



Afb. 4 - Een op een reïncultuur gelijkende slibvlok bij een slibbelasting van 7000 g BZV₅/kg slib . dag.

trad, waren er draadvormige bacteriën zoals *Microthrix parvicella* en *Haliscomenobacter hydrossis*. Tussen 100 - 600 g BZV₅/kg slib . dag trad over de gehele linie licht slib op. Hier domineerde overwegend *Sphaerotilus natans*. In het traject 600 - 700 g BZV₅/kg slib . dag bestond de slibvlok uit een mengsel van *Sphaerotilus*-draden en *Zoogloa*-bacteriën.

Boven een slibbelasting van 700 g BZV₅/kg slib . dag kwam geen licht slib meer voor. Naarmate de slibbelasting nog hoger werd, waren de slibvlokken des te kleiner en waren des te meer bacteriën in suspensie geraakt. Bij een zeer hoge slibbelasting van 7000 g BZV₅/kg slib . dag was het aantal bacteriesoorten zo gereduceerd dat er bijna sprake was van een reïncultuur (zie afb. 4). De generatietijd van vele soorten micro-organismen bleef achter bij de spuisnelheid van het slib.

Resultaten propstroming

Tot een slibbelasting van 500 g BZV₅/kg slib . dag was de slib-index laag en stabiel. De vlokmasa was compact en draadvormige bacteriën kwamen nauwelijks voor. Bij zeer lage slibbelastingen was de index (SVI) aan geringe schommelingen onderhevig. In de slibvlok bevond zich dan de draadvormige bacterie *Microthrix parvicella*, die een losse structuur van de vlok teweegbracht. Bij zeer lage slibbelastingen is de verblijftijd van het afvalwater in de

installatie zeer groot, zodat het 1e compartiment alle in het afvalwater aanwezige organische stoffen omzet voordat het in het 2e compartiment komt. Het 1e compartiment kan dan beschouwd worden als een volledig gemengd systeem met kans op licht slibvorming.

Bij slibbelastingen hoger dan 500 g BZV₅/kg slib . dag ontstond er licht slib. Hierbij bestond de vlok uit *Sphaerotilus*-draden en *Zoogloa*-bacteriën. Boven 600 g BZV₅/kg slib . dag zijn geen experimenten uitgevoerd.

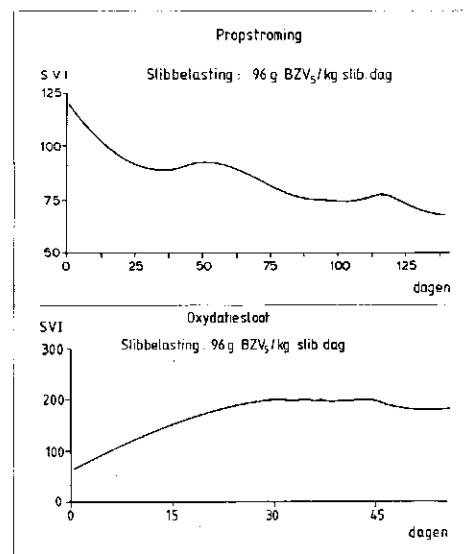
Uit deze onderzoeken kan men de conclusie trekken dat bij een volledige biologische zuivering de propstroming een stabiele en lage SVI garandeert in tegenstelling tot het volledig gemengde systeem.

2. Onderzoek met industrieel afvalwater

Uit de praktijk bleek, dat bij de zuivering van patates-frites afvalwater in een volledig gemengde aeratietank steeds licht slib oprad tengevolge van een massale groei van draadvormige bacteriën. Om deze reden werd in twee beschikbare proefoxydatiesloten met een volume van 240 l onderzoek verricht met patates-frites afvalwater [Rensink et al., 1977]. Eén van de oxydatiesloten werd omgebouwd tot een propstroming. De oxydatiesloot werd in zeven compartimenten verdeeld, die onderling verbonden waren. De borstel werd buiten werking gesteld en op de bodem van de installatie werd een geperforeerde buis aangebracht voor het beluchten van het actief slib. De andere oxydatiesloot bleef onveranderd. Zie afb. 5.

Elke dag werden de proefinstallaties gedurende acht uur belast met vers bereid patates-frites afvalwater. Overeenkomstig de praktijk werden de installaties op zaterdag en zondag niet gevoed. Per dag werd gedurende acht uur 50 l afvalwater gedoseerd. De slibbelasting bedroeg 96 g BZV₅/kg slib . dag.

In beide installaties werd een slibgehalte



Afb. 6 - Het verloop van de SVI van de propstroming en de oxydatiesloot met patates-frites afvalwater bij een slibbelasting van 96 g BZV₅/kg slib . dag.

van 2 - 2,5 g/l aangehouden. Overtollig slib werd afgevoerd. De installaties waren geënt met slib, dat batchgewijs was aangekweekt. De temperatuur bedroeg gedurende het onderzoek 16 - 18 °C.

Het bereide afvalwater had de volgende gemiddelde samenstelling:

CZV	: 1530 mg/l
BZV ₅	: 920 mg/l
N _{Kjeldahl}	: 60 mg/l
P _{totaal}	: 7 mg/l
pH	: 7,6
BZV ₅ : N : P	= 100 : 6,5 : 0,75

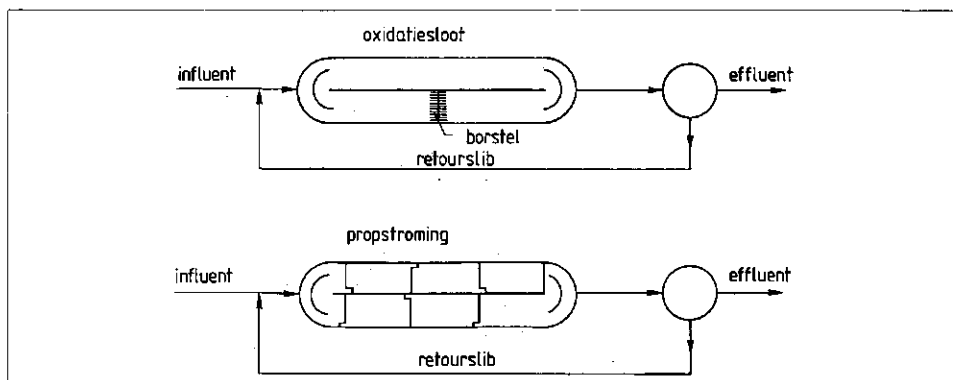
De helft van de biodegradeerbare stof bestond uit zetmeel.

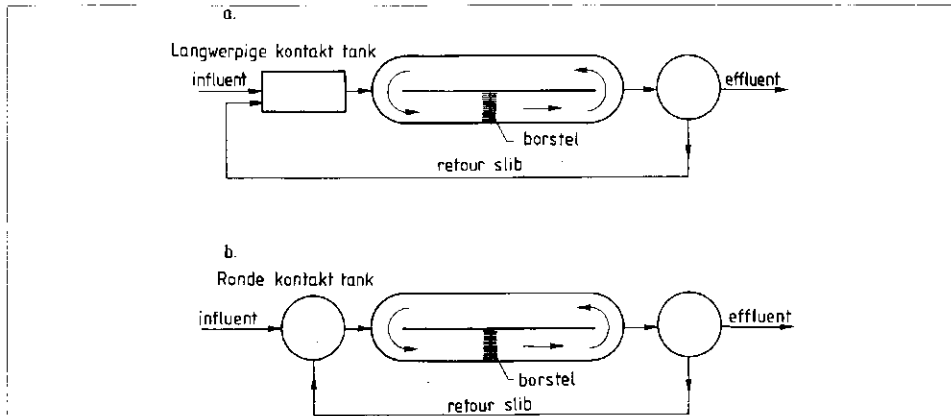
Resultaten onderzoek

De belangrijkste parameter in dit onderzoek was de SVI. Voor beide installaties is de SVI afgebeeld in afb. 6. Deze afb. toont duidelijk aan, dat onder de gegeven proefomstandigheden de SVI van de propstroming stabiel en laag was. Na de aanvangsperiode schommelde de SVI om een gemiddelde waarde van ca. 70 ml/g slib. Gedurende het gehele experiment waren de slibvlokken compact, terwijl geen draadvormige bacteriën van betekenis voorkwamen.

De SVI van de oxydatiesloot werd gedurende het onderzoek hoger en bereikte na 30 dagen een gemiddelde waarde van ongeveer 200 mlXg slib. In het slib had zich een nog onbekende draadvormer ontwikkeld. In beide installaties werd het afvalwater vergaand gezuiverd. Duidelijk was aangetoond, dat het type installatie van groot belang is voor het voorkomen van licht slib.

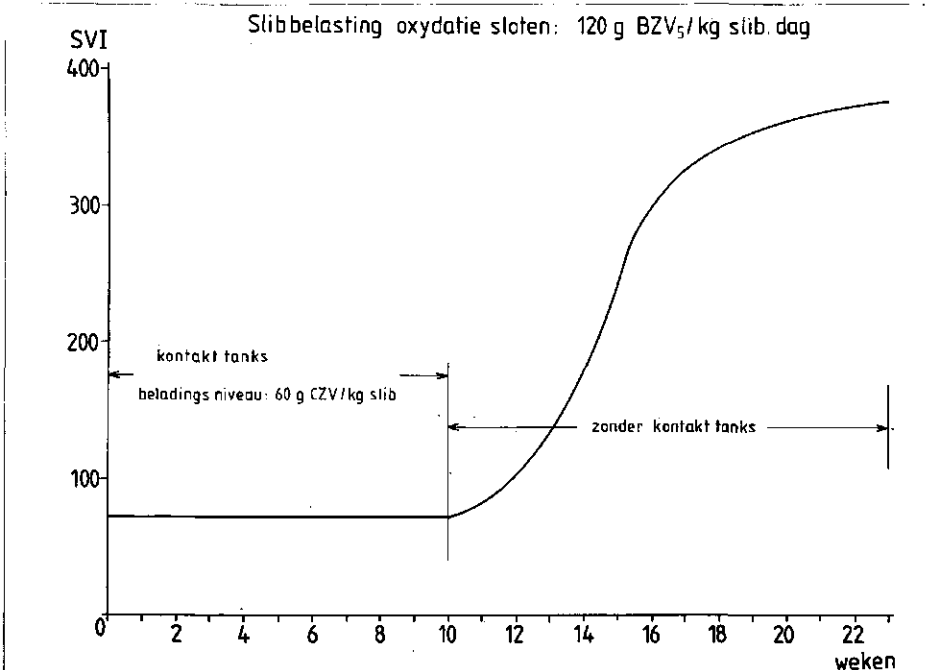
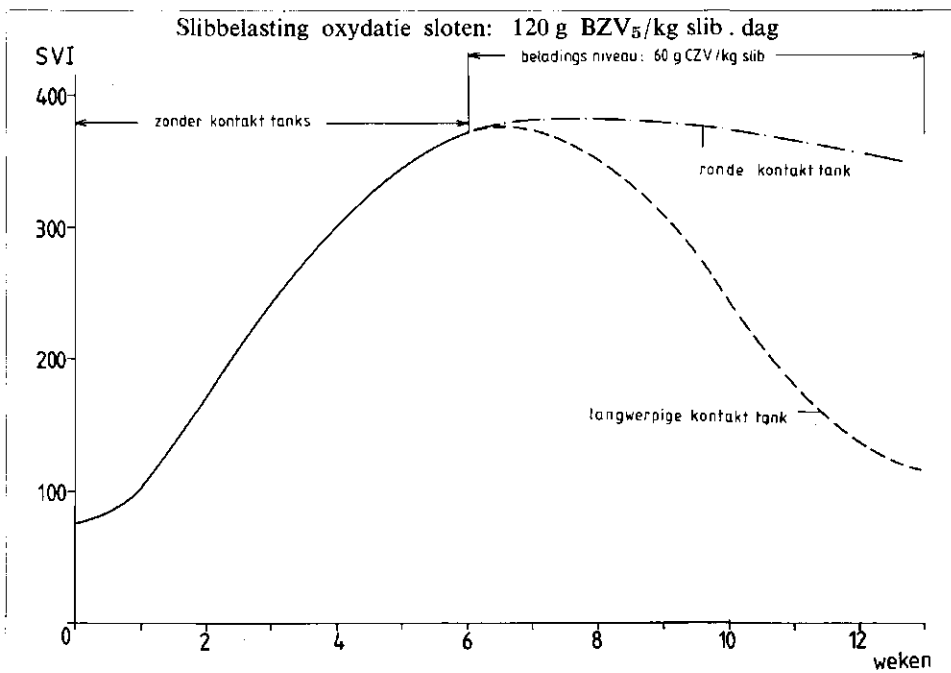
Afb. 5 - Een schematische voorstelling van beide proefinstallaties.





Afb. 7 - Een schematische voorstelling van beide proefoxydatiesloten.

Afb. 8 - Het verloop van de SVI, met en zonder contacttanks.



Bestrijding van licht slib voor bestaande installaties

Langwerpige installaties met licht slib problemen, die het afvalwater en het retourslib aan het kopeinde van de installatie ontvangen (conventioneel) kunnen weer in goede conditie worden gebracht door de volumestroom van het retourslib te verminderen. Onder deze omstandigheden wordt het slib aan het begin van de installatie hoger belast met organische stoffen. Het vaststellen van de substraatgradiënt in de lengterichting van de installatie kan daarbij alleen ondersteunend werken [Rensink, 1977].

Wanneer men er niet in slaagt op deze wijze het licht slib te bestrijden dan kan men proberen een deel van het slib te spuien [Chudoba, 1973] of een deel van het retourslib – bijv. één derde – aan het kopeinde van de installatie in te voeren en het overige retourslib verderop in de installatie te brengen. Op deze wijze wordt het slib aan het kopeinde van de installatie hoog belast met organische stoffen, waardoor groei van die bacteriën wordt gestimuleerd, die inhaerent zijn aan een goede bezinking.

Deze technologische aanpak kan men vergelijken met het zgn. 'step-sludge' systeem, dat wil zeggen dat het afvalwater aan het begin van de installatie wordt ingevoerd, terwijl het retourslib op meerdere plaatsen in de lengterichting van de installatie binnenstroomt [Rensink et al., 1981]. Een langwerpige installatie met een zgn. step-loading leidt menigmaal tot licht slib, omdat op deze wijze vele gemengde aeratie-tanks worden geïntroduceerd. Om het licht slibprobleem hier op te lossen, dient men het retourslib aan het kopeinde van de installatie in te leiden.

Volledig gemengde aeratietanks

Heide en Pasveer [1974] zijn er door Teerink van het Hoogheemraadschap Rijnland op attent gemaakt dat de bezinkings-eigenschappen van het slib worden verbeterd wanneer het retourslib via de pompkelder met het afvalwater in contact wordt gebracht in plaats van het retourslib direct naar de oxydatiesloot te leiden. Ook hier wordt, zoals bij de conventionele installatie een deel van het slib met organische stoffen hoog belast. Heide en Pasveer hebben hiervoor het begrip 'beladingsniveau' ingevoerd. Het beladingsniveau is de hoeveelheid aangevoerde CZV die in een kort tijdsbestek in contact wordt gebracht met een hoeveelheid retourslib (g CZV/g slib). Veelal wordt ca. 10 minuten aangehouden.

Bestaande installaties met een volledige menging dient men daarom zo te wijzigen dat een deel van het actief slib gedurende een korte tijd hoog wordt belast met orga-

nische stoffen. Daartoe kan men op verschillende manieren te werk gaan. De eerder genoemde wijze van het retourslib via de pompkelder te leiden, heeft in de praktijk veelal niet tot de gewenste resultaten geleid, daar de aanvoer van het afvalwater en het retourslib niet voldoende op elkaar zijn afgestemd of de menging te wensen overlaat.

Betere resultaten worden verkregen door een ronde contacttank voor te schakelen, ofschoon men hier ook niet altijd van succes is verzekerd. Het is gebleken dat een langwerpige voorschakeltank – bijv. een beluchte zandvang – betere resultaten geeft dan een ronde voorschakeltank.

Wanneer een volledig gemengd systeem incidenteel krijgt te maken met licht slib dan is een éénmalige hoge chloordosering te overwegen. Hierbij dient men op laboratoriumschaal in batchproeven de hoogte van de chloorconcentratie vast te stellen [Rensink, 1966].

Bestrijding van licht slib met ijzervulfaat leidde steeds tot goede resultaten, ofschoon rekening gehouden moet worden met een grotere hoeveelheid slibproductie [Rensink et al., 1979].

3. Onderzoek met contacttank

Omtrent de keuze van een ronde of langwerpige contacttank is onderzoek verricht met zuivelafvalwater en voorbezonden huishoudelijk rioolwater van Bennekom.

Zuivelafvalwater

In twee oxydatiesloten met elk een volume van 240 l werd onderzoek verricht met een voorgeschakelde contacttank en wel één van het ronde en één van het langwerpige type. Zie afb. 7. Iedere contacttank had een volume van 12 l en werden beide belucht. De beide oxydatiesloten werden gedurende acht uur per dag belast met 80 l synthetisch zuivelafvalwater. De slibbelasting bedroeg voor beide sloten 120 g BZV₅/kg slib . dag. Een slibgehalte van 2 g/l werd aangehouden. Het entslib was afkomstig van een zuiveloxydatiesloot. Beide installaties hadden steeds voldoende zuurstof.

Het synthetische afvalwater – bestaande uit 1 deel ondermelkpoeder en 3 delen wei-poeder – had de volgende samenstelling:

CZV	: 1250 mg/l
BZV ₅	: 750 mg/l
N _{Kjeldahl}	: 35 mg/l
P _{totaal}	: 7 mg/l
pH	: 7,5
BZV ₅ : N : P	= 100 : 5 : 1

Bij het eerste onderzoek werden beide oxydatiesloten aanvankelijk zonder voor-

schakelvat bedreven. Toen beide installaties licht slib hadden, werden de contacttanks voorgeschakeld. De resultaten van dit onderzoek, dat zich met name richtte op de bezinking van het slib (SVI) is weergegeven in afb. 8. Uit de grafiek is duidelijk af te lezen dat na verloop van tijd licht slib ontstond. Toen de beide contacttanks werden voorgeschakeld (beladingsniveau 60 g CZV/kg slib en verblijftijd slibwatermengsel 8 minuten) bleek dat alleen de langwerpige contacttank in staat was het slib weer goede bezinkingseigenschappen te geven. In deze contacttank werd ondanks de korte verblijftijd van het slibwatermengsel een subgradiënt gevonden [Chudoba, 1973].

In het tweede experiment werd uitgegaan van goed bezinkbaar slib en werden beide contacttanks voorgeschakeld. De slibbelasting bedroeg 120 g BZV₅/kg slib . dag, het beladingsniveau 60 g CZV/kg slib en de verblijftijd van het slibwatermengsel in de contacttank 8 minuten. De resultaten weergegeven in afb. 8 laten zien dat wanneer wordt uitgegaan van goed bezinkbaar slib beide contacttanks een lage SVI kunnen garanderen.

Zodra de contacttanks buiten bedrijf werden gesteld, werden in de beide oxydatiesloten de bezinkeigenschappen van het slib weer slecht.

Uit dit onderzoek kan de conclusie worden getrokken, dat in de praktijk een bestaande zuiveringsinstallatie met volledige menging en licht slib het beste gediend is met een langwerpige contacttank.

Huishoudelijk afvalwater

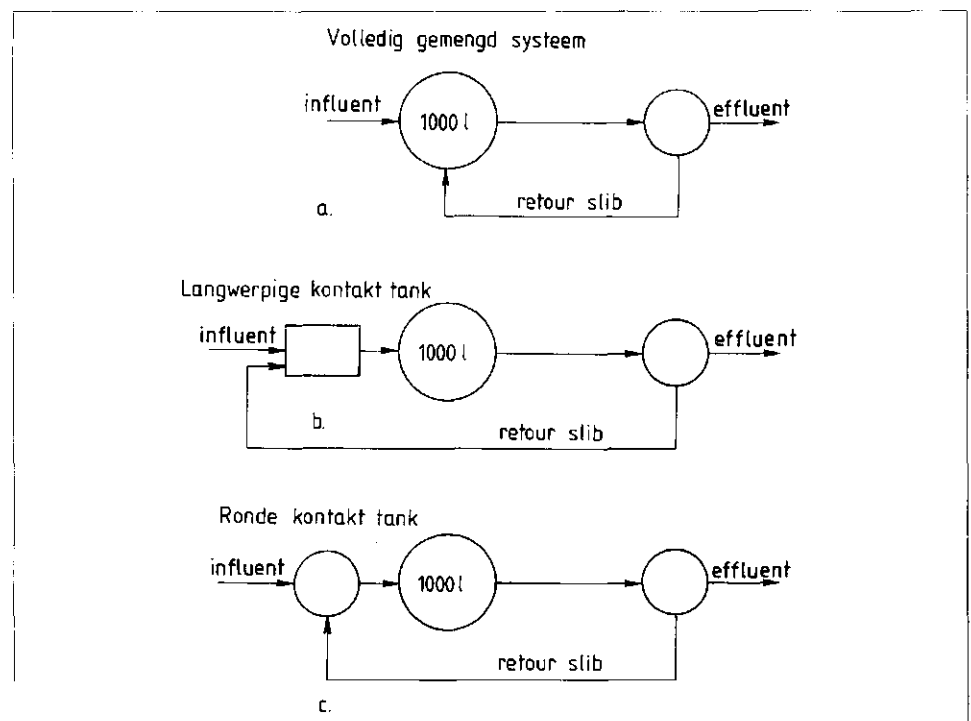
Daar sommige auteurs de mening waren toegedaan dat de uitkomsten van Chudoba en de auteurs verkregen waren met synthetisch afvalwater, werd een onderzoek ingesteld met voorbezonden huishoudelijk afvalwater van Bennekom. De proefinstallaties bestonden elk uit een volledig gemengde aeratietank van 1000 l. Twee aeratietanks konden worden uitgerust met resp. een langwerpige en een ronde contacttank. Zie afb. 9. De slibbelasting bedroeg 225 g BZV₅/kg slib . dag. Uitgegaan werd van goed bezinkbaar slib, terwijl beide contacttanks werden voorgeschakeld met een beladingsniveau van 120 g CZV/kg slib met een contacttijd van 10 minuten.

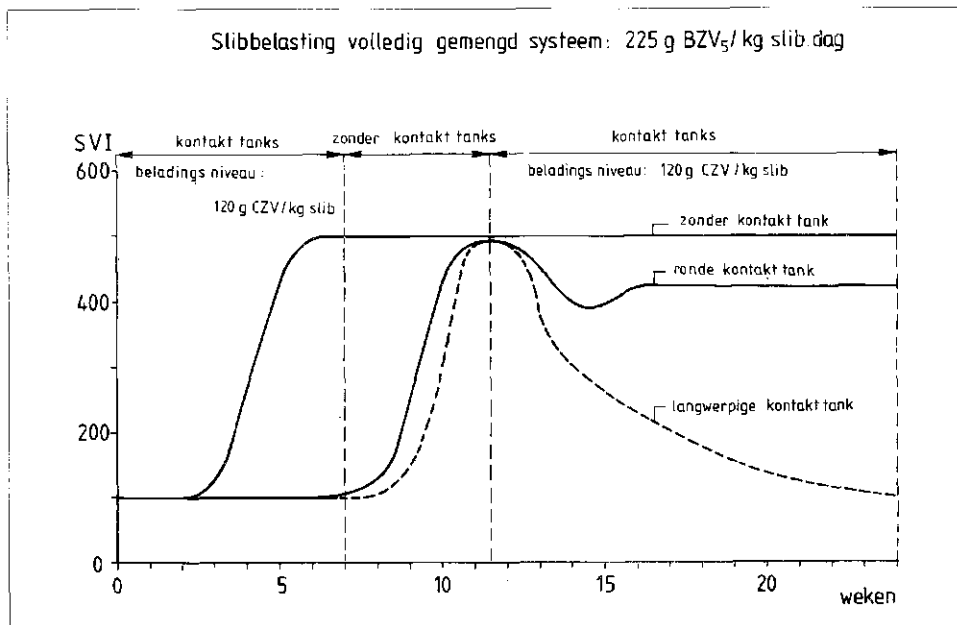
Uit het onderzoek bleek, dat in de aeratietank zonder voorschakelvat na ca. drie weken licht slib ontstond, terwijl in de aeratietanks met contacttank het slib zijn goede bezinkeigenschappen bleef behouden. Toen na zeven weken de contacttanks buiten bedrijf werden gesteld, trad ook in deze installaties licht slib op. Toen echter na 11,5 week wederom de contacttanks werden voorgeschakeld, bleek alleen de langwerpige contacttank in staat te zijn het slib weer in goede conditie te brengen. Zie afb. 10.

4. Conclusies

1. Een langwerpige installatie met propstrooming garandeerde in het algemeen een stabiele en lage SVI.
2. De volledig gemengde aeratietank had meestal met licht slib te kampen.

Afb. 9 - Een schematische voorstelling van de drie proefinstallaties.





Afb. 10 - Het verloop van de SVI met en zonder contacttanks.

3. Bij de toepassing van een contacttank kon zowel de langwerpige als de ronde tank licht slib voorkomen.
4. Bij de bestrijding van licht slib was slechts de langwerpige contacttank in staat slib met goede eigenschappen te realiseren.

5. Nabeschuiving

Uit de verschillende experimenten, die verricht zijn naar het fenomeen licht slib is duidelijk aangetoond dat de belasting van de slibvlok een essentiële rol speelt bij het voorkomen en bestrijden van licht slib. Een hoge belasting van de vlok zoals in een batchreactor, een conventionele aeratietank, een aeratietank met 'step sludge', alsmede een contacttank garanderen slib met goede bezinkeigenschappen.

In volledig gemengde aeratietanks en aeratietanks met 'step loading' trad licht slib op. De processen onderscheiden zich door de hoogte van de belasting van de slibvlok, waarvoor het type installatie en derhalve het treffen van de voeding met het slib verantwoordelijk is.

Tot nog toe is het nog steeds gelukt voor vele soorten afvalwater bij normale slibbelasting in batchvaten slib met goede bezinkeigenschappen te verkrijgen. Hieruit kan men de conclusie trekken, dat men in microbiologisch opzicht de juiste bacterieflora heeft. Voor de praktijk betekent dat, dat men de verkregen resultaten onder batchomstandigheden in een continu proces moet vertalen. Hierbij speelt nu de technologie een belangrijke rol. Wanneer een zuiveringsinstallatie met licht slib heeft te maken, ligt meestal de fout bij het techno-

logisch niet juist bedienen van de installatie. Om dit vast te stellen kan men terugvallen op laboratoriumexperimenten, die batchgewijze worden uitgevoerd. De zuiveringsinstallatie moet dan technologisch zo worden gewijzigd dat op een of andere plaats een deel van het slib hoog wordt beladen. Een langwerpige aeratietank met propstrooming en een langwerpige contacttank voor een volledig gemengde aeratietank bieden daarbij de beste oplossing.

Literatuur

Eikelboom, D. (1975). *Filamentous organisms in activated sludge*. Water Research, 9, blz. 365-388.
 Veen, W. L. van (1973). *The bacteriology of activated sludge, in particular the filamentous bacteria*. Antonie van Leeuwenhoek, 39, blz. 189.
 Veen, W. L. van Kooy, D. van der, Geuze, E. C. W. A. en Vlies, A. W. van der (1973). *Investigations on the sheathed bacterium Haliscomenobacter Hydrossis gen.n.sp.n. isolated from activated sludge*. Antonie van Leeuwenhoek, 39, blz. 207.
 Rensink, J. H. (1966a). *Verslag proefoxydatiesloten over de periode 1965 - 1966*. Rijks Agrarische Afvalwaterdienst 1966, Arnhem, Holland.
 Rensink, J. H. (1966b). *Le chlore naissant pour la lutte contre Sphaerotilus natans dans la boue activée*. Revue laitière française, 234, blz. 444-449.
 Chudoba, J., Ottava, V. en Madéra, V. (1973). *Control of activated sludge filamentous bulking I. Effect of the hydraulic regime or degree of mixing in an aeration tank*. Water Research, 7, blz. 1163 - 1182.
 Chudoba, J., Grau, P. and Ottava, V. (1973). *Control of activated sludge filamentous bulking II. Selection of micro-organisms by means of a selector*. Water Research, 8, blz. 1389 - 1406.
 Chudoba, J., Blaha, J. and Madéra, V. (1974). *Control of activated sludge filamentous bulking III. Effect of sludge loading*. Water Research, 8, blz. 231 - 237.
 Rensink, J.H. (1974a). *New approach to preventing bulking sludge*. JWPCF 46, blz. 1888 - 1894.
 Rensink, J. H. (1974b). *De invloed van het voedingspatroon op het ontstaan van licht slib bij*

verschillende slibbelastingen. H₂O (7) 1974, blz. 480 - 484.
 Rensink, J. H. (1979). *Cure and prevention of bulking sludge in practice*. La Tribune du Cebedeau, 432, blz. 445 - 450.
 Rensink, J. H., Voetberg, J. W. en IJwema, T. S. J. (1977). *Die Verhinderung der Entwicklung von Blähschlamm bei der vollbiologischen Reinigung von Abwasser der Pommesfritesindustrie*. GWF-Wasser/Abwasser 118, 2, blz. 75 - 79.
 Rensink, J. H., Jellema, K. en IJwema, T. S. J. (1977). *De invloed van de substraatgradiënt op de vorming van licht slib*. H₂O (10), 1977, nr. 15, blz. 338 - 340.
 Heide, B. A. en Pasveer, A. (1974). *Oxidation ditch: Prevention and control of filamentous sludge*. H₂O (7), 1974, nr. 18, blz. 373 - 376.
 Rensink, J. H. (1966). *De bestrijding van Sphaerotilus natans in actief slib door chloring*. H₂O (50) 1966, nr. 1, blz. 5 - 8.
 Rensink, J. H., Leentvaar, J. en Donker, H. J. G. W. (1979). *Gecombineerde licht slibbestrijding en fosfaatverwijdering door ijzer-II-sulfaatdosering*. H₂O (12), 1979, nr. 7, blz. 150 - 153.
 Rensink, J. H., Donker, H. J. G. W. en IJwema, T. S. J. (1981). *The influence of feed pattern on sludge bulking*. Water Research Centre, Congress Cambridge 1981.



Rectificatie

Eéndimensionale instationaire grondwaterstroming, ir. T. N. Olsthoorn (H₂O 15 (1982) 7, p. 145).

Tabel I in bovengenoemd artikel bevat een storende zelffout. De correcte tabel is hieronder weergegeven. Het programma is echter wel correct.

TABEL I - Korte mathematische weergave van de vier berekeningsgevallen van Edelman voor eéndimensionale, instationaire grondwaterstroming.

Geval (nr)	Randvoorwaarde	Specifiek debiet (L ² /t)	Grondwaterstandsverh. (L)
1	s ₀ = const.	q = s ₀ w	F ₋₁ s = s ₀ F ₀
2	q ₀ = const.	q = q ₀	F ₀ s = $\frac{q_0}{w} F_1$
3	s ₀ = at	q = s ₀ w	F ₁ s = s ₀ F ₂
4	q ₀ = bt	q = q ₀	F ₂ s = $\frac{q_0}{w} F_3$

Met:

$F = (2u)^{1/2} \operatorname{erfc}(u)$
 $u = \sqrt{(x^2 \mu) / (4kHt)}$
 $w = \sqrt{(\mu kH/t)}$

