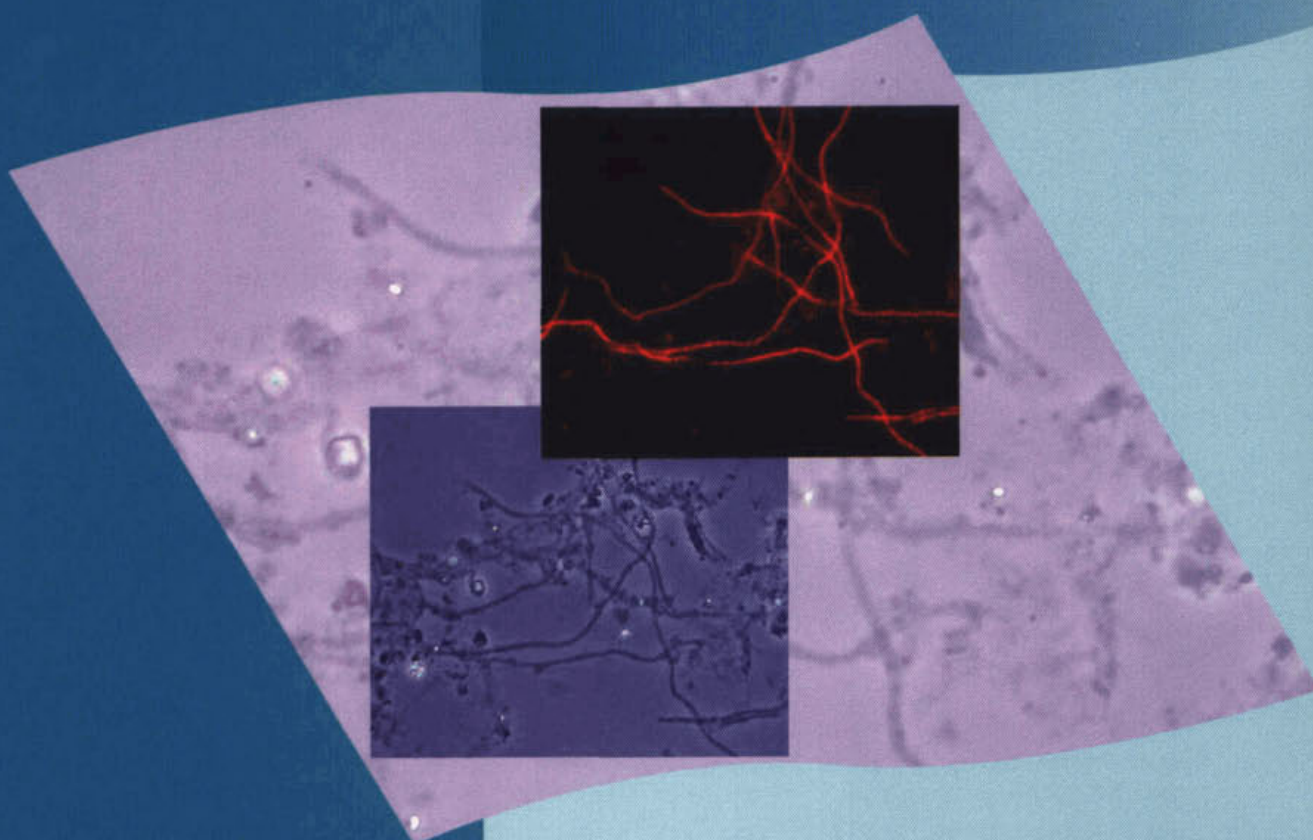


Beheersing van licht slib bij de behandeling van stedelijk afvalwater met biologische nutriëntenverwijdering



2001

02

**Beheersing van licht slib bij de behandeling
van stedelijk afvalwater met
biologische nutriëntenverwijdering**

2001 02

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon 030 232 11 99
Fax 030 232 17 66
E-mail stowa@stowa.nl
<http://www.stowa.nl>

Publicaties en het publicatie-
overzicht van de STOWA kunt u
uitsluitend bestellen bij:

Hageman Fulfilment

Postbus 1110

3330 CC Zwijndrecht

tel. 078 - 629 33 32

fax 078 - 610 42 87

e-mail: hff@wxs.nl

o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.

ISBN 90.5773.126.6

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| INHOUDSOPGAVE | blz. |
| TEN GELEIDE | iii |
| SAMENVATTING | v |
| SUMMARY | viii |
| 1. INLEIDING | 1 |
| 1.1 Algemeen | 1 |
| 1.2 Probleemstelling | 1 |
| 1.3 Doel van het onderzoek | 1 |
| 1.4 Leeswijzer | 2 |
| 2. THEORIE EN WERKHYPOTHESE | 3 |
| 2.1 Theorie | 3 |
| 2.1.1 Achtergrond | 3 |
| 2.1.2 Resultaten uit het verleden | 4 |
| 2.1.3 Invloed van de procesconfiguratie op de SVI | 8 |
| 2.2 Werkhypothese | 8 |
| 3. UITVOERING VAN HET ONDERZOEK | 11 |
| 3.1 Onderzoeksopzet | 11 |
| 3.2 Bemonstering en chemische analyses | 11 |
| 3.2.1 Bemonstering | 11 |
| 3.2.2 Chemische analyses | 11 |
| 3.3 Berekeningen | 14 |
| 4. BETROKKEN RWZI's | 17 |
| 5. RESULTATEN | 23 |
| 5.1 Algemeen | 23 |
| 5.2 Werking van de rwzi's tijdens de onderzoeksperiode | 23 |
| 5.3 SVI-verloop gedurende de onderzoeksperiode | 24 |
| 5.4 Omzetting van verschillende componenten in de procesreactoren | 27 |
| 5.4.1 Opgelost CZV, lagere vetzuren en PHB | 27 |
| 5.4.2 Hogere vetzuren | 32 |
| 5.4.3 Ammonium, nitraat en fosfaat | 34 |
| 5.4.4 Omzettingssnelheden | 38 |

| | | |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6. | DISCUSSIE EN EVALUATIE | 41 |
| 6.1 | Onderzoeksvragen | 41 |
| 6.2 | De mate van compartimentering van de anaërobe en anoxische reactor in relatie tot de onbeluchte slibfractie en de vereiste contacttijd. | 41 |
| 6.3 | Opname, opslag en verbruik van de verschillende CZV-fracties in de anaërobe en anoxische reactoren | 42 |
| 6.4 | De rol van ammonium | 44 |
| 7. | RICHTLIJNEN VOOR DE CONFIGURATIE VAN RWZI's MET VERGAANDE BIOLOGISCHE NUTRIËNTENVERWIJDERING MET EEN SVI < 120 ML/G | 51 |
| 8. | CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN | 55 |
| 9. | REFERENTIES | 57 |
| 10. | BEGRIPPENLIJST | 61 |

BIJLAGEN

| | |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bijlage 1: | Resultaten analyses, concentratieverlopen en omzettingssnelheden van verschillende componenten in de betreffende rwzi's |
| Bijlage 2: | Foto's van de eerste procesreactoren en de beluchtingsreactoren van de betreffende rwzi's |

TEN GELEIDE

In STOWA-verband is de laatste 25 jaar veel energie gestoken in onderzoek naar het ongewenste fenomeen van licht slib, getuige zeven STOWA-rapporten over dit onderwerp. Eind jaren tachtig werd verondersteld dat het optreden van licht slib definitief kon worden voorkomen of bestreden, totdat de waterkwaliteitsbeheerders hun rwzi's moesten gaan aanpassen aan de nieuwe richtlijnen voor stikstof en fosfaat. De draadvormer *Microthrix parvicella* gedijde goed onder de omstandigheden die nodig zijn voor een vergaande biologische stikstofverwijdering. Aan het eind van de jaren negentig kwam daardoor de behoefte om het lichtslibprobleem nogmaals nader onder de loep te nemen.

Het voor u liggende rapport is het achtste STOWA-rapport over het onderwerp licht slib. Hierin worden de resultaten besproken van praktijkgericht onderzoek naar de beheersing van licht slib bij de behandeling van stedelijk afvalwater met biologische nutriëntenverwijdering. Vier geselecteerde rwzi's zijn gedurende één jaar elk seizoen tijdens intensieve meetcampagnes bemonsterd. Hiermee is de benodigde informatie verzameld om in de praktijk het lichtslibprobleem de baas te zijn.

Dit rapport voorziet de gebruiker in eenduidige ontwerprichtlijnen voor de noodzakelijk geachte separate anoxische reactor en richtlijnen voor de indeling van de configuratie van de overige procesonderdelen bij biologische nutriëntenverwijdering. Op basis van het uitgevoerde onderzoek wordt aanbevolen om bij het hanteren van de gepresenteerde ontwerprichtlijnen, bij het dimensioneren van de nabezinktanks te overwegen om uit te gaan van een ontwerp-SVI van 120 ml/g.

Het onderzoek werd uitgevoerd door HASKONING Ingenieurs- en Architectenbureau (projectteam bestaande uit ir. J. Kruit, dr. ir. J.J.W. Hulsbeek en dr. ir. A. Visser). Voor de begeleiding van het project zorgde een commissie bestaande uit prof. dr. ir. M.C.M. van Loosdrecht (voorzitter), ing. F.L.G. Besten, ing. F.A. Brandse, ing. J. Grovenstein, ing. J.P.H. Piron en ir. P.J. Roeleveld.

De resultaten van dit onderzoek zijn verkregen via meerdere intensieve meetcampagnes op vier rwzi's. De STOWA is de medewerkers van deze rwzi's en de betreffende waterkwaliteitsbeheerders zeer erkentelijk voor hun gastvrijheid en inbreng tijdens dit onderzoek.

Utrecht, juni 2001

De directeur van de STOWA

ir. J.M.J. Leenen

SAMENVATTING

Licht slib is een ongewenst verschijnsel in de afvalwaterzuivering en er is reeds veel energie gestoken in het onderzoek naar dit fenomeen. Uit de praktijk is gebleken dat de introductie van biologische P- en N-verwijdering gepaard kan gaan met een verhoging van de hoeveelheid draadvormende micro-organismen. Bij de behandeling van communaal afvalwater wordt hierbij doorgaans *Microthrix parvicella* als dominante draadvormer aangetroffen.

Bij rwzi's met vergaande P- en N-verwijdering, waarbij één of meerdere separate anoxische reactoren zijn geïmplementeerd tussen de anaërobe - en de aërobe reactor, wordt een verbetering van de slibbezinkingseigenschappen waargenomen. Echter, een sluitende hypothese rond het voorkomen van licht slib bij de implementatie van biologische P- en N-verwijdering ontbreekt tot op heden. Er is nog discussie omtrent de noodzaak en de configuratie van de anoxische reactoren. Hierdoor zijn er tot heden geen eenduidige ontwerp-richtlijnen voor de eventueel noodzakelijk geachte separate anoxische reactor.

In het kader van bovengenoemde is in de periode juni 1999 – april 2000 een praktijkonderzoek uitgevoerd waarbij vier rwzi's voor vergaande P- en N-verwijdering waren betrokken met een verschillende mate van compartimentering van de procesonderdelen:

- rwzi Papendrecht (Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden): 2-traps Phoredox-configuratie;
- rwzi Alphen Kerk & Zanen (Hoogheemraadschap van Rijnland): 3-traps Phoredox-configuratie;
- rwzi Groesbeek (Zuiveringsschap Rivierenland): 4-traps Phoredox-configuratie;
- rwzi Hardenberg (Waterschap Groot Salland, per 1-1-2000 Waterschap Velt en Vecht): BCFS[®]-configuratie.

Het doel van het onderzoek was om de noodzakelijkheid van separate anoxische reactoren vast te stellen en ontwerp-richtlijnen voor de noodzakelijke procesreactoren op te stellen, zodat slib met goede bezinkingseigenschappen kan ontstaan. De belangrijkste resultaten en conclusies van het praktijkonderzoek zijn in navolgende weergegeven.

De rwzi zonder een separate anoxische reactor bereikt de hoogste SVI's bij vergelijkbare anoxische slibfracties. Implementatie van een separate anoxische reactor van circa 20 % van de totaal benodigde anoxische en aërobe ruimte in combinatie met een juist gedimensioneerde anaërobe reactor en adequate O₂-condities is voldoende om slib met goede bezinkingseigenschappen (SVI altijd < 150 ml/g) te handhaven. Voor een verdere verbetering van de slibbezinkingseigenschappen (SVI altijd < 120 ml/g) is een verdere opdeling van de aërobe hoofdreactor noodzakelijk, waarbij de aërobe slibfractie in de laatste aërobe reactor groter dan 80 % dient te zijn.

Bij alle rwzi's is geconstateerd dat de concentraties opgelost CZV in de toeloop van van de aërobe reactor gelijk zijn aan de effluentkwaliteit. De lagere vetzuren worden in het eerste compartiment van de anaërobe reactor volledig opgenomen en gebruikt voor P-afgifte en denitrificatie.

Uit het concentratieverloop van de hogere vetzuren in de betreffende rwzi's blijkt niet eenduidig dat er een netto-productie van hogere vetzuren plaatsvindt in de anaërobe reactoren. De implementatie van een separate anoxische reactor leidt niet tot een volledige omzetting van hogere vetzuren. Het analyseren van vetzuren in het influent heeft derhalve geen meerwaarde voor de dimensionering van de anoxische reactor. De concentraties hogere vetzuren (= opgelost en geadsorbeerd) in de toeloop van de aërobe reactor ligt voor systemen met en zonder separate anoxische reactor in dezelfde orde van grootte. Dit betekent dat in principe hogere vetzuren altijd ter beschikking komen voor de groei van *Microthrix parvicella*.

De aanwezigheid van ammonium in de aërobe reactor kan een bepalende factor zijn voor de groei van *Microthrix parvicella*. Voor de rwzi's met de hoogste SVI-waarden zijn ook de hoogste ammoniumconcentraties in het effluent vastgesteld.

In de navolgende samenvattende tabel wordt de relatie tussen slibbezinkingseigenschappen, aanwezigheid van *Microthrix parvicella* en de procesconfiguratie van de betreffende rwzi's weergegeven.

| Parameters | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg |
|----------------------------------------------|------------------|---------------------|------------------|------------|
| Type | 2 traps Phoredox | 3 traps Phoredox | 4 traps Phoredox | BCFS |
| Anoxische reactor | - | + | + | ++ |
| Positie t.a.v compartimentering* | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Maximale waarde SVI (ml/g) | 170 | 125 | 140 | 120 |
| <i>Microthrix parvicella</i> aanwezig | + | - | + | - |
| Ammoniumconcentratie in effluent (mg/l) | 2 | < 1 | 2 | < 1 |
| Aërobe slibfractie in beluchtingsreactor (%) | 60 | 75 | 75 | 100 |

*: geeft de mate van compartimentering weer, 1 meest aantal compartimenten, 4 minst aantal compartimenten

Uit de resultaten van het praktijkonderzoek kan worden afgeleid dat om een lage SVI te handhaven de volgende maatregelen getroffen moeten worden:

1. implementatie van een separate anoxische reactor met propstroomkarakter;
2. het toepassen van een UCT-configuratie, introductie van een strikt anaërobe reactor;
3. implementatie van een extra anoxisch/aërobe reactor (wisselreactor) voor een verdere compartimentering;
4. handhaven van een hoog zuurstofgehalte (> 1,5 mg O₂/l) en het creëren van een lage ammoniumconcentratie (< 1 mg NH₄-N/l) in de laatste aërobe reactor.

In principe is maatregel 1 al voldoende om een SVI < 150 ml/g te handhaven. Afhankelijk van de influentkarakterisering en de daarbij benodigde anoxische en aërobe ruimte kan ook een SVI < 120 ml/g worden gehaald. Het percentage vaste anoxische ruimte waarin moet worden voorzien is afhankelijk van het totaal benodigde percentage anoxische ruimte. In dit onderzoek is gevonden dat bij een benodigd percentage anoxische ruimte van 35-45% een vaste anoxische ruimte van 20% voldoende is.

De maatregelen 2, 3, 4 geven extra zekerheid. Het toepassen van het UCT-systeem (of modificaties daarvan) optimaliseert de mogelijkheid tot slib met clusters van fosfaataccumulerende micro-organismen (PAO's). Een hoog zuurstofgehalte is nadelig voor *Microthrix parvicella* en zorgt voor ammoniumconcentraties in het effluent < 1 mg NH₄-N/l. De introductie van de maatregelen 3 en 4 dragen er toe bij dat de SVI het gehele jaar door kleiner is dan 120 ml/g zonder aanvullende chemische P-verwijdering. Dit is in overeenstemming met de resultaten van een recent uitgevoerde inventarisatie in Nederland waarbij de slibvolume-indices van rwzi's met verschillende procesconfiguraties voor biologisch P-verwijdering met elkaar zijn vergeleken.

De ontwerprichtlijnen zoals die in het kader van dit project aan de hand van de resultaten van het praktijkonderzoek zijn opgesteld voor de dimensionering van de anoxische ruimte en de indeling van de verschillende reactoren zijn als volgt:

- De totaal benodigde beluchtingsruimte (anoxisch en aëroob) wordt berekend met de HSA-methode. Het benodigde volume is daarbij afhankelijk van de afvalwaterkwaliteit (BZV/N-verhouding) en de ontwerptemperatuur.
- Indien het percentage aërobe slibfractie in de laatste reactor van de rwzi minimaal 80% bedraagt zal een slibkwaliteit met goede bezinkeigenschappen (SVI < 120 ml/g) worden gehandhaafd. Alleen bij deze aërobe slibfractie is een lage ammoniumconcentratie bereikbaar. Indien de aërobe slibfractie in de laatste aërobe reactor lager wordt dan 80%, moeten een separate anoxische reactor en de vereiste recirculatievoorzieningen worden geïntroduceerd.
- De separate anoxische ruimte bedraagt maximaal 50% van de totale anoxisch/aërobe ruimte. Het minimum bedraagt 20%. Dit laatste is noodzakelijk om voldoende contacttijd te realiseren. Indien de vereiste anoxische ruimte meer dan 50 % van de totale anoxisch/aërobe ruimte bedraagt, moet tussen de separate anoxische reactor en de aërobe reactor een anoxisch/aërobe reactor worden geïmplementeerd. Tevens dienen dan extra recirculatievoorzieningen te worden gerealiseerd.

Op basis van het uitgevoerde onderzoek wordt aanbevolen om bij het hantieren van de gepresenteerde ontwerprichtlijnen voor de configuratie van rwzi's met vergaande biologische nutriëntenverwijdering, bij het dimensioneren van de nabezinktanks te overwegen om uit te gaan van een ontwerp-SVI van 120 ml/g.

SUMMARY

Bulking sludge is an unwanted symptom in wastewater treatment. Already a lot of effort has been put in research on this topic. From practice it turned out that the introduction of biological P- and N-removal often results in an increase of filamentous organisms. With the treatment of municipal wastewater, *Microthrix parvicella* is usually found as the dominant filamentous organism.

At wastewater treatment plants (wwtp's) with high P- and N-removal, and one or more separate anoxic reactors between the anaerobic and aerobic reactor, an improvement of the sludge settling characteristics is observed. However, a final hypothesis on the appearance of bulking sludge at treatment plants with biological P- and N-removal was till now not available. There is still discussion about the necessity and configuration of the anoxic reactors. This is the reason that till now no univocal design criteria were formulated for the eventually required separate anoxic reactor.

In framework of above-mentioned, practical research has been carried out in the period June 1999 – April 2000 on four wwtp's with high P- and N-removal, but with a different rate of compartmentalization of the process reactors:

- wwtp Papendrecht (Waterboard Hollandse Eilanden en Waarden): 2-stage Phoredox-configuration;
- wwtp Alphen Kerk & Zanen (Waterboard van Rijnland): 3-stage Phoredox-configuration;
- wwtp Groesbeek (Waterboard Rivierenland): 4-stage Phoredox-configuration;
- wwtp Hardenberg (Waterboard Groot Salland, per 1-1-2000 Waterboard Velt en Vecht): BCFS[®]-configuration.

The objective of the research was to determine the necessity of a separate anoxic reactor and to formulate design criteria for the required process reactors for good sludge settling characteristics. In following, the most important results and conclusions of the practical research are given.

The wwtp without a separate anoxic reactor showed the highest SVI's at comparable anoxic sludge fractions. Implementation of a separate anoxic reactor of circa 20% of the total required anoxic and aerobic volume, in combination with a proper designed anaerobic reactor and adequate O₂ conditions, is sufficient to maintain good sludge settling characteristics (SVI always < 150 ml/g). An additional improvement (SVI always < 120 ml/g) can be reached with a further division of the aerobic reactor, with an aerobic sludge fraction in the last aerobic reactor higher than 80%.

At all wwtp's it was noted that the concentration soluble COD in the influent of the aerobic reactor was equal to the effluent quality. The volatile fatty acids were in the first compartment of the anaerobic reactor completely stored and used for P-release and denitrification.

From the course in the concentration of the long-chain fatty acids in all wwtp's, it appeared that no net production of long-chain fatty acids takes place in the anaerobic reactor. The implementation of a separate anoxic reactor does not result in a complete conversion of long-chain fatty acids. The analysis of fatty acids in the influent has therefore no additional value for the design of the anoxic reactor. The concentration long-chain fatty acids (solved and adsorbed) in the influent of the aerobic reactor is for systems with and without a separate anoxic reactor similar. This means that long-chain fatty acids are always available for the growth of *Microthrix parvicella*.

The presence of ammonium in the aerobic reactor can be a determining factor for the growth of *Microthrix parvicella*. For wwtp's with the highest SVI-values, the highest ammonium concentrations in the effluent were measured.

In the following summarizing table, the relation between settling characteristics, presence of *Microthrix parvicella* and the process configuration of the wwtp's is presented.

| Parameters | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg |
|------------------------------------------------|------------------|---------------------|------------------|------------|
| Type | 2 stage Phoredox | 3 stage Phoredox | 4 stage Phoredox | BCFS |
| Anoxic reactor | - | + | + | ++ |
| Compartmentalization* | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Maximum value SVI (ml/g) | 170 | 125 | 140 | 120 |
| <i>Microthrix parvicella</i> present | + | - | + | - |
| Ammonium concentration in effluent (mg/l) | 2 | < 1 | 2 | < 1 |
| Aerobic sludge fraction in aerated reactor (%) | 60 | 75 | 75 | 100 |

*: gives the degree of compartmentalization, 1 most compartments, 4 least compartments

From the results of the practical research, it can be derived that for a low SVI the following measures need to be taken:

1. implementation of a separate anoxic reactor with a plug flow character;
2. the application of a UCT-configuration, introduction of a strict anaerobic reactor;
3. implementation of an extra anoxic/aerobic reactor for a further compartmentalization;
4. maintenance of a high oxygen content ($> 1,5 \text{ mg O}_2/\text{l}$) and the creation of a low ammonium concentration ($< 1 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$) in the final aerobic reactor.

Measure 1 is in fact already sufficient to maintain a $\text{SVI} < 150 \text{ ml/g}$. Depending on wastewater characteristics and associated required anoxic and aerobic volume, a $\text{SVI} < 120 \text{ ml/g}$ could be reached. The percentage fixed anoxic volume depends on the totally required anoxic volume. In this research is found that for a required percentage anoxic volume of 35-45%, a fixed volume of 20% is sufficient.

Measure 2, 3, 4 give extra security. The application of an UCT-system (or modifications) optimises the possibility to gain sludge with clusters of phosphate accumulating organisms (PAO). A high oxygen concentration is a disadvantage for *Microthrix parvicella* and keeps the ammonium concentration in the effluent $< 1 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$. The introduction of measure 3 and 4 contribute in a low SVI (< 120) over the whole year, without chemical P-removal. This is in accordance with the results from a recent inventory study in the Netherlands, in which a comparison was made on sludge volume indices in different process configurations for bio-P.

Based on results from the practical research, the following criteria are formulated for the design of the anoxic reactor and the configuration of the several reactors for systems with high biological nutrient removal:

- The total required aeration volume (anoxic and aerobic) is determined with the HSA-method. The required volume is then dependent on the wastewater characteristics (BOD/N-ratio) and the design temperature.
- When the percentage of aerobic sludge fraction in the last reactor of the wwtp is at least 80%, a sludge quality with good settling characteristics (SVI $< 120 \text{ ml/g}$) will be maintained. Only at this aerobic sludge fraction a low ammonium concentration can be reached. When the aerobic sludge fraction in the last aerobic reactor is lower than 80%, a separate anoxic reactor and required recycle facilities have to be installed.
- The separate anoxic volume has to be limited to a maximum of 50% of the total anoxic/aerobic volume. The minimum percentage amounts 20%. The last is necessary to realize sufficient contact time. When the required anoxic volume is higher than 50%, a reactor with recycling facilities has to be placed between the separate anoxic reactor and the aerobic reactor. In this intermediate reactor the conditions can be changed from anoxic to aerobic, depending on the nitrogen effluent quality.

Based on this research it is recommended that when the presented design guidelines are used for the configuration of a wwtp with high biological nutrient removal, a SVI of 120 ml/g should be considered for the design of the secondary clarifiers.

1. INLEIDING

1.1 Algemeen

Licht slib is een ongewenst verschijnsel in de afvalwaterzuivering en er is reeds veel energie gestoken in het onderzoek naar dit fenomeen. Er bestaat echter nog steeds geen sluitende verklaring voor het optreden van licht slib. Het voorkomen van licht slib is daarmee vaak onvoorspelbaar. De bekendste oorzaken bij communale zuiveringsinrichtingen zijn een tekort aan zuurstof, een verkeerd voedingspatroon of het aanwezig zijn van bepaalde influentcomponenten, zoals lagere en hogere vetzuren.

In de praktijk wordt zoveel mogelijk een zuiveringsproces met een propstroomkarakter in het begin van de rwzi nagestreefd. Onduidelijk is nog welke biologische maatregelen getroffen moeten worden om licht slib geheel te voorkomen.

In deze rapportage wordt licht slib gedefinieerd als slib met een slibvolume-index (SVI) groter dan 150 ml/g.

1.2 Probleemstelling

Uit de praktijk is gebleken dat de introductie van biologische P- en N-verwijdering meestal gepaard gaat met een verhoging van de hoeveelheid draadvormende micro-organismen (STOWA, 1993). Bij de behandeling van communaal afvalwater wordt doorgaans *Microthrix parvicella* als dominante draadvormer aangetroffen. *Microthrix parvicella* kan naast een vermindering van de slibbezineigenschappen ook drijfslagvorming veroorzaken.

Bij procesconfiguraties voor P- en N-verwijdering, waarbij één of meerdere separate anoxische reactoren zijn geïmplementeerd tussen de anaërobe - en de aërobe reactor, wordt er een verbetering van de slibbezineigenschappen waargenomen (Eikelboom, 1998). Echter, een sluitende hypothese rond het voorkomen van licht slib bij de implementatie van biologische P- en N-verwijdering ontbreekt tot op heden. Er is nog discussie omtrent de noodzaak en de configuratie van de anoxische reactor in een actief-slibstelsel voor P- en N-verwijdering met een stabiele lage SVI. Hierdoor zijn er ook nog geen eenduidige ontwerprichtlijnen voor de eventueel noodzakelijk geachte separate anoxische reactor.

1.3 Doel van het onderzoek

Het doel van deze studie is om de noodzakelijkheid van separate anoxische reactoren vast te stellen en ontwerprichtlijnen voor de noodzakelijke procesreactoren op te stellen zodat, ondanks de implementatie van biologische P- en N-verwijdering, slib met goede bezineigenschappen kan ontstaan.

Voor de specifieke vragen die hierbij beantwoord dienen te worden, wordt verwezen naar § 2.3.

De resultaten van het onderzoek moeten uiteindelijk leiden tot ontwerprichtlijnen voor rwzi's met een vergaande biologische P- en N-verwijdering met betrekking tot de slibbezinkingseigenschappen.

De belangrijkste invloed van het onderzoek kan zijn dat lagere investeringen voor de bouw of aanpassingen van rwzi's benodigd zijn omdat een lagere ontwerp-SVI (100 – 120 ml/g) en/of een hoger slibgehalte kan worden gehanteerd. Tevens zal de noodzaak van aanvullende chemicaliëndosering zoals $AlCl_3$ minder aan de orde zijn, hetgeen de duurzaamheid van de bedrijfsvoering ten goede zal komen.

1.4 **Leeswijzer**

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de achterliggende theorie en wordt een werkhypothese ten behoeve van dit onderzoek geformuleerd. In hoofdstuk 3 wordt het plan van aanpak beschreven, waarna in hoofdstuk 4 de betrokken rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) worden weergegeven. De resultaten van het onderzoek zijn vermeld in hoofdstuk 5. De verkregen resultaten worden aan de hand van de geformuleerde vraagstelling geëvalueerd in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 worden richtlijnen voor de configuratie van rwzi's met vergaande P- en N- verwijdering weergegeven. De rapportage wordt afgesloten met de conclusies.

2. THEORIE EN WERKHYPOTHESE

2.1 Theorie

2.1.1 Achtergrond

Wanneer het lichtslibprobleem wordt onderzocht, vindt dit plaats op basis van de microbiologie (het benoemen en bestuderen van specifieke organismen) of op basis van de praktijk (het vaststellen van correlaties tussen het optreden van licht slib en procesvariabelen). Daarnaast kan worden getracht om op basis van laboratorium- en praktijkonderzoeken, procestechnologische verklaringen te geven.

De procestechnologische verklaringen die in het verleden naar voren zijn gebracht, kunnen als volgt worden samengevat:

- vlokvormers hebben een lagere substraataffiniteit en een hogere conversiesnelheid dan draadvormers;
- vlokvormers hebben een groter vermogen tot opslag van reservestoffen (glycogeen, PHB) dan draadvormers;
- draadvormers hebben minder last van diffusielimitatie dan vlokvormers;
- draadvormers hebben een lagere onderhoudsbehoefte dan vlokvormers.

De laboratorium- en praktijkonderzoeken hebben in de praktijk geleid tot het bouwen van selectoren. De aanwending van selectoren, waarin de substraatconcentratie en kinetische en metabolische processen kunnen worden gemanipuleerd, bleek redelijk succesvol in de bestrijding van licht slib. Over het algemeen zijn als dimensioneringsgrondslagen voor een aërobe selector een vlokbelading en een contacttijd gehanteerd van respectievelijk 100 mg CZV/g d.s.h en 10 minuten (STOWA, 1988).

Tot aan de introductie van vergaande nutriëntenverwijdering leek met de introductie van de selector het lichtslibprobleem redelijk opgelost. De vragen: wat voor selector (aëroob/anoxisch/anaëroob) moet worden gekozen en welke processen vinden er precies in een selector plaats, bleven echter bestaan. De introductie van de biologische P en N-verwijdering bleek ondanks de aanwezigheid van selectoren in veel gevallen gepaard te gaan met een structurele verhoging van de draadvormende populatie in het slib (STOWA 1993).

Hierbij is gebleken dat *Microthrix parvicella* veruit de belangrijkste draadvormende bacterie is. De populatieomvang vertoont een seizoensritme, met een maximum in maart/april en een minimum in de herfst (Eikelboom en Andreasen 1995).

De groei van *Microthrix parvicella* kan in rwzi's met een vergaande P- en N-verwijdering niet worden geremd door de inzet van conventionele selectoren waarbij een contacttijd van 10 minuten wordt gehanteerd. Er werden daarom voor het bestrijden van *Microthrix parvicella* langere contacttijden (tot 1 h) aanbevolen (STOWA, 1994). Hierbij wordt de anaërobe selector vrijwel een

integraal onderdeel voor de anaërobe reactor. Ook dit leidde echter niet in alle gevallen tot een structurele oplossing. Overigens lijkt de vlokbelading in een anaërobe selector van minder belang (Wanner, 1994a).

2.1.2 Resultaten uit het verleden

Uit diverse onderzoeken van de laatste 10 jaar, is meer inzicht verkregen in het lichtslibprobleem. Belangrijke aandachtsgebieden bij deze onderzoeken waren, de groeiomstandigheden van *Microthrix parvicella*, de rol van hogere vetzuren, de procesconfiguratie, de mate van compartimentering, het aandeel van de onbeluchte (anoxische) fractie en de zuurstofconcentratie in het oxische deel van het proces.

Microthrix parvicella

De volgende procesomstandigheden zijn gunstig voor de groei van *Microthrix parvicella* (Eikelboom, 1999):

- slibbelasting < 0,2 kg BZV/ kg ds. d.;
- afvalwater met een hoog gehalte aan hogere vetzuren;
- omstandigheden waarbij de vetten in het influent hydrolyseren voordat ze de beluchtingsruimte bereiken;
- een laag zuurstofgehalte in de beluchtingsruimte en/of een grote anoxische zone.

Bij het onderzoek naar de fysiologische eigenschappen van *Microthrix parvicella*, uitgevoerd met reïncultures, is vastgesteld dat deze bacterie naast een gereduceerde N-bron (NH₄-N), ook een gereduceerde S-bron (sulfide, thiosulfaat of een S-houdend aminozuur) nodig heeft voor zijn groei. Alleen lage zuurstofconcentraties in het afvalwater zorgen ervoor dat de beschikbare N- en S-verbindingen in de gereduceerde vorm aanwezig zijn. Bij hogere zuurstofconcentraties zullen deze verbindingen niet in gereduceerde vorm blijven en kan *Microthrix parvicella* niet meer groeien (Slijkhuis, 1983 en Slijkhuis et al., 1984). Uit de literatuur volgen echter geen grensconcentraties voor bijvoorbeeld NH₄-N en S²⁻ waarbij een limitatie van de groei van *Microthrix parvicella* zal optreden.

Uit bovenstaande blijkt dat de procesomstandigheden in rwzi's met P- en N-verwijdering in principe gunstig zijn voor de groei van *Microthrix parvicella*, omdat er enerzijds sprake is van anaërobie in verband met biologische P-verwijdering en anderzijds kritisch geregelde zuurstofconcentraties worden gehanteerd in verband met vergaande N-verwijdering.

Hogere vetzuren

Uit onderzoek van Eikelboom en Andreasen (1995) blijkt dat de draadvormers aanwezig in het slib van een rwzi voor P- en N-verwijdering (*Microthrix parvicella* en *Type 0041*), groeien op de langzaam afbreekbare CZV-fractie in het afvalwater. Andreasen en Nielsen (1998) laten zien dat *Microthrix parvicella* alleen groeit op bepaalde hogere vetzuren waaronder palmitinezuur en oliezuur.

In huishoudelijk afvalwater bestaat 25% van het CZV uit vetachtige componenten (Slijkhuis 1984) die via een hydrolysestap kunnen worden omgezet in de genoemde hogere vetzuren. De hydrolysesnelheid van vet kan dus een snelheidsbepalende parameter zijn bij de beschikbaarheid van de hogere vetzuren voor *Microthrix parvicella*. (Andreasen en Nielsen 1998).

Compartimentering

Het ontstaan van *Microthrix parvicella* is diverse malen in verband gebracht met de procesconfiguratie. De aanwezigheid van een anaërobe reactor zoals deze wordt toegepast bij de biologische P-verwijdering, geeft *Microthrix parvicella* een concurrentievoordeel ten opzichte van andere draadvormers en vlokformers. (Eikelboom en Andreasen 1995, Andreasen en Nielsen 2000). In de anaërobe reactor zal hydrolyse van vetten optreden waarbij hogere vetzuren als oliezuur en palmitinezuur worden gevormd. De hogere vetzuren worden door *Microthrix parvicella* onder anaërobe condities sterk geabsorbeerd, opgenomen en omgezet in reservestoffen (zoals PHB). De geabsorbeerde vetzuren kunnen dan onder aërobe condities worden verwerkt. De sterke adsorptie van de hogere vetzuren door *Microthrix parvicella* wordt mede veroorzaakt door het hydrofobe celoppervlak (Soddell en Seviour 1990). De meeste vlokvormende bacteriën kunnen deze hogere vetzuren alleen onder aërobe condities opnemen en verwerken. Onder anoxische condities is *Microthrix parvicella* ook in staat om hogere vetzuren op te nemen. Onderzoek van Eikelboom et al. (1998) geeft echter aan dat onder deze condities andere micro-organismen meer competitief zijn. Uit bovenstaande blijkt dat de beschikbaarheid van hogere vetzuren in de anaërobe reactor een belangrijke parameter is voor de groei van *Microthrix parvicella*.

In tabel 1 is een samenvatting gegeven van de processen die zich in de praktijk in de anaërobe reactor afspelen en waarbij verschillende bacteriesoorten betrokken zijn.

Tabel 1: Processen in de anaërobe reactor waarbij verschillende bacteriesoorten betrokken zijn

| Processen | Vlokformers | | Draadvormers <i>Microthrix parvicella</i> |
|--------------------------|-------------|-------------|----------------------------------------------|
| | PAO* | NON - PAO** | |
| Opname lagere vetzuren | + | +/- | - |
| Hydrolyse | - | + | +/- |
| Opname hogere vetzuren | - | - | + |
| Opslag reservestoffen | + | - | + |
| P-afgifte | + | - | + |
| Denitrificatie | - | + | - |
| CZV-adsorptie/ absorptie | + | + | + |
| Groei | - | + | - |

+ : vindt plaats, - : vindt niet plaats, +/- : kan plaatsvinden afhankelijk van de situatie

* : PAO: fosfaataccumulerende micro-organismen

** : NON-PAO: vlokvormende geen fosfaataccumulerende micro-organismen

Naast een selectievoordeel voor *Microthrix parvicella* is in enkele gevallen een tegengesteld effect door de implementatie van de anaërobe tank waargenomen; de verzwaring van de slibvlok door fosfaatgranules bestaande uit clusters van PAO's. Hierdoor was het in veel gevallen mogelijk om ondanks de aanwezigheid van *Microthrix parvicella* een lage SVI te handhaven.

Separate anoxische reactor

In diverse onderzoeken is geconstateerd dat *Microthrix parvicella* meer gestimuleerd wordt in rwzi's gebaseerd op simultane denitrificatie dan procesconfiguraties waarbij een aparte anoxische reactor wordt toegepast (Wagner 1994, Eikelboom et. al. 1998). Kenmerken voor systemen die zijn gebaseerd op simultane denitrificatie zijn:

- vaak lage zuurstofconcentraties;
- relatief wat hogere ammoniumconcentraties (> 2 – 3 mg NH₄-N/l).

Het installeren van een aparte anoxische reactor geeft het systeem een verdere compartimentering en een beter propstroomkarakter. Een beter propstroomkarakter leidt tot de introductie van een grotere substraatgradiënt. Waarnemingen aan rwzi's hebben laten zien dat een substraatgradiënt de groei van *Microthrix parvicella* vermindert (STOWA, 1988). Volgens Andreasen en Nielsen (2000) wordt deze waarneming verklaard door een betere opname van hogere vetzuren aan de slibvlokken, veroorzaakt door adsorptie of een precipitatie met calcium of magnesium en niet door een betere opnamekinetiek van vlokvormers. Deze verklaring wordt ondersteund door het hydrofobe karakter van hogere vetzuren. Deze hydrofobe eigenschappen leiden tot adsorptie en een geringe oplosbaarheid van deze substraten (Qluéméneur and Marty, 1994).

In tabel 2 is een samenvatting gegeven van de processen die zich in de vaste anoxische reactor (na de anaërobe reactor) afspelen en waarbij verschillende bacteriesoorten betrokken zijn.

Tabel 2: Processen in de vaste anoxische reactor waarbij verschillende bacteriesoorten betrokken zijn

| Processen | Vlokvormers | | Draadvormers <i>Microthrix parvicella</i> |
|--------------------------|-------------|-------------|----------------------------------------------|
| | PAO* | NON – PAO** | |
| Hydrolyse | - | + | +/- |
| Opname hogere vetzuren | - | + | + |
| Opslag reservestoffen | +/- | - | + |
| P-afgifte | +/- *** | - | +/- |
| Denitrificatie | + | + | +/- |
| CZV-adsorptie/ absorptie | + | + | + |
| Groei | - | + | - |

+ : vindt plaats, - : vindt niet plaats, +/- : kan plaatsvinden afhankelijk van de situatie

• : PAO: fosfaataccumulerende micro-organismen

** : NON-PAO: vlokvormende geen fosfaataccumulerende micro-organismen

***: Denitrificerende fosfaataccumulerende micro-organismen (DPB's) zullen onder anoxische condities fosfaat opnemen

Procescondities aërobe reactor

Naast de eerder genoemde factoren als mogelijke oorzaak voor de vorming van licht slib, is gebleken dat de combinatie van een laag zuurstofgehalte in de aërobe reactor, lagere temperaturen ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) en een anoxische fractie groter dan 60% van het totaal, de aanwezigheid van *Microthrix parvicella* stimuleren (Slijkhuis 1983, Casey 1995 - 2000, Wanner 1994, Eikelboom et. al. 1998). *Microthrix parvicella* heeft een hogere affiniteit voor zuurstof dan vlokvormende organismen. Het is echter niet duidelijk of een lager zuurstofgehalte van de aërobe reactor leidt tot een verhoging van de hoeveelheid *Microthrix parvicella* in het slib. Bij hoge anoxische fracties en lagere temperaturen zullen de conversiesnelheden lager zijn om het aanwezige substraat (waaronder hogere vetzuren) af te breken (Tian et. al., 1994).

Volgens Casey (1995 - 2000) worden bij intermitterende anoxisch-oxische condities vlokvormers geremd door de productie van intracellulair stikstofoxide. Draadvormers denitrificeren namelijk gedeeltelijk tot nitriet en produceren geen stikstofoxide. Dit geeft de draadvormers een competitief voordeel. Casey (1995 - 2000) vond de hoogste SVI bij een onbeluchte slibfractie van 60 tot 70%. Dit komt, uitgaande van een N_{tot} -eis van 10 mg N/l, overeen met een BZV/N-verhouding in het influent $< 2,8$. Bovengenoemde percentages zullen afhankelijk zijn van de slibleeftijd, temperatuur en nitraatbelasting van de anoxische reactor. Om licht slib te vermijden moet de aërobe slibfractie tenminste 60% bedragen in de beluchtingsruimte (anoxische en aërobe reactor(en)).

Belangrijk met betrekking tot het juist functioneren van het biosorptie-effect in de daartoe bestemde reactor van een rwzi is dat de aërobe reactor ervoor moet zorgen dat het retourslib voldoende geregenereerd is. In de praktijk wordt dit gerealiseerd door een voldoende lange slibleeftijd (> 20 dagen) in combinatie met een voldoende hoge zuurstofconcentratie in de aërobe reactor. Dit betekent dat de concentratie reservestoffen (PHB) in het retourslib voldoende laag moet zijn. In tabel 3 is een samenvatting gegeven van de processen die zich in de aërobe reactor afspelen en waarbij verschillende bacteriesoorten betrokken zijn.

Tabel 3: Processen in de aërobe reactor waarbij verschillende bacteriesoorten betrokken zijn

| Processen | Vlokvormers | | Draadvormers <i>Microthrix parvicella</i> |
|---------------------------------|-------------|-------------|----------------------------------------------|
| | PAO* | NON - PAO** | |
| Hydrolyse/ opname hoge vetzuren | - | +/- | +/- |
| P-opname | + | - | +/- |
| Nitrificatie | - | + | - |
| Denitrificatie | - | - | - |
| CZV-adsorptie/ absorptie | - | +/- | - |
| Groei | + | + | + |

+ : vindt plaats, - : vindt niet plaats, +/- : kan plaatsvinden afhankelijk van de situatie

* : PAO: fosfaataccumulerende micro-organismen

** : NON-PAO: vlokvormende geen fosfaataccumulerende micro-organismen

Door Reitsma en Flaming (1999) is onlangs een inventarisatie uitgevoerd waarbij de slibbezinkenschappen van rwzi's met biologische P- en N-verwijdering met verschillende procesconfiguraties zijn onderzocht. Uit deze inventarisatie bleek dat om slib met goede bezinkenschappen te garanderen, een rwzi in ieder geval moet bestaan uit een propstroom anaërobe reactor, een aparte anoxische reactor en een aërobe reactor.

Verder lijkt een fysieke scheiding van de aërobe reactor en een tweede anoxisch-aërobe reactor de kans op licht slib te verminderen. Door de onderzoekers wordt verder aangegeven dat met een stand-by dosering van aluminiumzouten, een eventueel kritisch moment met hoge SVI's in het voorjaar in de hand kan worden gehouden.

2.1.3 Invloed van de procesconfiguratie op de SVI

Uitgaande van de waarnemingen en resultaten van verschillende onderzoekers kunnen naar afnemende SVI en dus betere slibbezinkenschappen, de volgende procesconfiguraties gerangschikt worden:

- anaërobe reactor gevolgd door een volledig gemengd systeem met simultane denitrificatie;
- anaërobe reactor gevolgd door een volledig gemengd systeem met intermitterende denitrificatie;
- anaërobe reactor gevolgd door alternerende anoxische en aërobe condities;
- voordenitrificatie;
- een combinatie van bovenstaande procesconfiguraties (anaërobe reactor gevolgd door voordenitrificatie plus alternerende anoxische en aërobe condities).

2.2 **Werkhypothese**

Uit paragraaf 2.1 blijkt dat bij rwzi's met biologische P- en N-verwijdering verschillende parameters een rol kunnen spelen rondom het fenomeen licht slib. Uit de Nederlandse praktijksituatie is de volgende werkhypothese geformuleerd ten behoeve van het in dit rapport beschreven onderzoek.

De verwachting is dat de SVI gedurende het hele jaar niet boven de 120 ml/g stijgt bij procesconfiguraties met tenminste één anoxische reactor tussen de anaërobe en aërobe reactor. Uitgangspunt is dat naschakeling van een anoxische reactor achter een anaërobe reactor de structurele "biologische" oplossing is voor het lichtslibprobleem in rwzi's met biologische P- en N-verwijdering. De dimensionering van de anoxische reactor (configuratie, grootte) hangt samen met de vereiste anoxische slibfractie ten behoeve van de stikstofverwijdering en de mogelijkheden van denitrificerende defosfateerders.

De anaërobe reactor alleen biedt onvoldoende garanties voor het handhaven van een lage SVI doordat de (gehydrolyseerde) niet-opgeloste fractie, waaronder hogere vetzuren, niet voldoende wordt opgenomen of omgezet en daardoor de aërobe reactor kunnen bereiken.

Naast de dimensionering van de anoxische reactor, lijkt ook de dimensionering van het laatste gedeelte van de beluchtingsruimte belangrijk te zijn. De beluchting wordt meestal zo geregeld, dat afhankelijk van de belastinggraad deze reactoren anoxisch dan wel aëroob kunnen worden bedreven. Deze reactoren kunnen als zodanig de activiteit en de opslagcapaciteit van het slib regelen voordat het slib wordt geretourneerd naar de reactoren waar biosorptie moet optreden. Verder lijken de zuurstof- en de ammoniumconcentratie in de aërobe reactor bepalend te zijn voor de groei van *Microthrix parvicella*.

De specifieke vragen die hierbij moeten worden beantwoord zijn:

1. Is er een relatie aan te tonen tussen de slibbezineigenschappen en de onbeluchte slibfractie, de vereiste contacttijd, de mate van compartimentering van de anaërobe reactor en anoxische reactor of overige condities die belangrijk zijn voor de groei van *Microthrix parvicella*?
2. Hoe worden de verschillende CZV-fracties (met name de fracties waarvan bekend is dat ze licht slib veroorzaken) opgenomen, opgeslagen en verbruikt in de anaërobe - en anoxische reactoren, en met welke snelheden vindt dit plaats?
3. Wat is de rol van de ammoniumconcentratie in relatie tot de groei van *Microthrix parvicella* in de aërobe reactor?

Met behulp van de werkhypothese is getracht de vragen zoals die zijn geformuleerd te beantwoorden via een praktijkonderzoek.

3. UITVOERING VAN HET ONDERZOEK

3.1 Onderzoeksopzet

Vier geselecteerde rwzi's zijn gedurende één jaar elk seizoen tijdens intensieve meetcampagnes bemonsterd. Elke meetcampagne werd in principe onder DWA-condities uitgevoerd op twee achtereenvolgende dagen. Tijdens de meetcampagne zijn het influent, effluent en de aflopen van de verschillende procesreactoren bemonsterd en op verschillende componenten geanalyseerd.

3.2 Bemonstering en chemische analyses

3.2.1 Bemonstering

Tijdens elke meetsessie zijn het influent, effluent, de afloop van de verschillende procesreactoren en het retourslib bemonsterd. Naast een 24-h mengmonster van het influent en effluent, werden dagelijks drie steekmonsters genomen van de verschillende stromen. Voor de aflopen van de verschillende procesreactoren werd hierbij rekening gehouden met de contacttijd in de betreffende procesreactor. Om de actuele contacttijden te kunnen berekenen werden de debieten van influent en de interne stromen bij de monsternamen van het influent geregistreerd. In tabel 4 is het bemonsteringsprogramma schematisch weergegeven.

3.2.2 Chemische analyses

Voor het filtreren van monsters (0,45 µm) werden filters van cellulosederivaten (nitraat en acetaat) ingezet. Om te voorkomen dat het acetaat uit het filter de analyseresultaten zou beïnvloeden, werden de filters met circa 100 ml van het betreffende monster voorgespoeld.

Met uitzondering van de bepaling van de hogere en lagere vetzuren, de PHA-analyses (polyhydroxyboterzuur (PHB) + polyhydroxyvaleriaanzuur (PHV)) en de Fluorescent In Situ Hybridisatie (FISH), zijn alle analyses uitgevoerd door de laboratoria van de betreffende waterbeheerders. Deze metingen werden uitgevoerd volgens de gebruikelijke methoden en NEN-voorschriften. De concentraties lagere vetzuren, hogere vetzuren en de PHA werden gaschromatografisch bepaald.

Lagere vetzuren

Voor de analyse van de lagere vetzuren werden de gefiltreerde monster (0,45 µm) bewaard in een 3% mierzuuroplossing. De instelling van de gaschromatograaf is beschreven in Visser (1995).

Hogere vetzuren

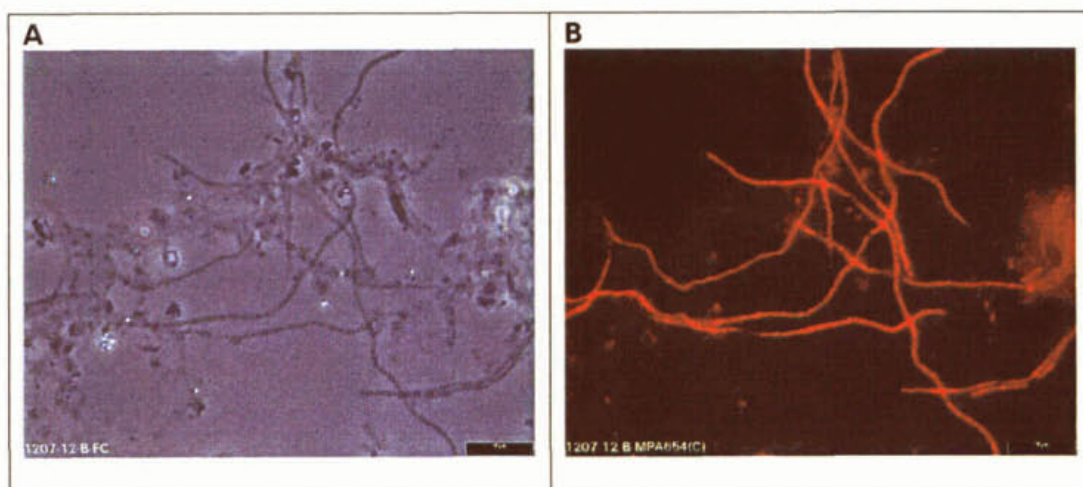
Aan de analyse van de hogere vetzuren ging een extractie met gedestilleerde petroleumether vooraf, waarna de vetextractie wordt verzeept en gemethyleerd (ISO 5509). De methylesters van de vetzuren werden vervolgens gaschromatografisch bepaald. De analyse van de hogere vetzuren komt overeen met de methodiek zoals toegepast in een recent uitgevoerd onderzoek in Duitsland met betrekking tot de bepaling van hogere vetzuren in afvalwater (Bürmann, 2000).

PHA (PHB en PHV)

Voordat de PHA-analyse werd uitgevoerd, werd PHA uit de gedroogde slibpreparaten geëxtraheerd. De methodiek staat beschreven in Smolders (1995). De concentraties PHB en PHV zijn hierbij afzonderlijk bepaald.

FISH-analyse

Tijdens het onderzoek werden bij elke meetsessie per rwzi, slibmonsters uit de aërobe reactor genomen en zowel met ethanol als formaldehyde gefixeerd. De monsters werden gebruikt voor een FISH-analyse conform Wagner (1994). Met behulp van de 16 rRNA-methode kon *Microthrix parvicella* in het slib zowel kwalitatief als kwantitatief worden bepaald (zie figuur 1). Voor de kwantitatieve bepaling werd de totale lengte *Microthrix parvicella* in een milliliter slibvloeistof bepaald.



Figuur 1: Bepaling van *Microthrix parvicella* in het slib met behulp van FISH-analyses: A: fasecontrast, B: FISH-behandeling, rood is *Microthrix parvicella*

Tabel 4: Bemonsteringsprogramma per meetcampagne

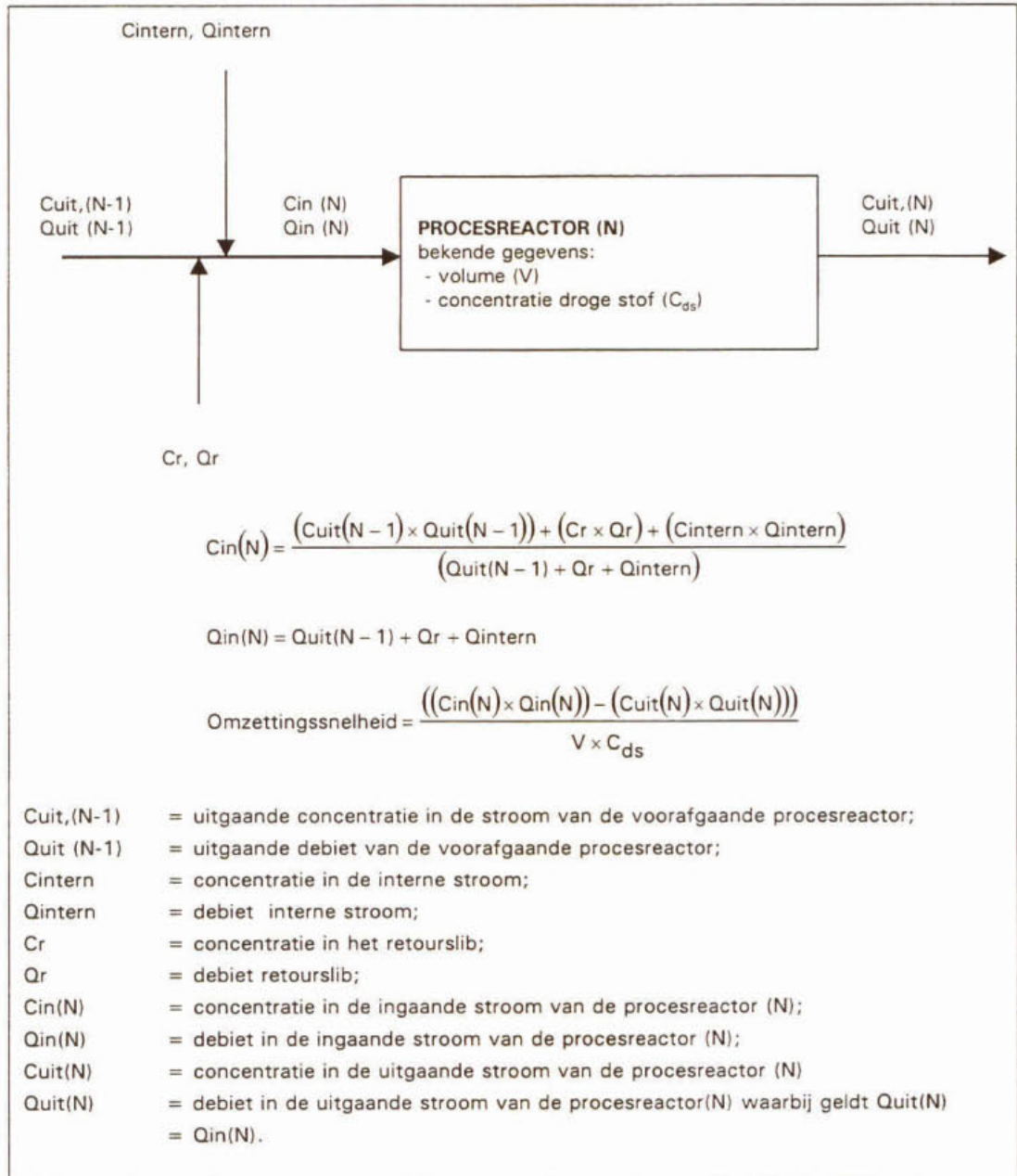
| | Influent | Retourslib | Afloop Selector | Afloop Anaërobe reactor | Voordenitrificatiereactor | Tweede anoxische reactor of aërobe reactor | Aërobe reactor | Effluent |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Registratie + 24-uurs bemonstering | <ul style="list-style-type: none"> - debiet (m³/h) - 24 h. bemonstering (ruw en gefiltreerd) - CZV, BZV, Nkj en P - hogere vetzuren - lagere vetzuren | <ul style="list-style-type: none"> - debiet retourslib | | | <ul style="list-style-type: none"> - debiet recirculatie | <ul style="list-style-type: none"> - debiet recirculatie | <ul style="list-style-type: none"> - debiet recirculatie | <ul style="list-style-type: none"> - 24 h. bemonstering (ruw en gefiltreerd) - CZV, BZV, NH₄-N en P |
| Steekbemonstering + analyses (drie keer per dag) | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - Nkj en P - hogere vetzuren <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - d.s. - P - PHA* - hogere vetzuren <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - d.s. - P - PHA* - hogere vetzuren <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - d.s. - P - PHA* - hogere vetzuren <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - d.s. - P - PHA* - hogere vetzuren <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - d.s. - P - PHA* <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - d.s. - P - PHA* <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P | <p>Ruw</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - Nkj en P <p>Gefiltreerd</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZV - BZV - lagere vetzuren - NH₄-N - NO_{2,3}-N - PO₄-P |
| Extra Metingen | | | | | | | <ul style="list-style-type: none"> - FISH-analyse - SVI - temperatuur | |

*: PHA = PHB + PHV

3.3

Berekeningen

Met behulp van de geregistreeerde debieten en de gemeten concentraties van de verschillende componenten in de aflopen van de verschillende procesreactoren, is het mogelijk per procesreactor de toeloopconcentratie te berekenen, massabalansen op te stellen en de omzettingssnelheid per component in de verschillende procesreactoren te berekenen. De methodiek is in figuur 2 weergegeven.



Figuur 2: Berekening van de concentratie in de toeloop van de procesonderdelen en omzettingssnelheid in de willekeurige procesonderdelen

In tabel 5 zijn de conversieparameters weergegeven om het verbruik van organisch materiaal voor de verschillende biologische processen te bepalen. In hoofdstuk 6 worden deze kengetallen toegelicht.

Tabel 5: Gebruikte conversieparameters

| Conversieparameter | Waarde | Eenheid | Literatuur |
|------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|---------------------------------|
| Denitrificatie Acetaatverbruik per mg NO ₃ -N verwijderd | 4,65 | mg CZV _{acetaat} /mg NO ₃ -N | Wolfson (1992) Narkis (1979) |
| P-afgifte Acetaatverbruik per mg afgegeven PO ₄ -P | 2 | mg CZV _{acetaat} /mg PO ₄ -P | Smolders (1995) |

4.

BETROKKEN RWZI'S

Het onderzoek is uitgevoerd op vier rwzi's waarbij voor de vergaande P- en N-verwijdering alleen een anaërobe reactor of een combinatie van een anaërobe en anoxische reactor is geïntroduceerd. De mate van compartimentering van de betreffende rwzi's varieerde hierbij. De volgende rwzi's zijn in het onderzoek betrokken:

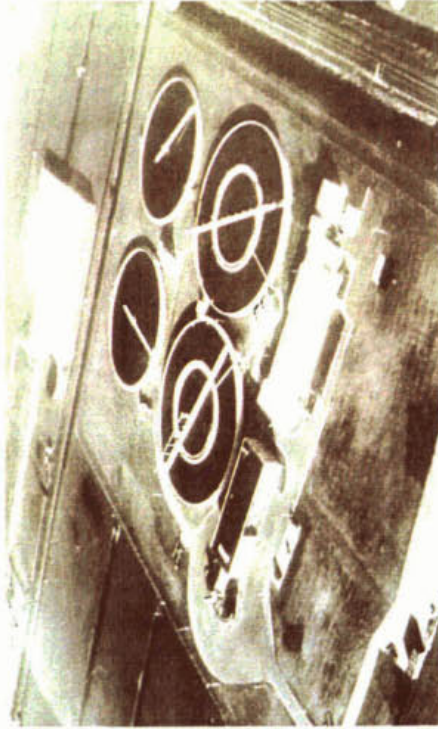
- rwzi Papendrecht (Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden): 2-traps Phoredox-configuratie;
- rwzi Alphen Kerk & Zanen (Hoogheemraadschap van Rijnland): 3-traps Phoredox-configuratie;
- rwzi Groesbeek (Zuiveringsschap Rivierenland): 4-traps Phoredox-configuratie;
- rwzi Hardenberg (Waterschap Groot Salland, per 1-1-2000 Waterschap Velt en Vecht): BCFS[®]-configuratie.

Van de betrokken rwzi's zijn de luchtfoto's in figuur 3 en de schematische configuraties weergegeven in figuur 4. In tabel 6 zijn de dimensioneringsgrondslagen van de betrokken rwzi's vermeld. Verder zijn in bijlage 2 foto's van bovengenoemde rwzi's opgenomen.

RWZI Papendrecht



RWZI Alphen Kerk & Zanen



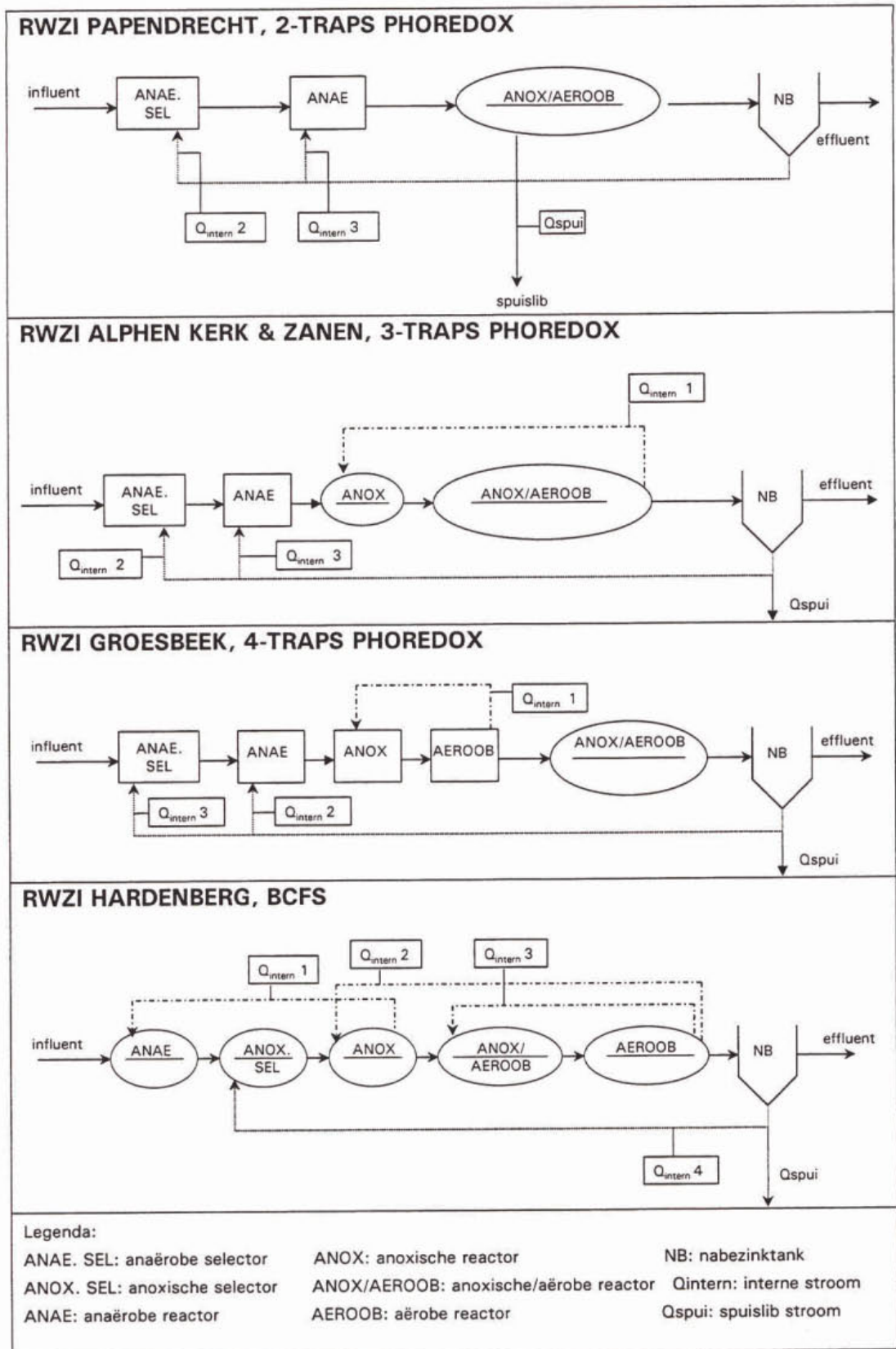
RWZI Groesbeek



RWZI Hardenberg



Figuur 3: Luchtfoto's van de betrokken rwzi's



Figuur 4. Procesconfiguraties van de betrokken rwzi's

Tabel 6. Dimensioneringsgrondslagen van de verschillende betrokken rwzi's

| Parameter | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------|------------|-------------------|
| Aanvoer | | | | | |
| - DWA | 600 | 1.250 | 230 | 740 | m ³ /h |
| - RWA | 1.700 | 2.200 | 900 | 1.715 | m ³ /h |
| Rioolstelsel | | | | | |
| - percentage vrijverval | 75 - 100 | 75 | 50 | 0 | % |
| Ontwerpbelasting | | | | | |
| - inwonerequivalenten | 53.000 | 120.000 | 27.300 | 63.250 | i.e = 136 g TZV |
| - CZV-vracht | 5.000 | 12.150 | 2660 | 6.125 | kg/d |
| - Nkj-vracht | 480 | 900 | 230 | 542 | kg/d |
| - P-vracht | 76 | 150 | 34 | 75 | kg/d |
| Ontwerpgrondslagen | | | | | |
| - BZV-slibbelasting (excl. anaëroob) | 0,045 | 0,055 | 0,054 | 0,036 | kg BZV/kg ds.d |
| - BZV-slibbelasting (incl. anaëroob) | 0,036 | 0,049 | 0,049 | 0,032 | kg BZV/kg ds.d |
| - N-slibbelasting (excl. anaëroob) | 0,011 | 0,012 | 0,012 | 0,011 | kg N/kg ds.d |
| - N-slibbelasting (incl. anaëroob) | 0,009 | 0,011 | 0,011 | 0,010 | kg N/kg ds.d |
| - SVI | 165 (150 + 10%) | 150 | 150 | 120 | ml/g |
| - slibgehalte | 4 | 4 | 3,9 | 4,3 | kg/m ³ |
| Anaërobe selector | | | | | |
| - volume | 470 | 630 | 160 | | m ³ |
| - aantal compartimenten | 3 | 4 | 1 ** | | - |
| - volume per compartiment | 155 | 157 | 160 | | m ³ |
| Anaërobe reactor | | | | | |
| - volume | 2.410 | 1.250 | 300 | 1.480 | m ³ |
| - aantal compartimenten | 3 | 2 | 2 | 1 ** | - |
| Anoxische selector | | | | | |
| - volume | | | | 740 | m ³ |
| - aantal compartimenten | | | | 1 ** | - |
| Voordenitrificatiereactor | | | | | |
| - volume | nvt | 2.025 * | 980 | 2.290 ** | m ³ |
| - % aanwezige anoxische ruimte | nvt | 23 | 19 | 21 | % |
| - % totaal benodigde anoxische ruimte | 45 | 40 | 35 | 35 | % |

| Parameter | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|----------------------------------|-------------|---------------------|--------------|------------|----------------|
| Contacttijden | | | | | |
| - anaërobe selector | 30 | 35 | 25 | -- | min |
| - anaërobe reactor | 90 | 55 | 35 | 80 | min |
| - totaal | 120 | 90 | 60 | 80 | min |
| - anoxische selector | -- | -- | -- | 30 | min |
| - anoxische reactor | -- | 45 | 40 | 60 | min |
| - totaal | -- | 45 | 40 | 90 | min |
| Aërobe reactor 1 (wisselcircuit) | | | | | |
| - volume | 11.110 | 6.875 * | 1.440 | 4.050 | m ³ |
| Aërobe reactor 2 | nvt | nvt | | | |
| - volume | | | 2.740 | 4.050 | m ³ |
| Nabezinktanks | | | | | |
| - oppervlaktebelasting | 0,66 | 0.69 | 0,71 | 0,82 | m/h |
| - aantal | 2 | 2 | 2 | 2 | - |
| - diameter | 40,5 | 45 | 24,9 en 31,5 | 36,5 | m |
| - kantdiepte | 2 | 2 | 1,5 | 2,5 | m |
| Effluenteisen | | | | | |
| - BZV | 20 | 8 | 10 | 10 | mg/l |
| - Ntot | 10 | 10 | 10 | 10 | mg/l |
| - P | 2 | 1 | 1 | 1 | mg/l |
| - SS | 30 | 15 | 30 | 30 | mg/l |

*: tijdens de onderzoeksperiode is één van de beluchtingsreactoren buiten bedrijf gesteld; hiermee werd de ontwerpbelasting beter benaderd

** : omloopsysteem met propstroomkarakter

***: omloopsysteem

5. RESULTATEN

5.1 Algemeen

Voor alle gemeten componenten in de diverse reactoren zijn concentratieprofielen opgesteld. De ingaande stromen naar de verschillende procesreactoren zijn hierbij met behulp van massabalansen berekend (figuur 2). Verder zijn per procesreactor de conversiesnelheden van de verschillende componenten bepaald (figuur 2).

In bijlage 1 zijn de resultaten van de analyses en de conversiesnelheden per rwzi en tijdens de vier meetsessies weergegeven. De belangrijkste resultaten worden in dit hoofdstuk behandeld.

5.2 Werking van de rwzi's tijdens de onderzoeksperiode

In tabel 7 zijn de gemiddelde concentraties van het influent en effluent, alsmede enkele algemene kengetallen van de betrokken rwzi's gedurende de onderzoeksperiode gegeven. Uit tabel 7 blijkt dat de vier rwzi's ruimschoots voldoen aan de gestelde effluenteisen. De biologische P- en N-verwijdering is tijdens de onderzoeksperiode op alle onderzochte rwzi's zeer goed en er werd ruimschoots voldaan aan de effluenteisen van 10 mg N_{tot}/l en 1 of 2 mg P/l, onafhankelijk van de seizoensinvloeden.

Tabel 7: Gemiddelde concentraties in influent en effluent en enkele kengetallen van de rwzi's gedurende de onderzoeksperiode

| Rwzi | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|--------------------------------------------------|-------------|---------------------|-----------|------------|-------------------|
| INFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV | 280 | 456 | 417 | 555 | mg/l |
| - BZV _s | 113 | 176 | 180 | 217 | mg/l |
| - Lagere vetzuren (gefiltr.) | 23 | 32 | 16 | 58 | mg CZV/l |
| - Nkj | 34 | 50 | 43 | 63 | mg CZV/l |
| - NH ₄ -N | 24 | 34 | 30 | 49 | mg/l |
| - P _{tot} | 4,7 | 7,1 | 7,0 | 6,7 | mg/l |
| - BZV/N | 3,3 | 3,5 | 4,2 | 3,4 | - |
| - BZV/P | 24,0 | 24,8 | 25,7 | 32,3 | - |
| - Debiet | 510 | 615 | 265 | 370 | m ³ /h |
| EFFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV (mg/l) | 28 | 31 | 30 | 37 | mg/l |
| - BZV _s (mg/l) | 2,3 | 2 | 3,6 | 3,1 | mg/l |
| - Nkj (mg/l) | 3,2 | 1,7 | 2,9 | 2,1 | mg/l |
| - NH ₄ -N (mg/l) | 2,2 | 0,9 | 2,3 | 0,2 | mg/l |
| - NO ₃ -N + NO ₂ -N (mg/l) | 1,3 | 2,1 | 1,9 | 2,8 | mg/l |
| - P _{tot} (mg/l) | 0,5 | 0,4 | 0,7 | 0,09** | mg/l |
| %P in slib | 2,7 | 2,5 | 2,6 | 2,8 | % |
| Slibgehalte | 4,0 | 3,7 | 3,4 | 4,8 | kg/m ³ |
| Actuele Slibbelasting: | | | | | |
| BZV * | 0,041 | 0,051 | 0,044 | 0,025 | kg/BZV/kg ds.d |
| N* | 0,013 | 0,013 | 0,011 | 0,008 | kg N/kg ds. d. |

*: exclusief anaëroobe ruimte

** : ortho-fosfaat

De ammoniumconcentraties in het effluent van de rwzi's Papendrecht en Groesbeek waren iets hoger (≈ 2 mg/l) ten opzichte van de concentraties in het effluent van de andere twee rwzi's (< 1 mg/l).

De concentratie lagere vetzuren in het influent van de rwzi Hardenberg was het hoogst. Dit wordt veroorzaakt door het lange persleidingstelsel (meer dan 10 km) van deze rwzi. Bij de andere rwzi's bedraagt de lengte van de persleiding maximaal 2 km. In het persleidingstelsel heersen anaërobe condities waardoor de fractie langzaam afbreekbaar CZV via hydrolyse kan worden omgezet in lagere vetzuren.

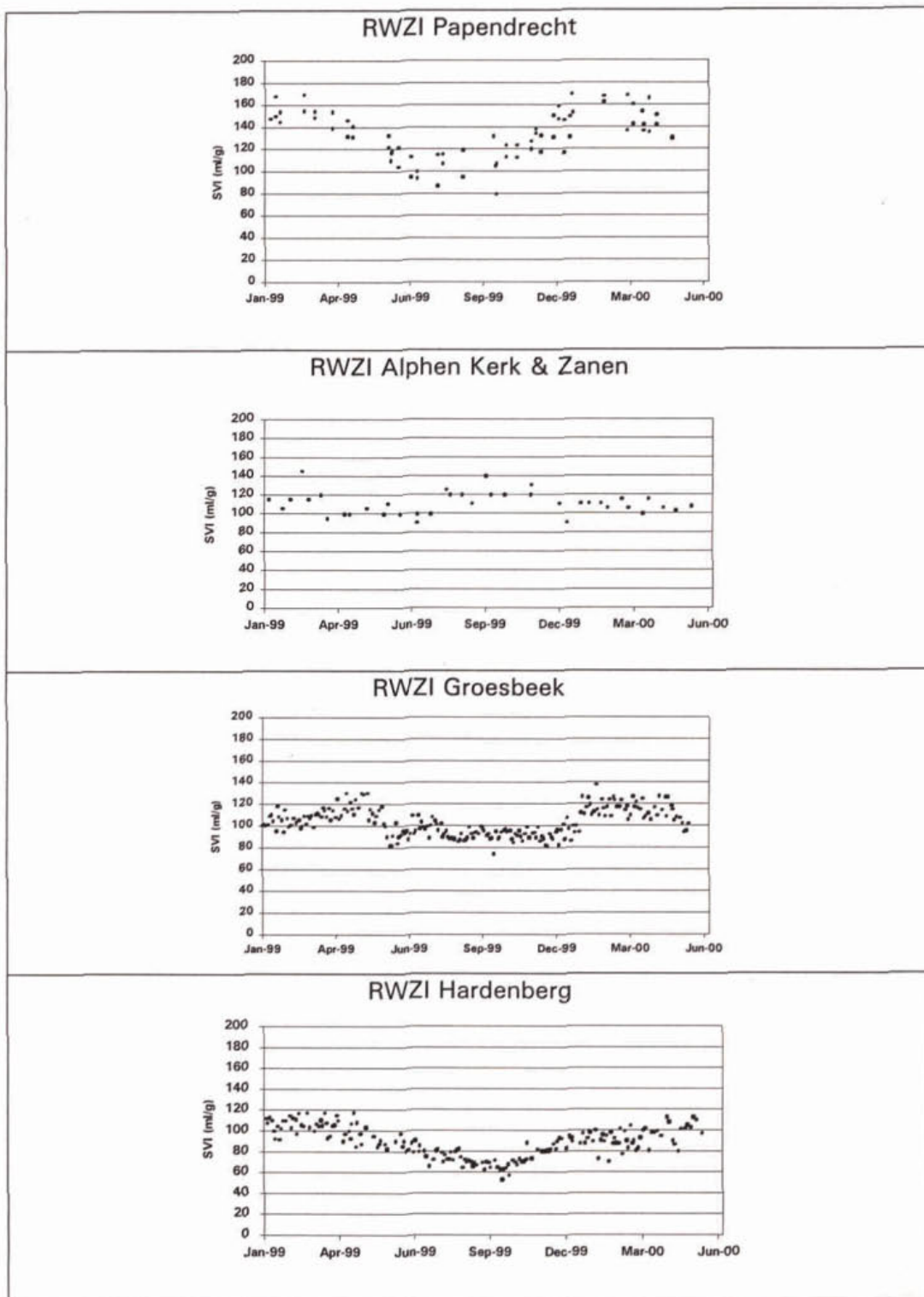
5.3 SVI-verloop gedurende de onderzoeksperiode

In figuur 5 is het SVI-verloop van de betreffende rwzi's gedurende de onderzoeksperiode weergegeven. De resultaten van de tellingen met behulp van de FISH-analyses (zie figuur 1) zijn weergegeven in figuur 6.

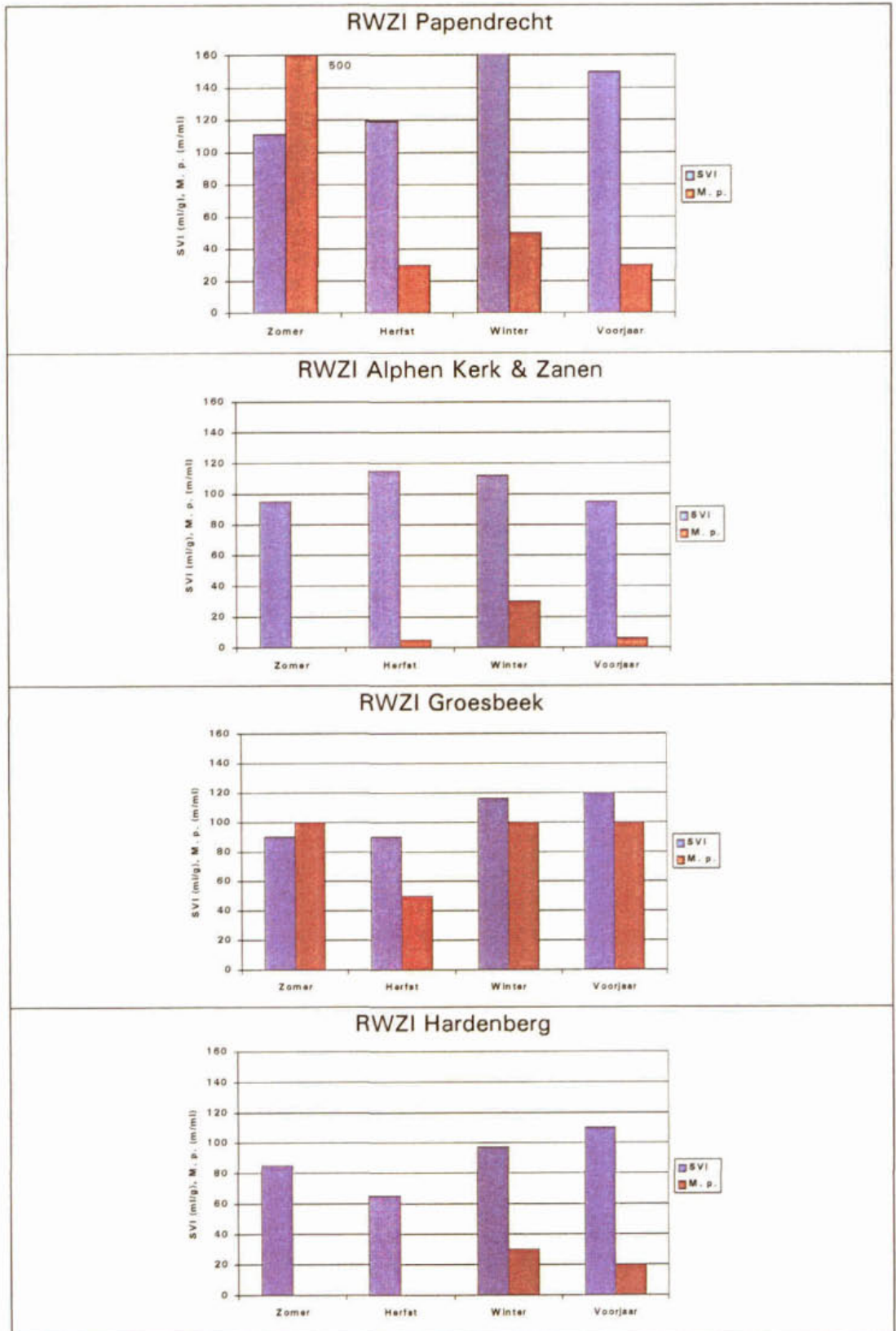
De hoogste SVI gedurende de onderzoeksperiode is bepaald voor de rwzi Papendrecht (170 ml/g). De maximale SVI die op de rwzi Alphen Kerk & Zanen en Groesbeek is bereikt is vergelijkbaar en bedraagt circa 140 ml/g, terwijl de maximale SVI van de rwzi Hardenberg gedurende deze periode steeds < 120 ml/g is.

Uit figuur 5 blijkt voor drie rwzi's een seizoensritme ten aanzien van het verloop van de SVI. De SVI van de rwzi Alphen Kerk & Zanen is gedurende de onderzoeksperiode vrij constant. Voor de andere drie rwzi's geldt dat de SVI gedurende de zomer daalt. De minimale waarde wordt bereikt in de herfst. Vervolgens stijgt de SVI en bereikt zijn maximale waarde in de eerste helft van het opvolgende jaar. In het slib van de rwzi Papendrecht en de rwzi Groesbeek zijn gedurende het gehele jaar relatief veel draadvormende micro-organismen aanwezig. Voor de rwzi Hardenberg en de rwzi Alphen Kerk & Zanen geldt dat ten opzichte van de zomer/herfst het aantal draadvormende micro-organismen in de winter duidelijk toeneemt. Tijdens de zomer en de herfst werd er in het slib van deze twee rwzi's nauwelijks *Microthrix parvicella* aangetroffen.

Uit figuur 6 blijkt dat de hoeveelheid *Microthrix parvicella* in het slib gedurende het jaar redelijk parallel loopt met het verloop van de SVI. Bij een toename van de SVI neemt ook de hoeveelheid *Microthrix parvicella* toe en andersom. Er blijkt een relatie aanwezig te zijn tussen de hoeveelheid *Microthrix parvicella* en de waarde voor de SVI; deze relatie is echter niet eenduidig. Naast de hoeveelheid *Microthrix parvicella* speelt ook de morfologie een belangrijke rol.



Figuur 5: Het SVI-verloop van de betreffende rwzi's gedurende de onderzoeksperiode



Figuur 6: Het SVI-verloop (ml/g) en de *Microthrix parvicella* telling (m/ml) gedurende de meetsessies

Knoop en Kunst (1998) hebben vastgesteld dat gedurende de zomer de lange draden (tot 500 μm) van *Microthrix parvicella* uit het slib verdwijnen. Tijdens de zomerperiode bleek de lengte van de draden van *Microthrix parvicella* te variëren tussen 30 en 80 μm .

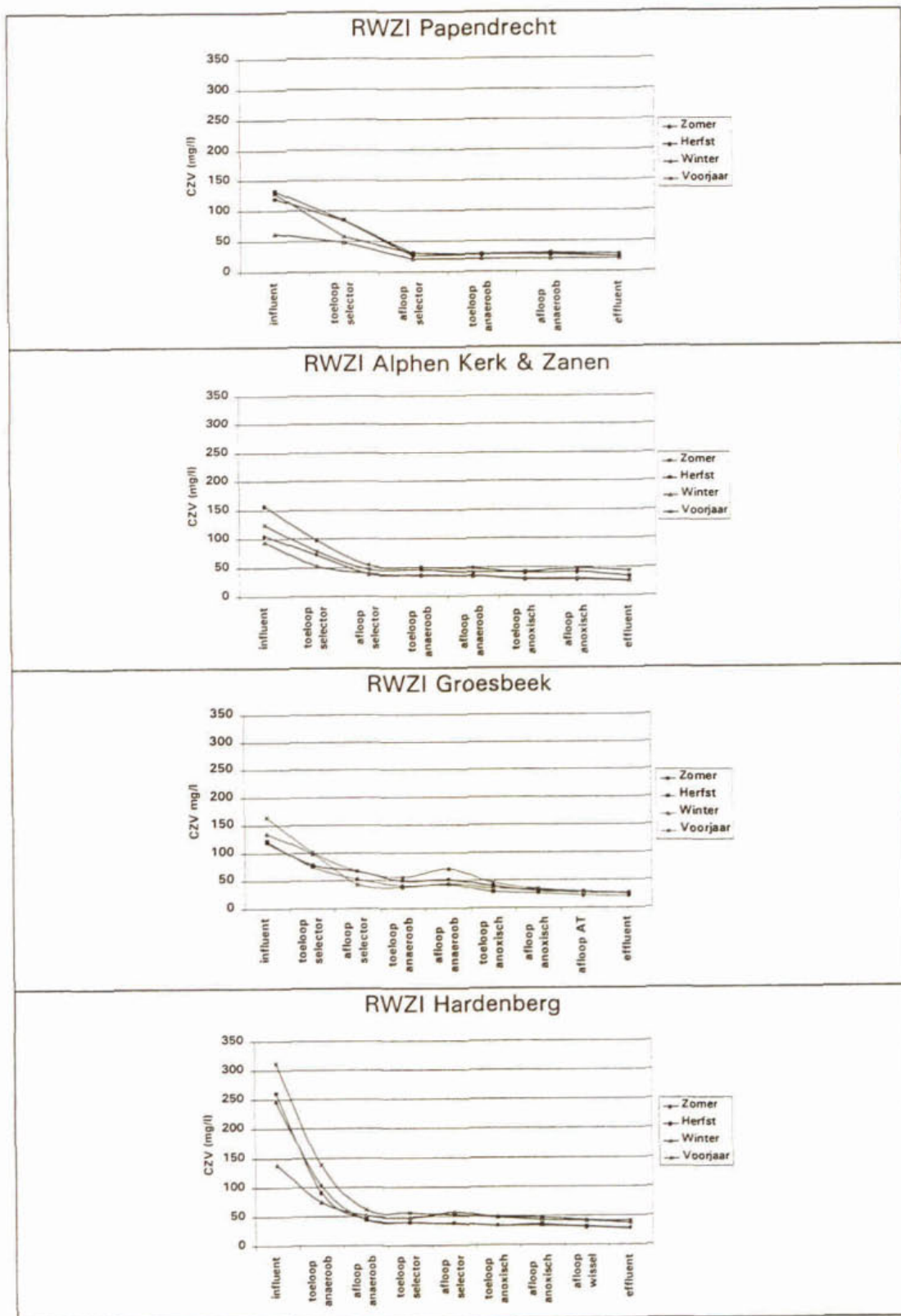
Tijdens de herfst wordt in de betreffende rwzi's steeds de minimale hoeveelheid *Microthrix parvicella* geregistreerd. Voor de rwzi Papendrecht is de grootste hoeveelheid *Microthrix parvicella* bepaald (500 m/ml in de zomer). Uitgaande van een diameter voor *Microthrix parvicella* van 1 μm betekent dit circa 1% van de droge stof. Palm et. al. (1980) constateerden dat licht slib (SVI > 150 ml/g) ontstaat indien het volume van de verantwoordelijke draadvormers circa 1 % van het volume van de slibvlok bedraagt. De invloed van de morfologie is niet genoemd.

De met de HSA-methode berekende benodigde anoxische slibfracties van de geselecteerde rwzi's bedragen 35 - 40%. Gezien de actuele slibbelastingen van de rwzi's zijn dit de fracties die in de praktijk daadwerkelijk aanwezig zijn. Het verschil in slibbezineigenschappen tussen de rwzi's kan dus niet worden verklaard door een verschil in de anoxische slibfractie, omdat die in de betreffende rwzi's gelijk is. De anoxische slibfractie is voor alle rwzi voldoende laag. Pas bij een anoxische slibfractie > 60% is de kans op vorming van licht slib groter (Casey 1995 - 2000).

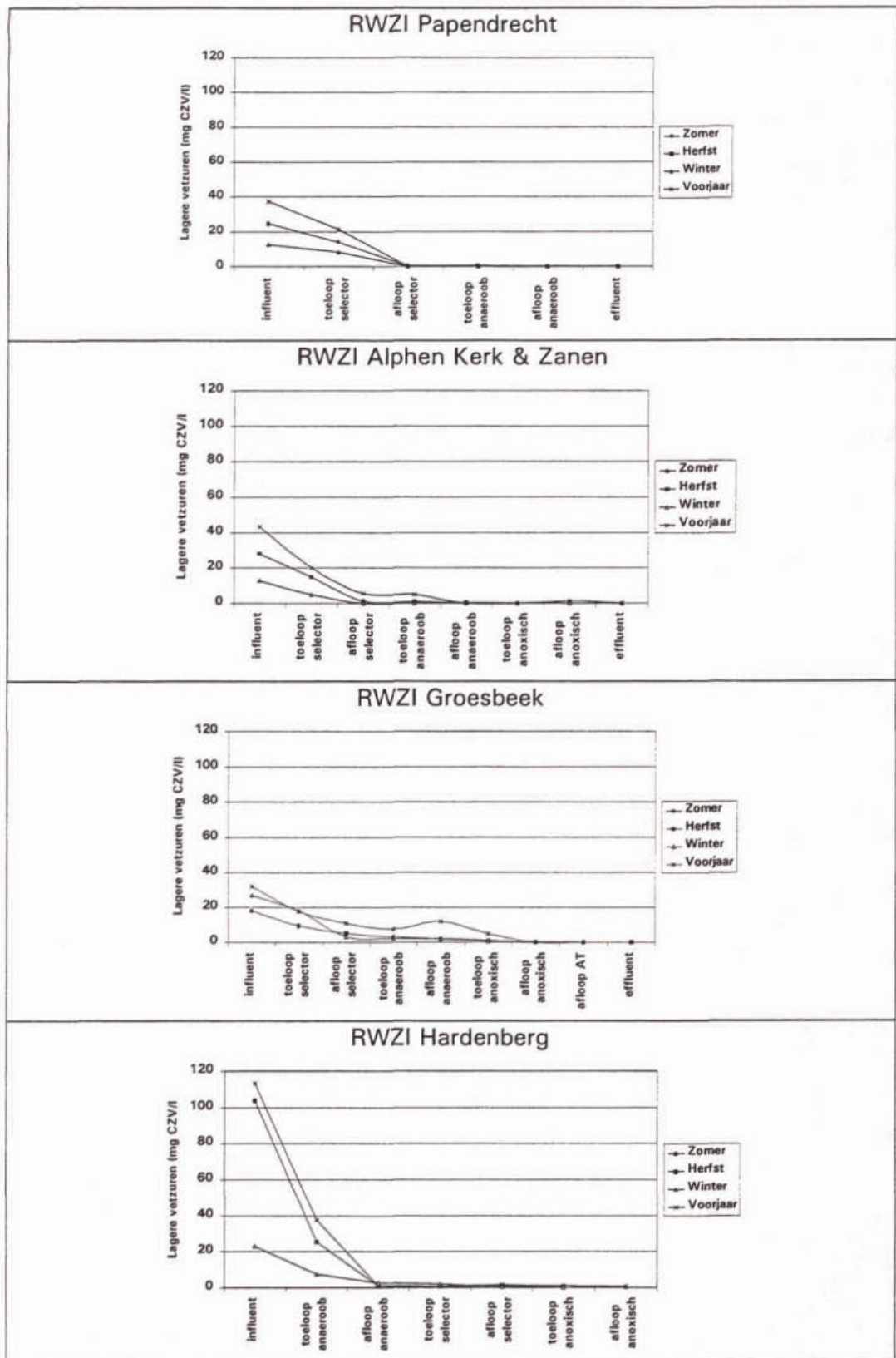
5.4 Omzetting van verschillende componenten in de procesreactoren

5.4.1 Opgelost CZV, lagere vetzuren en PHB

In figuur 7 is het concentratieverloop van het opgelost CZV in de procesreactoren van de verschillende rwzi's weergegeven. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de concentraties in de influentstromen van de verschillende procesreactoren steeds op basis van massabalansen zijn berekend. Uit figuur 7 blijkt dat voor het opgelost CZV in het eerste compartiment van de betreffende rwzi's reeds de effluentkwaliteit vrijwel wordt benaderd. Het verloop van de BZV-concentratie is vergelijkbaar met die van het opgelost CZV (zie bijlage 1). Ook hier is de concentratie opgelost BZV na het eerste compartiment nagenoeg gelijk aan de effluentkwaliteit. De berekende vlokbelading in het eerste compartiment varieerde van 50 tot 125 g CZV/kg d.s.h. De biosorptie in het eerste compartiment bedroeg circa 80 % voor de rwzi Groesbeek ("anaërobe" selector) en de rwzi Hardenberg (anaërobe reactor). Voor de rwzi Papendrecht en de rwzi Alphen Kerk & Zanen (beide "anaërobe selector") bedroeg de biosorptie in het eerste compartiment circa 50% of meer. In figuur 8 is het concentratieverloop van de lagere vetzuren in de navolgende procesreactoren van de betreffende rwzi's weergegeven.



Figuur 7: Verloop van de concentratie opgelost CZV ($0,45 \mu\text{m}$) in de verschillende procesreactoren van de betreffende rwzi's



Figuur 8: Verloop van de concentratie lagere vetzuren (C₂ – C₅) in de verschillende procesreactoren van de betreffende rwzi's

Uit figuur 8 blijkt dat vrijwel alle lagere vetzuren worden opgenomen in het eerste compartiment van de rwzi. Dit betekent dat de lagere vetzuren in het influent niet beschikbaar zijn voor denitrificerende en andere bacteriën in de navolgende compartimenten. Denitrificatie zal in dat geval alleen plaatsvinden als hiervoor door de bacteriën opgeslagen CZV (denitrificerende fosfaat-accumulerende micro-organismen; DPB's) of langzaam afbreekbaar CZV kan worden benut. In figuur 9 is het verloop van de PHB-concentratie in de verschillende procesreactoren weergegeven. De PHB-concentraties in de afloop van de aërobe reactoren zijn gegeven in tabel 8.

Tabel 8: PHB-concentraties in de afloop van de aërobe reactoren van de verschillende rwzi's

| Rwzi | PHB-concentratie in afloop aërobe reactor | | | | Eenheid |
|----------------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | |
| Papendrecht | 0,32-0,38 | 0,21-0,32 | 0,25-0,28 | 0,31-0,34 | % ds. |
| Alphen Kerk en Zanen | 0,27-0,30 | 0,28-0,30 | 0,28-0,33 | 0,21-0,23 | % ds. |
| Groesbeek | 0,32-0,36 | 0,20-0,22 | 0,36-0,36 | 0,21-0,24 | % ds. |
| Hardenberg | 0,19-0,23 | 0,21-0,23 | 0,31-0,35 | 0,21-0,23 | % ds. |

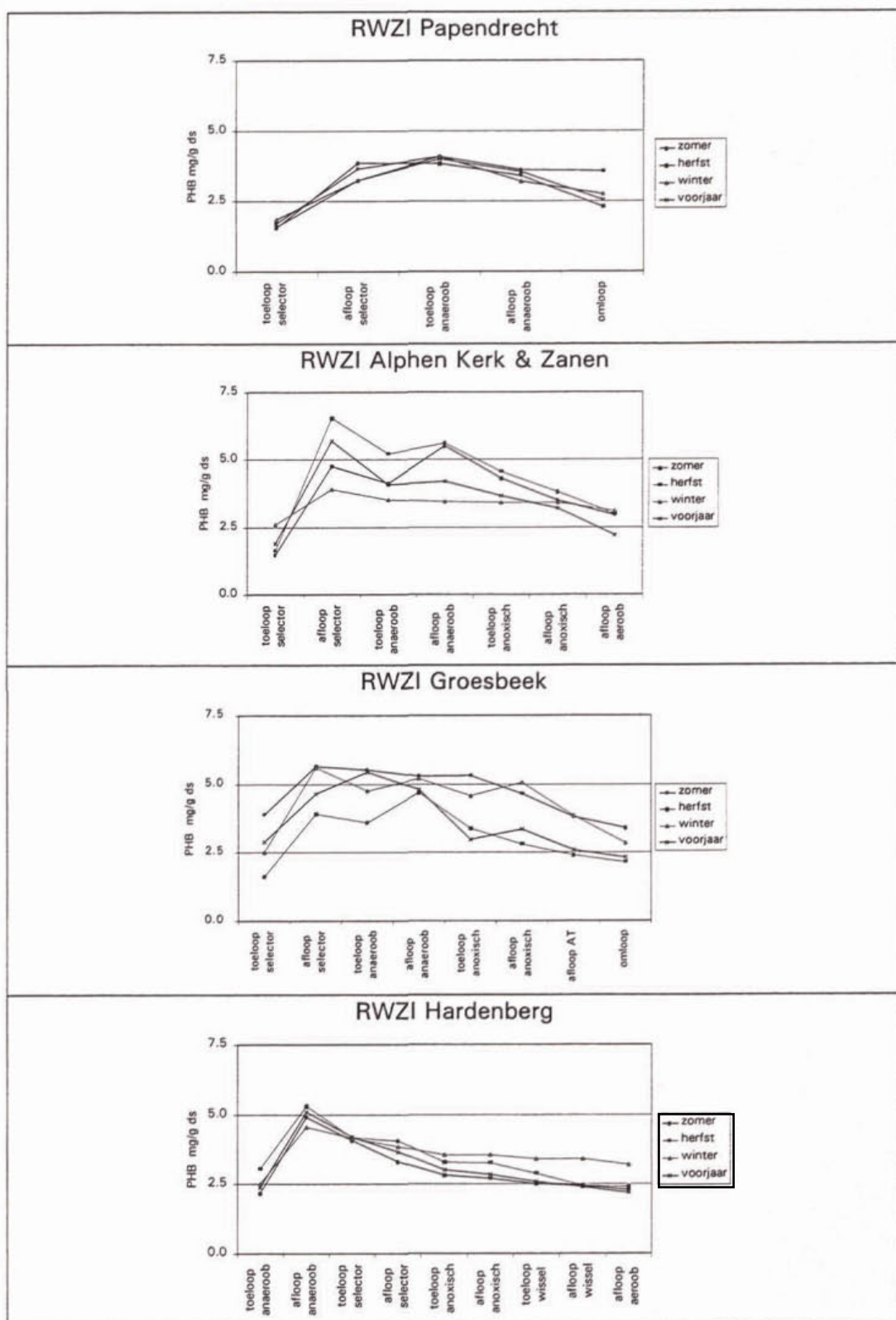
Uit tabel 8 blijkt dat het PHB-niveau in alle onderzochte rwzi's in de afloop van de aërobe reactoren vergelijkbaar is. De gemeten waarden voor de PHB-concentraties zijn vergelijkbaar met waarden uit de literatuur; voor slibmonsters uit een proefinstallatie met vergaande P- en N-verwijdering bedroeg na 24 uur intensief beluchten de PHB-concentratie 0,2 - 0,4% - d.s. (Helmer 1994). De gevonden PHB-concentraties in de afloop van de beluchtingsreactor komen dus overeen met dit basisniveau. Op basis van het te bereiken basisniveau lijkt het retourslib van alle rwzi's volledig te zijn geregenereerd. Het regenereren van slib zal plaatsvinden indien het slib voldoende wordt gemineraliseerd. In de praktijk betekent dit een hoger zuurstofgehalte in de oxische reactor in combinatie met een voldoende lange sibleeftijd.

Uit de resultaten kan geen seizoensafhankelijkheid van de PHB-concentratie worden vastgesteld. In tabel 9 staan de gemiddelde PHB-concentraties en het gemeten zuurstofgehalte in de aërobe reactor van de betreffende rwzi's vermeld.

Tabel 9: De gemiddelde PHB-concentraties en het zuurstofsetpoint in de aërobe reactor van de betreffende rwzi's

| | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|------------------|-------------|---------------------|-----------|------------|----------------------|
| PHB | 0,30 | 0,28 | 0,28 | 0,25 | % ds. |
| PHB | 0,46 | 0,38 | 0,37 | 0,34 | % o.ds |
| Zuurstofsetpoint | 1,5 | 0,5 - 1 | 1 - 1,4 | 1,8 | mg O ₂ /l |

Uit de resultaten van tabel 8 en tabel 9 blijkt dat door het instellen van een hoog zuurstofgehalte (> 1,5 mg/l) in de aërobe reactor, zoals op de rwzi Hardenberg geen significante verlaging van het PHB-niveau in het slib optreedt.



Figuur 9: Verloop van de PHB-concentratie in de verschillende procesreactoren van de betreffende rwzi's

Samenvattend blijkt dat zowel het concentratieprofiel van het opgelost CZV als de PHB-concentraties in de betreffende rwzi's (tabel 8 en tabel 9) laten zien dat het selectiemechanisme in de eerste compartimenten van alle rwzi's goed functioneert en in overeenstemming is met de ontwerpparameters voor selectoren van Wanner (1994) en de STOWA (1994). De biosorptiecapaciteit blijken voldoende en het retourslib is voldoende geregenereerd.

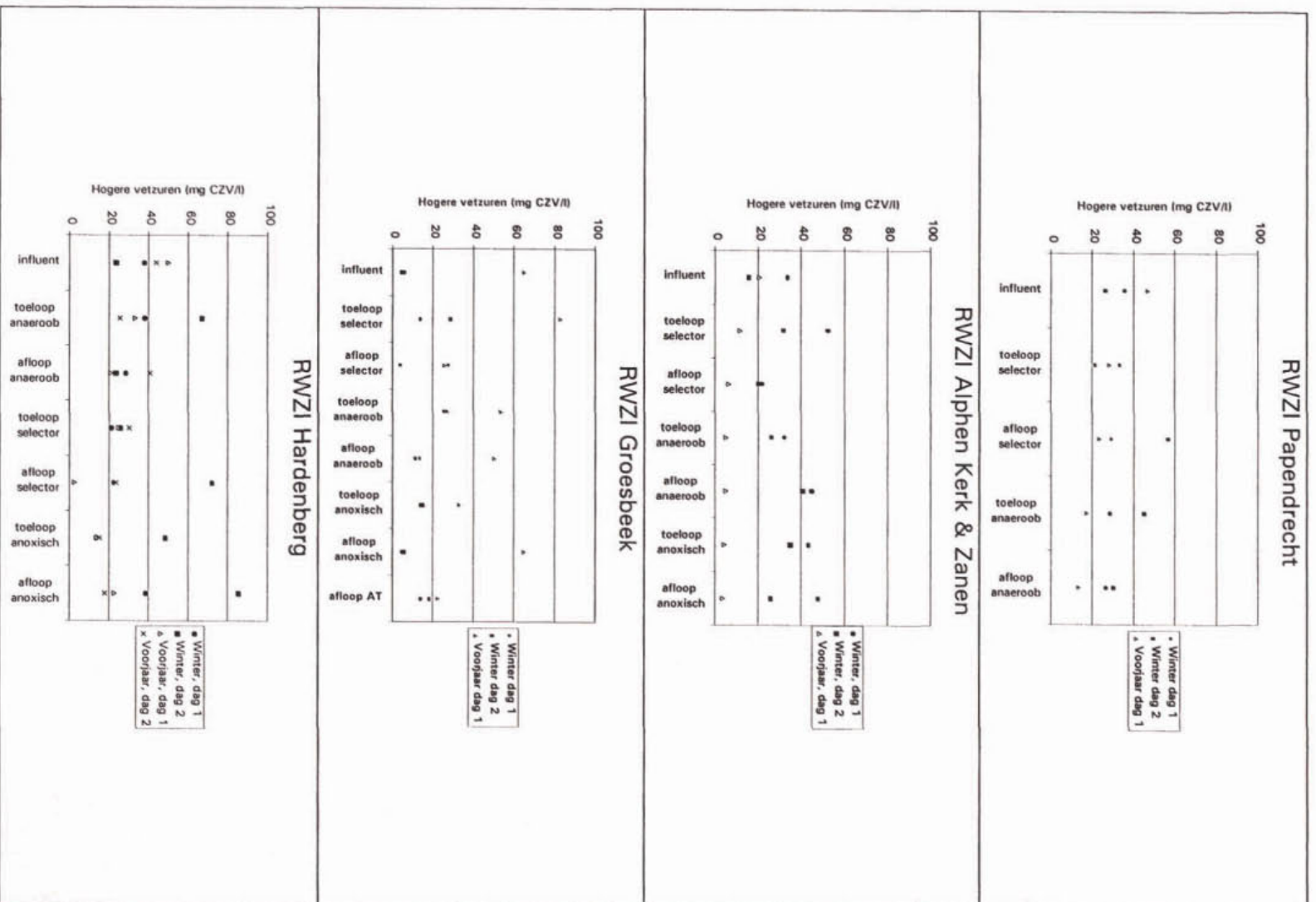
5.4.2 Hogere vetzuren

In figuur 10 is het concentratieverloop van de hogere vetzuren in de verschillende rwzi's weergegeven. De concentraties hogere vetzuren zijn van de ruwe monsters gemeten.

De variatie in de concentratie hogere vetzuren in het influent van de verschillende rwzi's is groot. Dit komt overeen met de metingen van Quéménuer en Marty (1994). Zij vonden een variatie van de concentratie hogere vetzuren in het influent van een rwzi in dezelfde orde van grootte.

Uit het concentratieverloop van hogere vetzuren in figuur 10 blijkt niet eenduidig dat er een netto-productie van hogere vetzuren plaatsvindt in de anaërobe reactoren van de betrokken rwzi's.

De concentratie hogere vetzuren in het slibwatermengsel in de afloop van de anoxische reactor (= toeloop anoxisch/aërobe of aërobe reactoren) varieert tussen 10 en 80 mg CZV/l. De concentraties zijn het laagst bij de rwzi Pappendrecht; voor de andere rwzi's zijn de concentraties vergelijkbaar. Bij alle rwzi's blijven hogere vetzuren beschikbaar in de toeloop naar de beluchtingsreactor en is uit de resultaten geen verschil in de concentraties tijdens winter- en zomerperiode vast te stellen.



Figuur 10: Concentratieverloop hogere vetzuren (C₁₆ – C₁₈)

5.4.3 Ammonium, nitraat en fosfaat

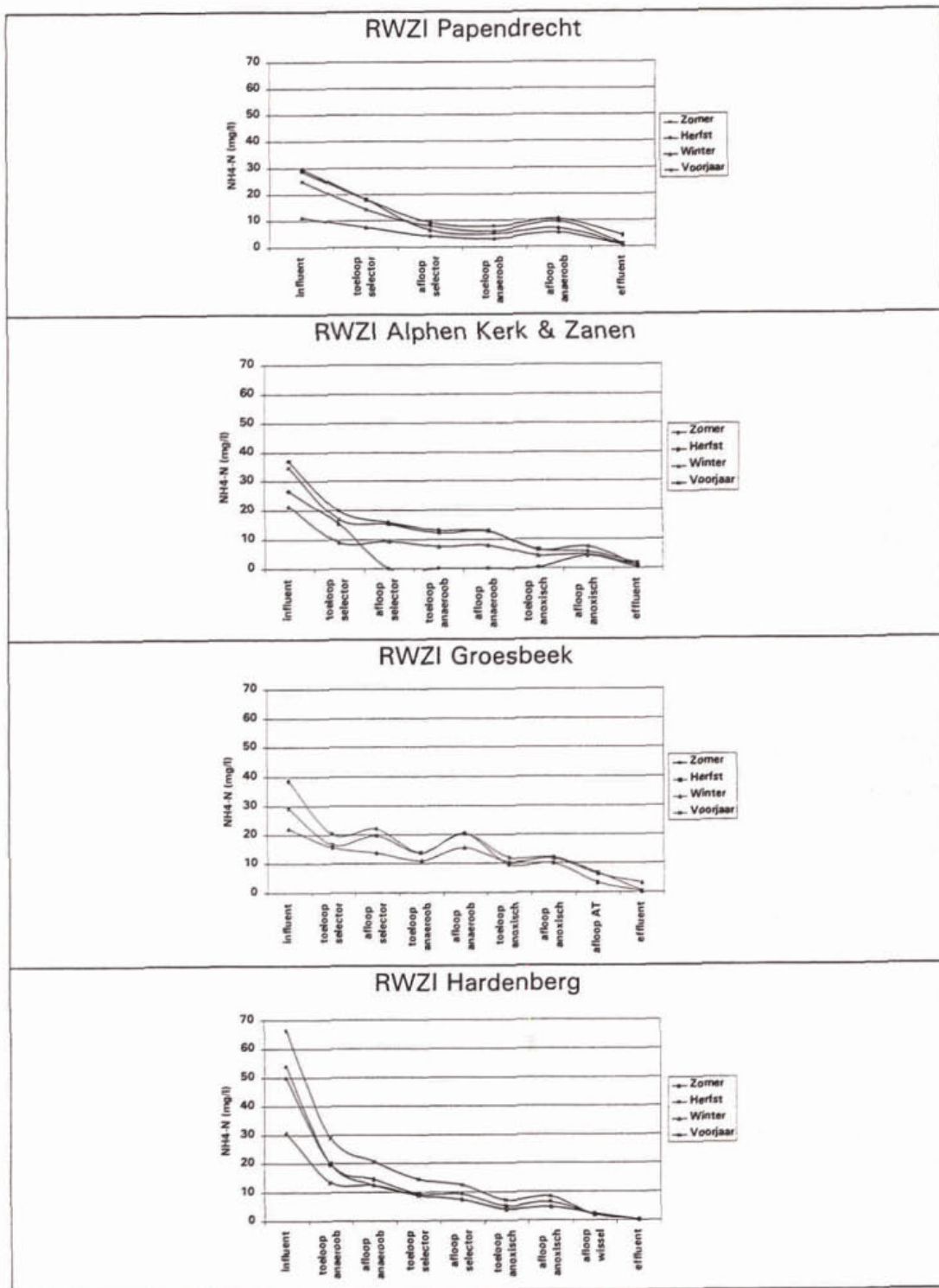
In figuur 11, 12 en 13 zijn de concentratieverlopen van ammonium, nitraat en fosfaat van de rwzi's weergegeven.

Uit figuur 11 blijkt dat in de rwzi's gedurende het gehele jaar een volledige nitrificatie optreedt. De ammoniumconcentratie in het effluent van de rwzi's Papendrecht en Groesbeek ($< 2,5$ mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$) is wel circa 1,5 mg/l hoger in vergelijking tot de concentratie in het effluent van de rwzi's Alphen kerk & Zanen en Hardenberg (< 1 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$).

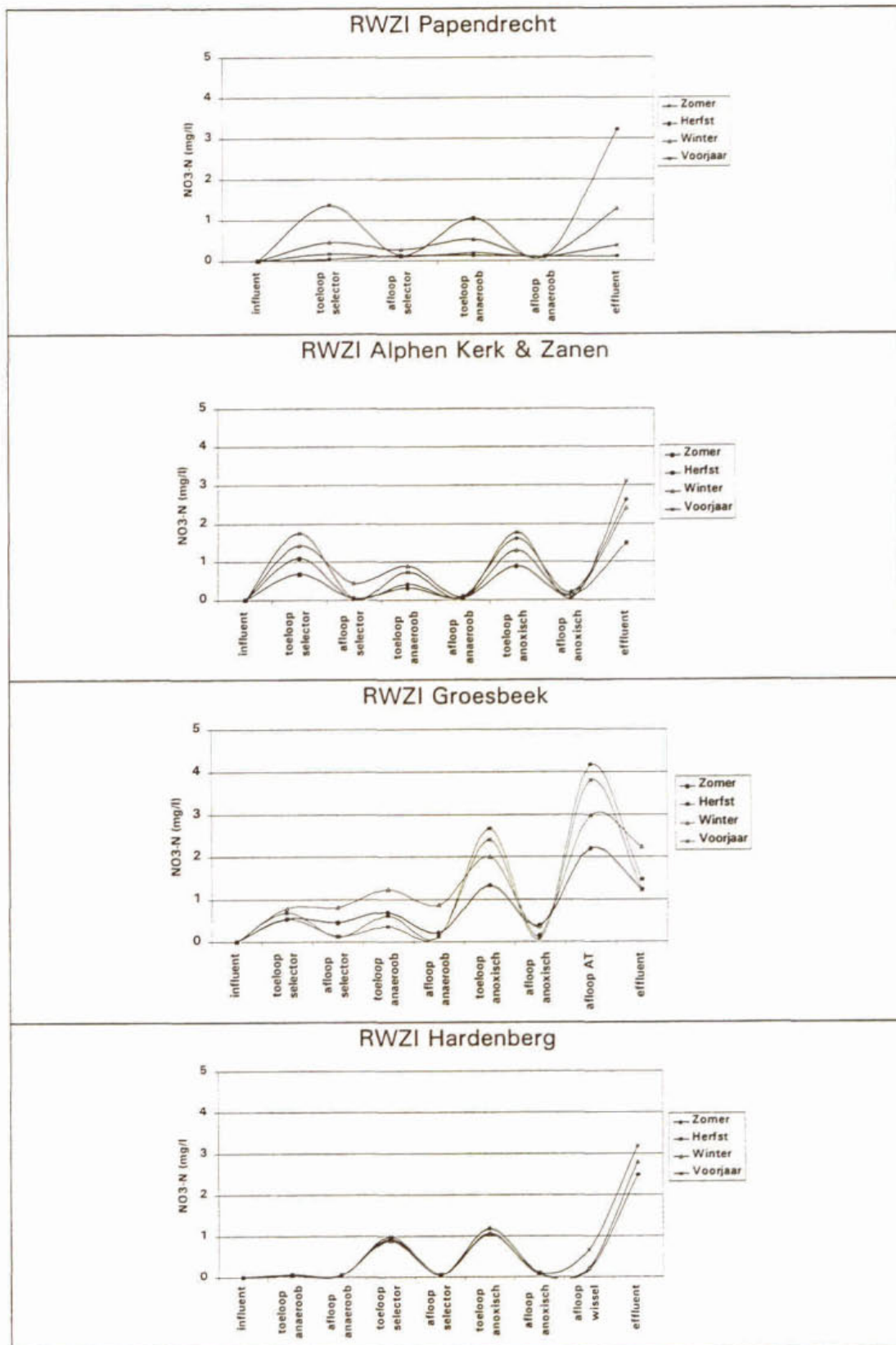
Uit figuur 12 blijkt dat het ingaande nitraat in de niet-aërobe procesreactoren vrijwel volledig wordt gedenitrificeerd. Een uitzondering hierop lijkt de anaërobe reactor van de rwzi Groesbeek waar gedurende de meetsessie in de winter een nitraatconcentratie van circa 1 mg/l is gemeten, terwijl de concentratie in andere jaargetijden en in de andere rwzi's 0 – 0,1 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$ bedraagt.

Voor de omzetting van ammonium en nitraat in de laatste reactor van de verschillende rwzi's geldt dat alleen in het aërobe omloopsysteem van de rwzi Hardenberg nitrificatie plaatsvindt en het geproduceerde nitraat niet meer wordt gedenitrificeerd. In de laatste compartimenten van de andere rwzi's vindt naast nitrificatie ook een simultane denitrificatie plaats.

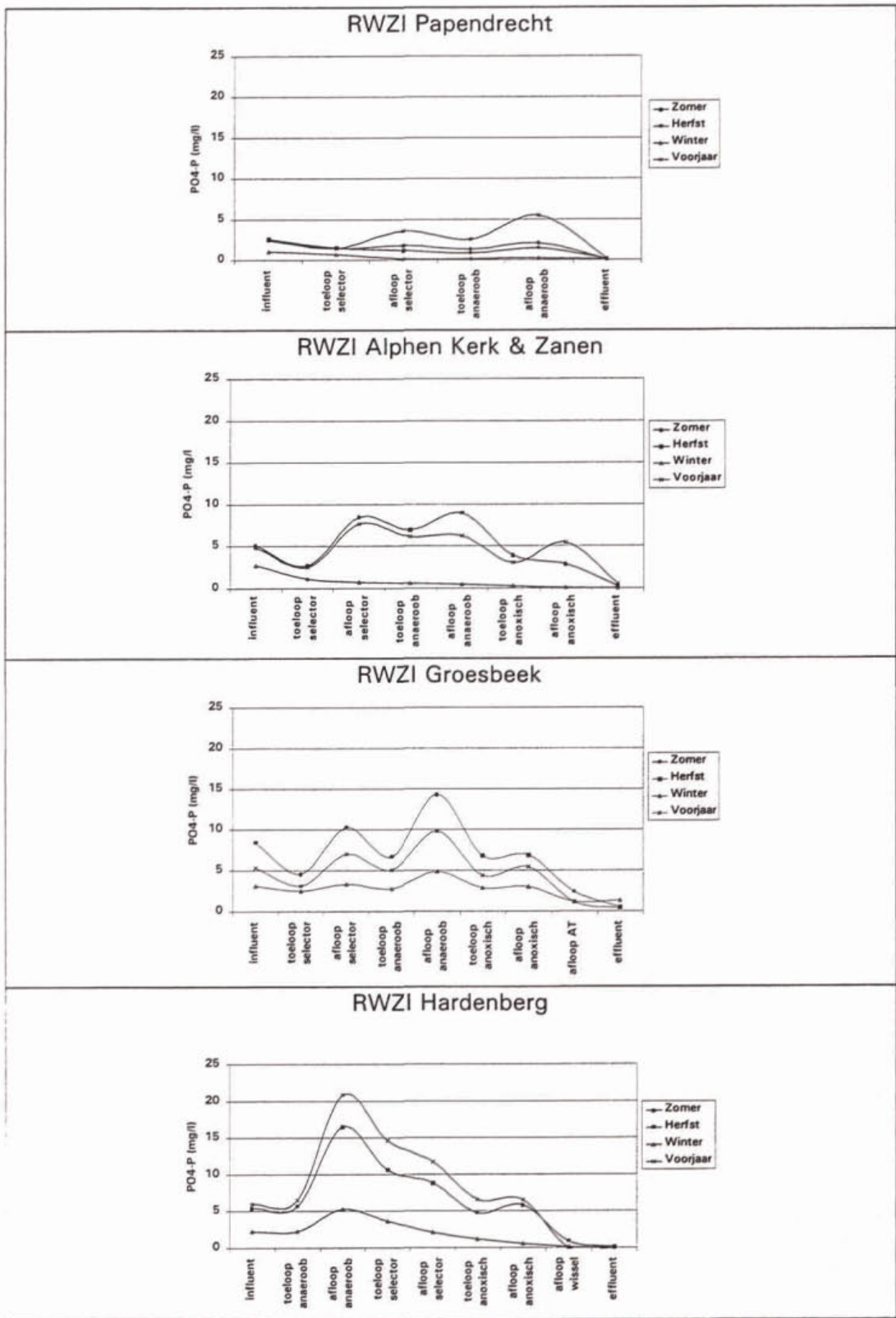
Uit figuur 13 blijkt dat fosfaatafgifte plaatsvindt in de anaërobe (anoxische) reactoren en een fosfaatopname in de aërobe reactoren van de betreffende rwzi's.



Figuur 11: Het ammoniumverloop in de betreffende rwzi's



Figuur 12: Het nitraatverloop in de betreffende rwzi's



Figuur 13: Het fosfaatverloop in de betreffende rwzi's

5.4.4 Omzettingssnelheden

In tabel 10 en tabel 11 zijn de gemiddelde denitrificatie- en P-afgiftesnelheden in de eerste compartimenten van de rwzi's weergegeven. De omzettingssnelheden van respectievelijk CZV-opgelost, BZV en de lagere vetzuren zijn gegeven in tabel 12. Met behulp van de gegevens in tabel 10 tot en met tabel 12 is bepaald hoeveel CZV wordt verbruikt voor de denitrificatie en de P-afgifte. Hierbij is voor de denitrificatie uitgegaan van een CZV-behoefte van 4,65 mg CZV_{acetaat} per mg NO₃-N verwijderd (Narkis et. al., 1979 en Wolfson, 1992).

Tabel 10: Gemiddelde denitrificatiesnelheid (mg NO₃-N/g d.s.h) in de eerste compartimenten van de verschillende rwzi's

| Procesreactor | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|---------------------------|-------------|---------------------|-----------|------------|--------------------------------|
| Anaërobe selector | - 0,1 | - 0,7 | - 0,3 | | mg NO ₃ -N/g d.s. h |
| Anaërobe reactor | - 0,3 | - 0,2 | - 0,1 | 0,0 | mg NO ₃ -N/g d.s. h |
| Anoxische selector | | | | - 0,5 | mg NO ₃ -N/g d.s. h |
| Voordenitrificatiereactor | | - 0,5 | - 1,0 | - 0,2 | mg NO ₃ -N/g d.s. h |
| Wisselreactor | | | | - 0,2 | mg NO ₃ -N/g d.s. h |

- = afname nitraatconcentratie (denitrificatie)

Tabel 11: Gemiddelde fosfaatafgifte- en fosfaatopnamesnelheid (mg PO₄-P/g d.s. h) in de eerste compartimenten van de verschillende rwzi's.

| Procesreactor | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|---------------------------|-------------|---------------------|-----------|------------|--------------------------------|
| Anaërobe selector | - 0,1 | 2,6 | 2,4 | | mg PO ₄ -P/g d.s. h |
| Anaërobe reactor | 0,1 | 0,3 | 2,4 | 2,2 | mg PO ₄ -P/g d.s. h |
| Anoxische selector | | | | - 1,3 | mg PO ₄ -P/g d.s. h |
| Voordenitrificatiereactor | | - 0,1 | 0,2 | 0,0 | mg PO ₄ -P/g d.s. h |
| Aërobe reactor | - 0,1 | - 0,4 | - 1,0 | - 0,4 | mg PO ₄ -P/g d.s. h |

positieve waarde = fosfaatafgifte, negatieve waarde = fosfaatopname

Uit tabel 10 blijkt dat alleen de anaërobe reactor van de rwzi Hardenberg als strikt anaëroob kan worden beschouwd. Er vindt hier geen denitrificatie plaats. Bij de andere rwzi's treedt wel denitrificatie in het eerste compartiment op. De berekende denitrificatiesnelheden in het eerste compartiment van de rwzi's komen overeen met denitrificatiesnelheden gemeten met langzaam afbreekbare organische verbindingen (0,5 – 1,2 mg NO₃-N/g ds. h) of een endogene denitrificatie (0,2 – 0,5 mg NO₃-N/g ds. h) (STOWA, 1993a). De gemeten denitrificatiesnelheden in het eerste compartiment zijn lager dan de verwachte denitrificatiesnelheden in aanwezigheid van snel afbreekbaar organische verbindingen (2 – 4 mg NO₃-N/g d.s. h) (STOWA, 1993a).

Uit figuur 12 blijkt dat de nitraatconcentratie in de afloop van met name de eerste reactoren steeds laag is, zodat door een nitraatlimitatie in de reactoren de maximale denitrificatiesnelheid niet kan worden bereikt. Door een verhoging van de betreffende recirculatiestromen kan de nitraataanvoer worden verhoogd waardoor waarschijnlijk ook een hogere denitrificatiesnelheid bereikt kan worden indien nog voldoende snel afbreekbaar CZV aanwezig is. In de navolgende compartimenten is geen snel afbreekbaar CZV meer aanwezig zodat de denitrificatiesnelheid ook zonder nitraatlimitatie lager zal zijn dan in aanwezigheid van snel afbreekbaar CZV.

Tabel 12: CZV-, BZV-verbruik en het verbruik van lagere vetzuren in de compartimenten van de rwzi's

| Procesreactor | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|----------------------------|-------------|---------------------|-----------|------------|-----------------|
| Anaërobe selector | | | | | |
| CZV | 29,6 | 20,0 | 23,0 | | mg CZV/g d.s. h |
| BZV | 17,1 | 9,0 | 17,3 | | mg BZV/g d.s. h |
| Lagere vetzuren | 9,5 | 10,4 | 4,4 | | mg CZV/g d.s. h |
| Anaërobe reactor | | | | | |
| CZV | 0,0 | 0,9 | 0,0 | 11,6 | mg CZV/g d.s. h |
| BZV | 0,0 | 0,4 | 0,0 | 7,0 | mg BZV/g d.s. h |
| Lagere vetzuren | 0,0 | 0 | 0,0 | 4,4 | mg CZV/g d.s. h |
| Anoxische selector | n.v.t | n.v.t | n.v.t | | |
| CZV | | | | 1,2 | mg CZV/g d.s. h |
| BZV | | | | 0,7 | mg BZV/g d.s. h |
| Lagere vetzuren | | | | 0,0 | mg CZV/g d.s. h |
| Voordenitrificatie reactor | | | | | |
| CZV | 0,0 | 0,0 | 3,2 | 0,0 | mg CZV/g d.s. h |
| BZV | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 0,0 | mg BZV/g d.s. h |
| Lagere Vetzuren | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 0,0 | mg CZV/g d.s. h |

Uit tabel 12 blijkt dat de omzetting van opgeloste organische componenten voornamelijk plaatsvindt in het eerste compartiment van de rwzi's. In de navolgende compartimenten zal daarom voornamelijk de hydrolyse van langzaam afbreekbaar en geadsorbeerd CZV de snelheid van de verschillende biologische processen bepalen.

In tabel 13 zijn de omzettingssnelheden van PHB in de verschillende compartimenten van de rwzi's gegeven.

Tabel 13: Gemiddelde omzettingssnelheid (mg PHB-CZV/g d.s. h) in de verschillende compartimenten van de verschillende rwzi's.

| | Papendrecht | Alphen, Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|----------------------------|-------------|----------------------|-----------|------------|-----------------|
| Anaërobe selector | 6,1 | 9,8 | 7,5 | | mg CZV/g d.s. h |
| Anaërobe reactor | -0,4 | 1,1 | 0,1 | 3,0 | mg CZV/g d.s. h |
| Anoxische selector | | | | -1,4 | mg CZV/g d.s. h |
| Voordenitrificatie reactor | | -0,5 | -0,7 | -0,4 | mg CZV/g d.s. h |
| Wisselreactor | | | | -0,3 | mg CZV/g d.s. h |

+ = PHB-vorming in de cel - = PHB verbruik in de cel

Uit tabel 13 blijkt dat alleen in het eerste anaërobe compartiment vorming van reservestoffen (PHB) optreedt. In de navolgende compartimenten worden de gevormde reservestoffen gebruikt. Uit figuur 9 en tabel 8 blijkt dat deze omzetting nagenoeg volledig is.

In tabel 14 is een overzicht gegeven van de hoeveelheid CZV in de vorm van acetaat in het eerste compartiment, die voor de denitrificatie wordt verbruikt en die voor de fosfaatafgifte ter beschikking staat. Hierbij is uitgegaan van een CZV-verbruik van 4,65 mg CZV_{acetaat} per mg NO₃-N verwijderd (Narkis et. al., 1979 en Wolfson, 1992).

Tabel 14: Verhouding verbruik lagere vetzuren/P-afgifte

| | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg | Eenheid |
|-------------------------------------------------------|-------------|---------------------|-----------|------------|-----------------|
| Berekend verbruik lagere vetzuren voor denitrificatie | 0,5 | 3,3 | 1,4 | 0,0 | mg CZV/g d.s. h |
| Berekend verbruik lagere vetzuren voor P-afgifte | 9,0 | 7,1 | 3,0 | 4,4 | mg CZV/g d.s. h |
| Verhouding verbruik lagere vetzuren/P-afgifte | -- *) | 2,7 | 1,3 | 2,0 | - |

*) In de rwzi Papendrecht vindt weinig tot geen P afgifte plaats. De gevonden verhouding is derhalve zeer hoog: , BZV/vetzuren 90.

Uit tabel 14 blijkt dat de verhouding verbruik lagere vetzuren/P-afgifte varieert van 1,3 tot 2,7. Smolders (1995) bepaalde dat de acetaatbehoefte voor de P-afgifte 2,0 mg CZV/mg P bedraagt. Deze acetaatbehoefte is vergelijkbaar met de behoefte aan lagere vetzuren per mg afgegeven fosfaat in het eerste compartiment van de rwzi's Alphen Kerk & Zanen, Groesbeek en Hardenberg.

6. DISCUSSIE EN EVALUATIE

6.1 Onderzoeksvragen

Op basis van de werkhypothese is getracht door middel van praktijkonderzoek een antwoord te vinden op de volgende specifieke onderzoeksvragen:

1. Is er een relatie aan te tonen tussen de slibbezinkeigenschappen en de onbeluchte slibfractie, de vereiste contacttijd, de mate van compartimentering van de anaërobe reactor en anoxische reactor of overige condities die belangrijk zijn voor de groei van *Microthrix parvicella*?
2. Hoe worden de verschillende CZV-fracties (met name de fracties waarvan bekend is dat ze licht slib veroorzaken) opgenomen, opgeslagen en verbruikt in de anaërobe - en anoxische reactoren, en met welke snelheden vindt dit plaats?
3. Wat is de rol van de ammoniumconcentratie in relatie tot de groei van *Microthrix parvicella* in de aërobe reactor?

In het navolgende worden de verkregen resultaten geëvalueerd en wordt getracht een antwoord te formuleren ten aanzien van de gestelde onderzoeksvragen.

6.2 De mate van compartimentering van de anaërobe en anoxische reactor in relatie tot de onbeluchte slibfractie en de vereiste contacttijd.

Het berekende benodigde percentage anoxische ruimte lag voor de verschillende rwzi's in dezelfde orde van grootte en bedroeg 35-45%. Dit is minder dan de maximale anoxische fractie van 60% in de aërobe hoofdreactor waarbij volgens Casey (1995-2000) de kans op licht slib het grootst is. De rwzi Papendrecht was de enige rwzi die niet was voorzien van een aparte anoxische reactor.

Bij de andere rwzi's bedroeg het percentage separate anoxische ruimte circa 20% van het totaal vereiste volume voor N-verwijdering (zie tabel 6). De hogere SVI's (tot 170 ml/g) op de rwzi Papendrecht zijn in overeenstemming met de werkhypothese die stelt dat een aparte anoxische reactor nodig is. De lage SVI's gemeten op de andere rwzi's geven aan dat een separate anoxische reactor van 20% van de benodigde anoxische en aërobe ruimte in combinatie met een anaërobe reactor voldoende is om slib met goede bezinkeigenschappen te handhaven (< 150 ml/g). Bij dit percentage is de anoxische slibfractie in de aërobe hoofdreactor altijd kleiner dan 30%. Voor een verdere verbetering van de slibbezinkingseigenschappen (SVI < 120 ml/g) lijkt een verdere opsplitsing van de aërobe hoofdreactor, noodzakelijk. Hierbij dient de aërobe slibfractie in de laatste aërobe reactor groter dan 80 % te zijn.

Bij de in dit onderzoek geselecteerde rwzi's varieerden de totale contacttijden in de anaërobe reactoren van 60 tot 120 minuten (zie tabel 6). Deze contacttijden bleken ruim voldoende om te komen tot een biologische P-verwijdering. De contacttijden zijn in overeenstemming met de aanbevolen contacttijden voor de anaërobe reactor met geïntegreerde selector bij biologische fosfaatverwijdering volgens STOWA (1994).

6.3 Opname, opslag en verbruik van de verschillende CZV-fracties in de anaërobe en anoxische reactoren

Bij de behandeling van dit onderwerp is het van belang wat er gebeurt met de CZV-fracties waarvan bekend is, of waarvan wordt verondersteld, dat deze licht slib veroorzaken.

Bij alle rwzi's is geconstateerd dat de concentraties opgelost CZV en opgelost BZV in de toeloop van de aërobe reactor gelijk zijn aan de effluentkwaliteit. Er vindt geen doorslag plaats van opgelost CZV naar de aërobe reactor.

In tabel 15 zijn de processen die zich in de eerste compartimenten van de verschillende rwzi's afspelen opgenomen.

Tabel 15: Overzicht van processen die zich in de eerste compartimenten van de verschillende rwzi's afspelen

| Proces | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg |
|----------------------------------|-------------|---------------------|-----------|------------|
| <u>Anaerobe selector</u> | | | | |
| Opname lagere vetzuren | + | + | + | |
| Hydrolyse/opname hogere vetzuren | - | + | + | |
| Opslag reservestoffen | + | + | + | |
| P-afgifte | - | + | + | |
| Denitrificatie | + | + | + | |
| <u>Anaerobe reactor</u> | | | | |
| Opname lagere vetzuren | - | - | +/- | + |
| Hydrolyse/opname hogere vetzuren | +/- | - | + | + |
| Opslag reservestoffen | - | + | - | + |
| P-afgifte | +/- | + | + | + |
| Denitrificatie | + | + | + | - |
| <u>Anoxische selector</u> | | | | |
| Opname lagere vetzuren | | | | - |
| Hydrolyse/opname hogere vetzuren | | | | + |
| Opslag reservestoffen | | | | - |
| P-afgifte | | | | - |
| P-opname | | | | + |
| Denitrificatie | | | | + |
| <u>Anoxische reactor</u> | | | | |
| Opname lagere vetzuren | | - | - | - |
| Hydrolyse/opname hogere vetzuren | | +/- | +/- | - |
| Opslag reservestoffen | | - | - | - |
| Verbruik reservestoffen | | + | + | + |
| P-afgifte | | +/- | - | - |
| P-opname | | +/- | - | - |
| Denitrificatie | | + | + | + |

+ : proces vindt plaats, - : proces vindt niet plaats, +/- : onbekend

Uit tabel 15 en figuur 8 kan worden afgeleid dat in het eerste compartiment van de betreffende rwzi's de lagere vetzuren volledig worden opgenomen. Deze vetzuren worden gebruikt voor denitrificatie en P-afgifte (rwzi Groesbeek, Alphen Kerk en Zanen), denitrificatie (Papendrecht) en P-afgifte (Hardenberg). De anoxische selector (rwzi Hardenberg) speelt geen rol meer bij de opname van opgelost CZV (o.a. lagere vetzuren). Met uitzondering van de rwzi Hardenberg blijkt dat bij de andere rwzi's de anaërobe reactor in de praktijk een gecombineerde anoxische-anaërobe reactor is waarin naast denitrificatie en P-afgifte (behalve rwzi Papendrecht), hydrolyse van niet-opgelost CZV optreedt. De strikte anaërobe condities in de anaërobe reactor van de rwzi Hardenberg zou de biologische P-verwijdering en de vorming van vlok-vormende PAO's moeten stimuleren. Het fosfaatgehalte van het slib in de rwzi Hardenberg is echter niet structureel hoger dan bij de andere rwzi's. De betere slibbezineigenschappen op de rwzi Hardenberg kunnen hiermee niet worden verklaard. De relatief lage P-gehalten in het slib bij de rwzi Hardenberg zijn te wijten aan de BZV/P-verhouding, die meer dan 30 bedraagt in het influent. De P-vracht is dermate laag ten opzichte van de spuislibproductie dat het potentieel maximaal niveau van 4-5 % P niet gehaald kan worden.

De P-afgiftesnelheid in het eerste compartiment van de verschillende rwzi's varieert van 2 tot 3 mg P/g d.s. h. Een uitzondering is de rwzi Papendrecht waar zowel in de selector als in de anaërobe reactor weinig tot geen P-afgifte is geconstateerd. Een verklaring hiervoor is tweeledig:

- lage concentratie lagere vetzuren in het influent (< 30 mg/l);
- de zuurstofinslag door de inzet van vijzels voor het terugvoeren van re-tourslib, waardoor snel afbreekbaar CZV met zuurstof wordt geoxydeerd en niet meer voor de P-afgifte beschikbaar is.

De gemeten denitrificatiesnelheden in de eerste compartimenten van de anaërobe reactoren van de verschillende rwzi's variëren van 0,2 tot 1 mg NO₃-N/g d.s. h. Dit komt overeen met een denitrificatiesnelheid in aanwezigheid van langzaam afbreekbaar CZV. Hieruit zou kunnen worden afgeleid dat in bovengenoemde compartimenten de lagere vetzuren niet voor de denitrificatie worden gebruikt. Het is echter waarschijnlijker dat nitraatlimitatie de denitrificatiesnelheid reduceert. Bij de volgende compartimenten zijn er geen lagere vetzuren meer aanwezig. In dat geval wordt langzaam afbreekbaar CZV voor de denitrificatie gebruikt.

Bij alle rwzi's wordt het CZV in het eerste compartiment gebruikt voor de aanmaak van reservestoffen (PHB). De hoeveelheid PHB die wordt gevormd bij de rwzi Papendrecht is lager dan bij de overige rwzi's. Bij de rwzi Papendrecht en Hardenberg wordt alleen in het eerste compartiment PHB gevormd. Bij de rwzi Groesbeek en Alphen Kerk & Zanen wordt naast het eerste compartiment ook in het tweede compartiment PHB gevormd, hoewel slechts in geringe mate.

Uit figuur 10 blijkt dat er in het algemeen een lichte afname van de hogere vetzuren in de eerste compartimenten van de verschillende rwzi's optreedt. Er blijven echter hogere vetzuren aanwezig in de toeloop van de aërobe reactor. De concentraties liggen voor de verschillende rwzi's in dezelfde orde van grootte. Op basis van deze resultaten kan worden gesteld dat een voorgeschakelde aparte anoxische reactor niet leidt tot een verlaging of een volledige omzetting van hogere vetzuren. In de anoxische reactor zullen twee processen optreden die elkaar in de netto productie of netto omzetting van hogere vetzuren tegenwerken: te weten hydrolyse tot, en de omzetting van hogere vetzuren. Er is geen correlatie geconstateerd tussen het gehalte hogere vetzuren in de toeloop van de beluchte reactor en de procesconfiguratie, het percentage draadvormers, of de SVI. Andere onderzoekers (Andreasen en Nielsen 2000) hebben gewezen op het belang van de aanwezigheid van hogere vetzuren op de aanwezigheid van *Microthrix parvicella* en de SVI. Uit de resultaten van dit onderzoek kon dit belang niet worden aangetoond. De hoogste concentratie aan hogere vetzuren in de toeloop van de oxische reactor is gemeten bij de rwzi Hardenberg terwijl hier de SVI van het slib het laagst was. Verder waren de aantallen draadvormers bij Hardenberg aanzienlijk lager dan bij Groesbeek en Papendrecht.

Een verklaring voor de aanwezigheid van relatief veel *Microthrix parvicella* door zuurstofinslag vanwege de inzet van vijzels (rwzi Papendrecht) is onwaarschijnlijk. Door de hoge belasting in de eerste reactoren zal de beschikbare zuurstof onmiddellijk worden verbruikt, zodat de ingeslagen zuurstof geen invloed heeft op de groei van *Microthrix parvicella* in de navolgende aërobe reactor(en).

Uit het onderzoek blijkt dat de implementatie van een anoxische selector geen afname van de concentratie hogere vetzuren tot gevolg heeft. Indien er nog opgelost CZV in de afloop van de anaërobe reactor aanwezig is zal deze in de anoxische selector worden opgenomen. Tijdens het onderzoek was de hoeveelheid opgelost CZV in de afloop van de anaërobe reactor echter verwaarloosbaar.

6.4 De rol van ammonium

In de literatuur (Slijkhuis, 1983 en Slijkhuis et. al., 1984) is er al op gewezen dat voor de groei van van *Microthrix parvicella* de aanwezigheid van hogere vetzuren, lage zuurstofconcentraties en de aanwezigheid van ammonium bepalend is. De aanwezigheid van ammonium in de aërobe reactor kan dus een bepalende factor zijn voor de groei van *Microthrix parvicella*. De ammoniumconcentratie in het effluent van de rwzi Hardenberg was zeer laag (gemiddeld 0,2 mg/l) bij een relatief hoge zuurstofconcentratie (> 1,5 mg/l).

Gabb (1988) toonde in zijn onderzoek het volgende aan:

- ongeacht de wijze van influentvoeding, intermitterend of continu, kunnen bij volledige aërobe condities (circa 2 mg O₂/l) de slibbezins-eigenschappen worden verbeterd en is er sprake van een lage SVI. De al dan niet aanwezige selector heeft geen invloed;
- door de introductie van een intermitterende beluchting (simulatie van een omloopsysteem) in het actiefslibstelsysteem (anoxische periode van 70%) is de SVI niet beheersbaar en gaat de SVI omhoog (> 200 ml/g). Onder deze procesomstandigheden was er sprake van lage nitraatconcentraties in het effluent (0 – 5 mg NO₃-N/l) en redelijk hoge ammoniumconcentraties (5 – 15 mg NH₄-N/l). Bij overschakeling naar een continue beluchting ging de SVI in één slibleeftijd naar beneden (100 ml/g) en verdween *Microthrix parvicella*. De nitraatconcentratie steeg terwijl de ammoniumconcentratie daalde tot bijna 0 mg/l.

Gabb (1988) concludeerde dat een aërobe selector de SVI van een laag belast actiefslibstelsysteem niet kan beheersen. Dit betekent volgens hem dat beheersing van de SVI met behulp van selectoren bij laagbelaste actiefslibsystemen met vergaande P- en N-verwijdering niet mogelijk is. Alleen continue beluchting remt de groei van vooral *Microthrix parvicella*, onafhankelijk van de wijze van voeding.

In de literatuur zijn geen grenswaarden voor de ammoniumconcentratie aangegeven waarbij *Microthrix parvicella* minder zal groeien. Er is altijd verondersteld dat de K_s-waarde conform de waarde voor nitrificerders circa 1 mg NH₄-N/l bedraagt. Bij zeer lage waarden voor ammonium als daggemiddelde concentratie zullen er perioden aanwezig zijn waarin niet of nauwelijks ammonium aanwezig is. Dit betekent dat gedurende deze perioden een ammoniumconcentratie onder de K_s-waarde voor *Microthrix parvicella* kan voorkomen zodat groei-limitatie voor *Microthrix parvicella* ontstaat.

De vereiste ammoniumconcentratie van < 1 mg/l kan echter ook een afgeleide zijn van de vereiste zuurstofconcentratie in de aërobe reactor (> 1,5 mg/l) voor een stabiele nitrificatie en voor het onderdrukken van de groei van *Microthrix parvicella*. Een andere voorwaarde voor de groei van *Microthrix parvicella* is de aanwezigheid van gereduceerde S-verbindingen. Bij een zuurstofconcentratie > 1,5 mg/l zullen de S-verbindingen niet in gereduceerde vorm voorkomen en kan *Microthrix parvicella* derhalve niet meer groeien (Slijkhuys et. al. 1984). Uitgaande van dit standpunt zou het voorkomen van licht slib in rwzi's met vergaande biologische P- en N-verwijdering te vermijden zijn door compartimentering op basis van biologische conversiefuncties met de juiste zuurstofconcentraties. Hierbij zou weer worden teruggegrepen op de conventionele theoriën (Donaldson en Davidson, 1950, Chudoba en Wanner, 1970 en Rensink, 1975). Biotechnologisch onderzoek zou meer licht op de exacte rol van ammonium en zuurstof op de groei van *Microthrix parvicella* kunnen werpen.

Zoals uit § 5.4.2 blijkt zullen altijd hogere vetzuren in de aërobe reactor worden aangevoerd. Derhalve kan alleen door regeling van de zuurstof- en ammoniumconcentratie de groei van *Microthrix parvicella* tot een minimum worden beperkt. Zeer lage ammoniumconcentraties zijn alleen haalbaar indien de laatste reactor een volledig beluchte reactor is (zuurstofconcentratie altijd > 1,5 mg/l).

In tabel 16 is een samenvatting gegeven van de bevindingen uit dit onderzoek zoals deze in hoofdstuk 5 en 6 naar voren zijn gekomen. Hierbij is uitgegaan van het belang van de verschillende procesonderdelen van de rwzi.

Tabel 16: Samenvatting van de rol van de verschillende procesonderdelen

| | |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anaërobe reactor | <ul style="list-style-type: none"> - Alleen bij het UCT-principe (BCFS) is sprake van een echte anaërobe ruimte en dus de meest kans op de vorming van een PAO-vlok. Dit geeft meer zekerheid met betrekking tot het handhaven van goed bezinkbaar slib. - Bij het Phoredox-principe is er sprake van een onbeluchte reactor met wisselende anoxische en anaërobe condities. De denitrificatiesnelheid is ondanks de aanwezigheid van snel afbreekbaar CZV (lagere vetzuren) dezelfde als de snelheid gemeten bij langzaam afbreekbaar CZV; dit is waarschijnlijk een gevolg van nitraatlimitatie. - In het eerste compartiment van de rwzi wordt al het snel afbreekbaar CZV al volledig opgenomen en gebruikt. In de navolgende compartimenten is alleen langzaam afbreekbaar CZV aanwezig voor de verschillende processen. |
| Anoxische selector | <ul style="list-style-type: none"> - In de anoxische selector volgend op de anaërobe reactor (BCFS) vindt geen verdere afname van opgelost CZV plaats. |
| Anoxische reactor 1 | <ul style="list-style-type: none"> - Een separate anoxische reactor is essentieel om een lage SVI te handhaven. Dit geldt al bij een anoxisch fractie van 40-45%; dat is lager dan de 60% volgens Casey (1995-2000). De minimaal benodigde anoxische ruimte bedraagt op basis van de contacttijd circa 20% van de totale anoxisch-aërobe ruimte. Bij lagere BZV/N-verhoudingen kan dit percentage toenemen tot maximaal 50%. - In de anoxische ruimte worden de hogere vetzuren niet volledig verwijderd. Integendeel, de doorslag van de hogere vetzuren naar de aërobe ruimte was voor de verschillende procesconfiguraties gelijk. Het belang van een separate anoxische ruimte is de vorming van een kweekvijver voor facultatief heterotrofe vlokvormers. In deze reactor zijn deze bacteriën in het voordeel ten opzichte van draadvormers als <i>Microthrix parvicella</i>. Het opgenomen CZV is dan niet meer voor draadvormers beschikbaar. Een volledige netto verwijdering van hogere vetzuren treedt niet op. - De denitrificatie in de anoxische ruimte vindt plaats op langzaam afbreekbaar CZV. Bij de dimensionering van de separate anoxische reactor moet hiermee rekening worden gehouden; er dient ten aanzien van de te hanteren denitrificatiesnelheid te worden uitgegaan van simultane denitrificatie in plaats van een voorgeschakelde denitrificatie. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het totale volume voor de beluchtingsvolume met de HSA-methode wel met de factor a voor voorgeschakelde denitrificatie moet worden berekend. |

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anoxisch/aërobe reactor (wisselreactor) | <ul style="list-style-type: none"> - Een wisselreactor zoals in het BCFS-systeem heeft géén extra positieve invloed op het niveau van het PHB-gehalte in het slib van het laatste compartiment van de aërobe reactor. Bij alle onderzochte procesconfiguraties was het slib aan het einde van het laatste compartiment van de aërobe reactor ten aanzien van PHB geregenereerd. Een extra anoxisch/aërobe reactor heeft dus geen invloed op het biosorptievermogen van het retourslib. - Gelet op de SVI en het aantal draadvormers gemeten bij de verschillende rwzi's, is een wisselreactor niet strikt noodzakelijk om een SVI < 150 ml/g te handhaven. - Implementatie van een wisselreactor geeft wel een beter propstroomkarakter. Dit geeft extra zekerheid voor goede slibbezinkeigenschappen, maar lijkt niet doorslaggevend. - Evenals bij de eerste anoxische reactor vindt in de wisselreactor de denitrificatie plaats op langzaam afbreekbaar CZV. |
| Aërobe reactor | <ul style="list-style-type: none"> - Bij alle onderzochte procesconfiguraties was het slib aan het einde van het laatste compartiment met betrekking tot het niveau van de PHB-concentratie gelijk. - Een lage ammoniumconcentratie in de aërobe reactor lijkt noodzakelijk. - Bij het BCFS-systeem (Hardenberg) wordt een hoger zuurstofgehalte gehandhaafd in de aërobe reactor. In combinatie met de wisselreactor geeft dit een gotere zekerheid voor het handhaven van een goed bezinkbaar slib. De verschillen in de gevonden SVI's tussen Hardenberg, Alphen Kerk & Zanen en Groesbeek zijn echter niet significant. |

In tabel 17 zijn de relevante parameters ten aanzien van de relatie tussen de slibbezinkingseigenschappen, de aanwezigheid van *Microthrix parvicella* en procesconfiguratie van de betreffende rwzi's samengevat.

Tabel 17: Samenvatting van de relatie tussen slibbezinkingseigenschappen, aanwezigheid van *Microthrix parvicella* en procesconfiguraties van de betreffende rwzi's

| Parameters | Papendrecht | Alphen Kerk & Zanen | Groesbeek | Hardenberg |
|----------------------------------------------|------------------|---------------------|------------------|------------|
| Type | 2 traps Phoredox | 3 traps Phoredox | 4 traps Phoredox | BCFS |
| Anoxische reactor | - | + | + | ++ |
| Positie t.a.v propstrooming* | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Maximale waarde SVI (ml/g) | 170 | 125 | 140 | 120 |
| <i>Microthrix parvicella</i> aanwezig | + | - | + | - |
| Ammoniumconcentratie in effluent (mg/l) | 2 | < 1 | 2 | < 1 |
| Aërobe slibfractie in beluchtingsreactor (%) | 60 | 75 | 75 | 100 |

*: geeft de mate van compartimentering weer, 1 meest aantal compartimenten, 4 minst aantal compartimenten

Uit tabel 16 en tabel 17 kan worden afgeleid dat om een goede SVI te handhaven de volgende maatregelen getroffen kunnen worden:

1. implementatie van een separate anoxische reactor met propstroomkarakter;
2. het toepassen van een UCT-configuratie, introductie van een strikt anaërobe reactor;
3. implementatie van een extra anoxisch/aërobe reactor (wisselreactor); voor een verdere compartimentering;
4. handhaven van een hoog zuurstofgehalte ($> 1,5 \text{ mg O}_2/\text{l}$) en het creëren van een lage ammonium-concentratie ($< 1 \text{ mg NH}_4\text{-N}/\text{l}$) in de laatste aërobe reactor.

In principe is maatregel 1 al voldoende om een SVI $< 150 \text{ ml/g}$ te handhaven. Afhankelijk van de influentkarakterisering en de daarbij benodigde anoxische en aërobe ruimte kan ook een SVI $< 120 \text{ ml/g}$ worden gehaald. Het percentage vaste anoxische ruimte waarin moet worden voorzien is afhankelijk van het totaal benodigde percentage anoxische ruimte. In dit onderzoek is gevonden dat bij een percentage anoxische ruimte van 35-45% een vaste anoxische ruimte van 20% voldoende is.

De maatregelen 2, 3, 4 geven extra zekerheid. Het toepassen van het UCT-systeem (of modificaties daarvan) optimaliseert de mogelijkheid tot slib met clusters van PAO's. Een hoger zuurstofgehalte is minder voordelig voor de microaërofiële *Microthrix parvicella* en zorgt voor ammoniumconcentraties in het effluent $< 1 \text{ mg NH}_4\text{-N}/\text{l}$. De introductie van de maatregelen 3 en 4, zoals in het BCFS[®]-systeem geïmplementeerd, dragen er toe bij dat de SVI het gehele jaar door kleiner is dan 120 ml/g zonder aanvullende chemische P-verwijdering. Dit is in overeenstemming met de resultaten van een recent uitgevoerde inventarisatie waarbij de slibvolume-indices van rwzi's met verschillende procesconfiguraties voor biologisch P-verwijdering met elkaar zijn vergeleken (Reitsma en Flameling, 1999).

7. RICHTLIJNEN VOOR DE CONFIGURATIE VAN RWZI'S MET VERGAANDE BIOLOGISCHE NUTRIËNTENVERWIJDERING MET EEN SVI < 120 ML/G

Het doel bij het bepalen van de optimale configuratie van een rwzi voor vergaande P- en N- verwijdering is de groei van *Microthrix parvicella* te voorkomen. De groei van *Microthrix parvicella* kan worden voorkomen door te zorgen voor:

- een separate anoxische reactor met propstroomkarakter;
- het toepassen van een UCT-configuratie, introductie van een strikt anaërobe reactor;
- een extra anoxisch/aërobe reactor (wisselreactor); voor een verdere compartimentering;
- een hoog zuurstofgehalte ($> 1,5 \text{ mg O}_2/\text{l}$) en het creëren van een lage ammoniumconcentratie ($< 1 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$) in de laatste aërobe reactor.

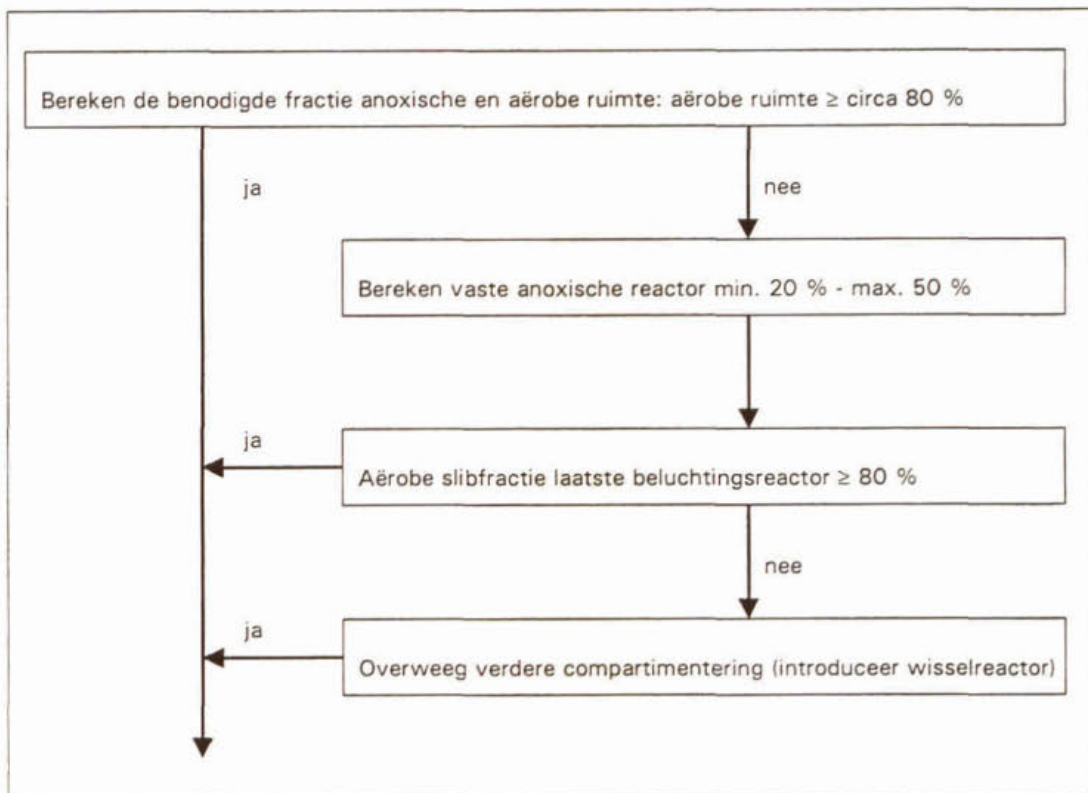
Voor het ontwerpen van een rwzi met vergaande P- en N- verwijdering worden de volgende uitgangspunten als bekend verondersteld (STOWA, 1994):

- De anaërobe reactor dient op basis van de contacttijd te worden gedimensioneerd. De contacttijd varieert afhankelijk van de concentratie lagere vetzuren tussen 1 en 2 h. Het benodigde debiet van het retourslib (Qrs) kan met de normale evenwichtsformules worden bepaald.
- Voor het introduceren van voldoende propstroomkarakter dienen de anaërobe reactor en de anoxische reactor in tenminste vier procescompartimenten te worden verdeeld. Dit kan fysiek of virtueel via een omloopsysteem worden gerealiseerd.

In navolgende worden op basis van de verkregen resultaten en de evaluatie, richtlijnen opgesteld voor de dimensionering van de anoxische ruimte en de indeling van de verschillende reactoren. De totaal benodigde beluchtingsruimte (anoxisch en aëroob) wordt berekend met de HSA-methode. Het benodigde volume is daarbij afhankelijk van de afvalwaterkwaliteit (BZV/N-verhouding) en ontwerptemperatuur. De volgende richtlijnen zijn bepalend:

- Indien het percentage aërobe slibfractie in de laatste reactor van de rwzi minimaal 80% bedraagt zal een slibkwaliteit met goede bezinkeigenschappen ($\text{SVI} < 120$) worden gehandhaafd. Alleen bij deze aërobe slibfractie is een lage ammoniumconcentratie bereikbaar. Indien de aërobe slibfractie in de laatste aërobe reactor lager wordt dan 80% moeten een separate anoxische reactor en de vereiste recirculatievoorzieningen worden geïntroduceerd.
- De separate anoxische ruimte bedraagt maximaal 50% van de totale anoxisch- aërobe ruimte. Het minimum bedraagt 20%. Dit laatste is noodzakelijk om voldoende contacttijd te realiseren. Indien de vereiste anoxische ruimte meer dan 50 % van de totale anoxisch-aërobe ruimte bedraagt, moet tussen de separate anoxische reactor en de aërobe reactor een anoxisch/aërobe reactor worden geïmplementeerd. Tevens dienen dan extra recirculatievoorzieningen te worden geïntroduceerd.

Op basis van bovenstaande uitgangpunten is in figuur 14 een procedure op hoofdlijnen voor de dimensionering van de anoxische en aërobe reactor weergegeven.



Figuur 14. Procedure op hoofdlijnen voor de dimensionering van de anoxische reactor

De berekening van de anoxische reactor verloopt zoals hieronder beschreven. De totale anoxische en aërobe ruimte wordt berekend met de gangbare rekenmethoden zoals de HSA-methode. In dit rapport is al aangegeven dat in dat geval beter gerekend kan worden met simultane denitrificatie bij een voorgeschakelde separate anoxische reactor in plaats van voordenitrificatie. Het benodigde recirculatiedebiet dient te worden gebaseerd op een lage denitrificatiesnelheid. Indien de totaal benodigde anoxische ruimte hoger is dan 20%, zal een vaste anoxische reactor moeten worden geplaatst. Deze vaste anoxische ruimte kan dan worden berekend met de volgende formule:

$$\% \text{-vast-anox} = \frac{0,8 * (\% \text{ aër - tot} + \% \text{ anox - tot}) - \% \text{ aër - tot}}{0,8} \quad (1)$$

Waar: %-vast-anox = percentage vaste anoxische ruimte (%); %-aër-tot = percentage totale aërobe ruimte berekend met de HSA-methode; % anox-tot = percentage totale anoxische ruimte berekend volgens de HSA-methode.

Met formule (1) wordt het percentage vaste anoxische ruimte zodanig berekend dat het percentage aërobe ruimte in het laatste compartiment 80% bedraagt. Indien het resultaat van formule (1) lager is dan 20% moet een waarde van 20% worden genomen. Indien het resultaat van formule (1) hoger is dan 50% moet een waarde van 50% worden genomen.

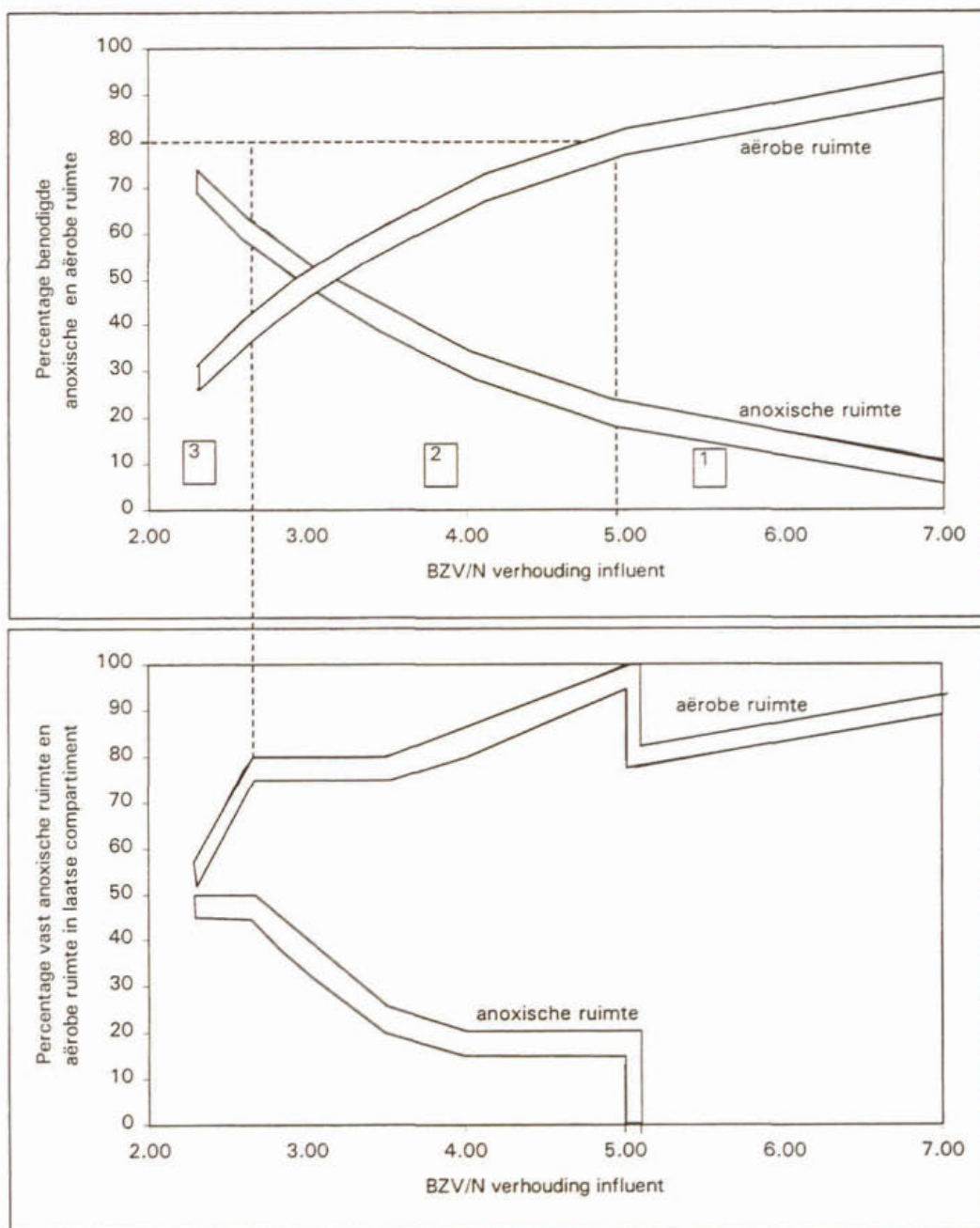
Het percentage aërobe ruimte in het laatste compartiment kan worden berekend met de volgende formule.

$$\% \text{-aër-lc} = \frac{\% \text{ aër-tot}}{\% \text{ aër-tot} + \% \text{ anox-tot} - \% \text{-vast-anox}} \quad (2)$$

Waar: %-aër-lc = percentage aëroob in de laatste aërobe reactor.

Indien het resultaat van formule (2) lager is dan 80% kan aanvullende zekerheid bovenop een vaste anoxische reactor worden overwogen (UCT-principe, BCFS-configuratie, 5-traps Phoredox). Indien wordt gekozen voor de BCFS-configuratie wordt de volgende verdeling verkregen: anoxische reactor : anoxisch/aërobe reactor : aëroob = 30 : 35 : 35.

In figuur 15 is de berekening van de benodigde aërobe en anoxische fractie, en de berekening van de vaste anoxische reactor en het percentage aëroob in het laatste compartiment weergegeven als functie van de BZV/N verhouding van het afvalwater.



Figuur 15. Berekend percentage totale anoxische en aërobe ruimte (boven) en het percentage vaste anoxische ruimte en aërobe ruimte in het laatste compartiment (beneden). In de figuur zijn drie gebieden te onderscheiden: 1) geen vaste anoxische ruimte nodig, 2) vaste anoxische ruimte nodig en eventueel UCT-principe of BCFS-configuratie (3).

8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Voor het optreden van licht slib door *Microthrix parvicella* bij de behandeling van stedelijk afvalwater met biologische P- en N-verwijdering, kan een sluitende praktijkverklaring worden opgesteld.

Uit onderhavig onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Een separate anoxische reactor is noodzakelijk voor het creëren van slib met goede slibbezinkingseigenschappen (SVI < 150 ml/g). Het inzetten van een volledig gemengd systeem voor het bereiken van vergaande N-verwijdering leidt tot een verhoogde kans op licht slib.
2. De implementatie van een separate anoxische reactor leidt niet tot een volledige omzetting van hogere vetzuren in deze reactor. Het analyseren van vetzuren in het influent heeft derhalve geen meerwaarde voor de dimensionering van de anoxische reactor. De concentraties hogere vetzuren (= opgelost en geadsorbeerd) in de toeloop van de aërobe reactor ligt voor systemen met en zonder separate anoxische reactor in dezelfde orde van grootte. Dit betekent dat in principe hogere vetzuren altijd ter beschikking komen voor de groei van *Microthrix parvicella*.
3. Een SVI < 120 ml/g kan worden bereikt door:
 - implementatie van een separate anoxische reactor met propstroomkarakter;
 - het toepassen van een UCT-configuratie, introductie van een strikt anaërobe reactor;
 - implementatie van een extra anoxisch/aërobe reactor (wisselreactor); voor een verdere compartimentering;
 - handhaven van een hoog zuurstofgehalte en het creëren van een lage ammoniumconcentratie (< 1 mg NH₄-N/l) in de laatste aërobe reactor.

De introductie van een separate anoxische reactor en eventueel een wisselreactor zijn hierbij een afgeleide van de noodzakelijkheid van een lage ammoniumconcentratie in de laatste aërobe reactor.

Op basis van het uitgevoerde onderzoek wordt aanbevolen om bij het hantieren van de gepresenteerde richtlijnen voor de configuratie van rwzi's met vergaande biologische nutriëntenverwijdering, te overwegen om bij het ontwerp van nabezinktanks uit te gaan van een ontwerp-SVI van 120 ml/g.

Tenslotte dient te worden vermeld dat voor een procesconfiguratie waarbij voor de vergaande P- en N-verwijdering achtereenvolgens een anaërobe reactor, een separate anoxische reactor, een extra wisselreactor en een aërobe reactor worden geïntroduceerd, naast het BCFS[®]-configuratie ook bijvoorbeeld het gemodificeerde UCT-configuratie of een vijf-traps-Phoredox-configuratie in aanmerking komen. Voor alle mogelijke configuraties geldt echter dat een goede eindbeluchting noodzakelijk is.

9. REFERENTIES

Andreasen, K. en Nielsen, P.H. (1998), In Situ characterization of substrate uptake by *Microthrix parvicella* using microautoradiography, *Wat. Sci. Tech.* (37), nr. 4 – 5.

Andreasen, K. en Nielsen, P.H. (2000), Growth of *Microthrix parvicella* in nutrient removal activated sludge plants: studies of in situ physiology, *Wat. Res* (34),nr 5, p 1559-1569.

Bürmann, 2000, persoonlijke mededeling, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Univerität Hannover.

Casey, T.G., Ekama, G.A., Wentzel, M.C. and Marais, G.v.R. (1995 – 2000), Filamentous Organism Bulking in Nutrient Removal Activated Sludge Systems, Water SA, Paper 1 – 11.

Eikelboom en Andreasen (1995) Survey of the filamentous population in nutrient removal plants in four European Countries, TNO Institute of Environmental Sciences, TNO-MW-R 95/090

Eikelboom, D. H., Andreadakis, A. en Andreasen, K. (1998), Survey of the filamentous population in nutrient removal plants in four European countries, *Wat. Sci. tech* (37), nr 4 –5, 281 - 290

Eikelboom, D. (1999), Procesbewaking door microscopisch slibonderzoek, TNO-rapport, TNO-MEP-R99/057

Gabb, D.M.D. et. al. (1988), Final report to the WRC on a three year contract on development and full scale evaluation of preventative and remedial methods for control of activated sludge bulking, Research report W 62, University of Cape Town.

Helmer, C. (1994), Einfluß von Temperatur und Stoßbelastungen auf die Mikroflora der belebten Schlämme in BIO-P-Anlagen, Ph.D. Thesis, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 89.

Knoop, S. en Kunst, S. (1998), Influence of Temperature and Sludge Loading on Activated Sludge Settling, especially on *Microthrix Parvicella* , *Wat. Sci. Tech.* (37), nr. 4 – 5, p. 27 – 35.

Narkis, N., Rebhun, M., Sheindorf, Ch. (1979), Denitrification at various Carbon to Nitrogen ratios, *Wat. Res.* (13), p. 93 – 98.

Palm, J.C., Jenkins, D. en Parker, D.S. (1980), Relationship between organic loading, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in the completely mixed activated sludge process, *J. WPCF*, 52, 2484

Reitsma, B.A.H. en Flaming, A.G.,(1999) Lagere slibvolume-indices bij biologisch defosfaterende rioolzuiveringsinstallaties, Rijkswaterstaat Directie Noordzee

Slijkhuis, H. (1983). The physiology of the filamentous bacterium *Microthrix parvicella*, PhD thesis, Agricultural University, Wageningen.

Slijkhuis, H., Deinema, M, Jongeneel, J., Man G. de (1984), De fysiologie van *Microthrix parvicella*, een draadvormige bacterie, die in laagbelaste actief-slibinstallaties licht slib kan veroorzaken, H2O (17), nr. 7.

Smolders, G.J.F., Meij, J. van der, Loosdrecht, M.C.M. van, Heijnen, J.J. (1994) Stoichiometric Model of the Aerobic Metabolism of the Biological Phosphorus Removal Process, *Biotechnol. Bioeng*, Vol. 44, p 837 – 848.

Smolders, G.J.F. (1995), A metabolic model for biological phosphorus removal: stoichiometry kinetics and dynamic behavior, Ph.D. Thesis, TU Delft.

Soddel, J.A. en Seviour, R.J., (1990). Microbiology of foaming in activated sludge plants. *J. Applied Bacteriology* (69), p 145-176.

STOWA (1988), Handboek voorkomen en bestrijden van licht slib, rapport 88-03

STOWA (1993) Invloed van P- en N-verwijdering op de bezinkeigenschappen van actief slib, rapport 93 – 10.

STOWA (1993a) Voordenitrificatie, Onderzoeksresultaten en praktijkrichtlijnen (93 – 05)

STOWA (1994) Dimensionering van de selector, rapport 94 – 16.

Tian, S. et. al. (1994), Investigations into excess activated sludge accumulation at low temperatures, *Wat. Res.*, Vol. 28, p. 501 – 509.

Visser, A. (1995), The anaerobic treatment of sulfate containing wastewater, PhD. Thesis Agriculture University Wageningen

Wagner, M. et. al. (1994), Identification and in situ detection of gram-negative filamentous bacteria in activated sludge, *System. Appl. Microbiology*, 405 – 417.

Wanner, J. (1994), *Activated Sludge Bulking and Foaming Control*, Technomic Publishing Company, Inc.

Wanner, J. (1994a), The Implementation of Bulking Control in the Design of Activated Sludge Systems, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 29, p 193 – 202.

Wolfson, C.H. (1992), Denitrifikation von speziellen Abwässern mit externen Kohlenstoffquellen, PhD Thesis, Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität Braunschweig, Heft 52.

Quéménuer, M. en Marty, Y (1994), Fatty Acids and Sterols in Domestic Wastewaters, Wat. Res., Vol 28, nr 5, p 1217 – 1226.

10. **BEGRIPPENLIJST**

- BCFS[®]-principe: het BCFS[®]-principe (Biologisch-Chemische Fosfaat en Stikstofverwijdering) is een uitbreiding van het gemodificeerde UCT-principe. Een afwijking op het gemodificeerde UCT-proces is de aanvullende fosfaatverwijdering, die wordt bereikt door gebruik te maken van een zogenaamde strippertank, waarin fosfaatrijk water wordt onttrokken aan de anaërobe zone, waarna het fosfaat in de sliblijn neerslaat
- Phoredox-principe: procesconfiguratie voor biologische P-verwijdering, waarbij het retourslib direct gezamenlijk met het influent in de anaërobe reactor wordt gevoerd
- UCT-principe: procesconfiguratie voor biologische P-verwijdering, waarbij het retourslib eerst in een anoxische reactor wordt geleid en vervolgens een gedeelte van het slib-water-mengsel uit de afloop van deze anoxische reactor in de anaerobe reactor wordt gevoerd. Om de anoxische verblijftijd te verkorten worden in een gemodificeerde uitvoering van het UCT-principe twee anoxische zones in serie geschakeld.
- Wisselreactor: Een reactor waarin door intermitterende beluchting nitrificatie en denitrificatie in de tijd kan plaatsvinden.



BIJLAGE 1

RESULTATEN ANALYSES, CONCENTRATIEVERLOPEN EN OMZETTINGSSNELHEDEN VAN VERSCHILLENDE COMPONENTEN IN DE BETREFFENDE RWZI'S

RWZI PAPENDRECHT

Werking van de rwzi gedurende de vier meetsessies

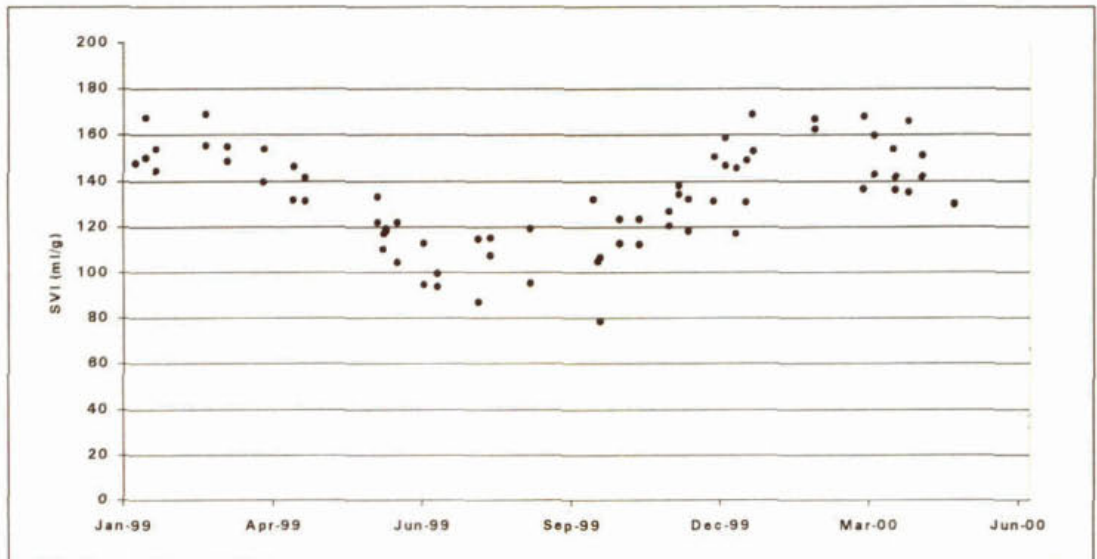
In tabel 18 zijn de gemiddelde concentraties in influent, effluent en de algemene kengetallen gedurende de vier meetsessies weergegeven.

Tabel 18. Gemiddelde concentraties in influent en effluent en algemene kengetallen van rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------------------------------------|-------|--------|--------|----------|----------------|
| INFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV | 223 | 243 | 263 | 390 | mg/l |
| - BZV ₅ | 110 | 106 | 94 | 166 | mg/l |
| - Lagere vetzuren (gefiltr.) | | 19 | 20 | 30 | mg CZV/l |
| - Hogere vetzuren | | 150 | 49 | 6,5 | mg CZV/l |
| - Nkj | 44 | 40 | 19 | n.m. | mg/l |
| - NH ₄ -N | 33 | 28 | 12 | n.m. | mg/l |
| - Ptot | 5,8 | 4,7 | 3,6 | n.m. | mg/l |
| - BZV/N | 2,5 | 2,0 | 4,9 | | - |
| - BZV-P | 19,0 | 17,0 | | | - |
| EFFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV (mg/l) | 30 | 29 | 24 | 28 | mg/l |
| - BZV ₅ (mg/l) | 3 | 2 | 2 | 2 | mg/l |
| - Nkj (mg/l) | 2 | 7,5 | 1,4 | 1,7 | mg/l |
| - NH ₄ -N (mg/l) | 1 | 6,5 | 0,4 | 1 | mg/l |
| - NO ₃ -N + NO ₂ -N (mg/l) | 1 | 2 | 1,5 | 0,6 | mg/l |
| - Ptot (mg/l) | 0,5 | 0,3 | 0,8 | 0,5 | mg/l |
| Temperatuur | 19 | 16 | 10 | 12 | °C |
| SVI | 111 | 119 | 161 | 150 | ml/g |
| %P in slib | 2,5 | 3,0 | 2,4 | 2,7 | % |
| Slibbelasting BZV* | 0,040 | 0,041 | 0,041 | 0,042 | kg BZV/kg ds.d |
| N* | 0,016 | 0,014 | 0,008 | n.m | kg N/kg ds. d |

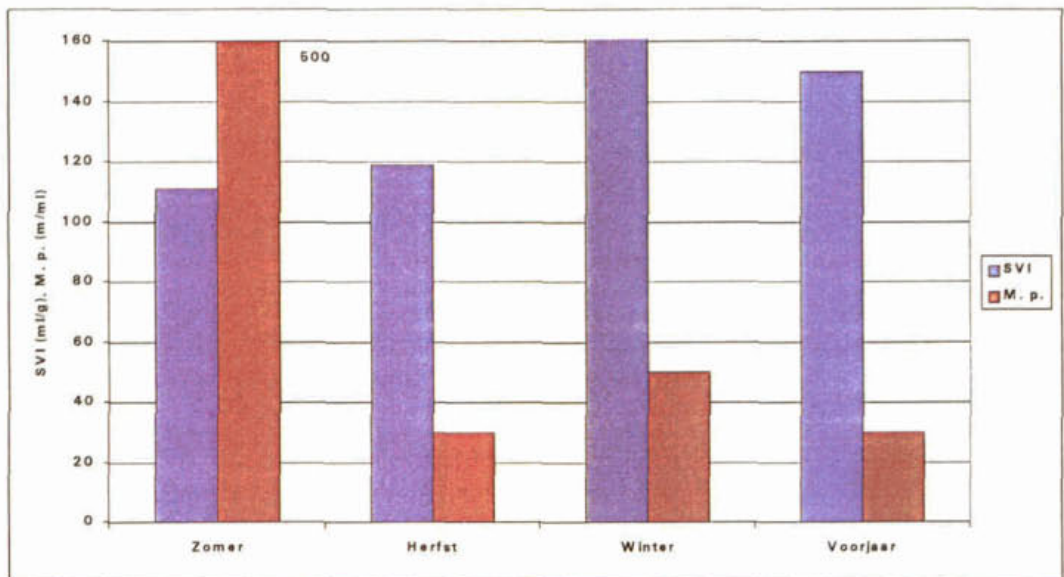
*: exclusief anaërobe reactor

In figuur 16 is het SVI-verloop van de rwzi Papendrecht gedurende de meetperiode weergegeven.



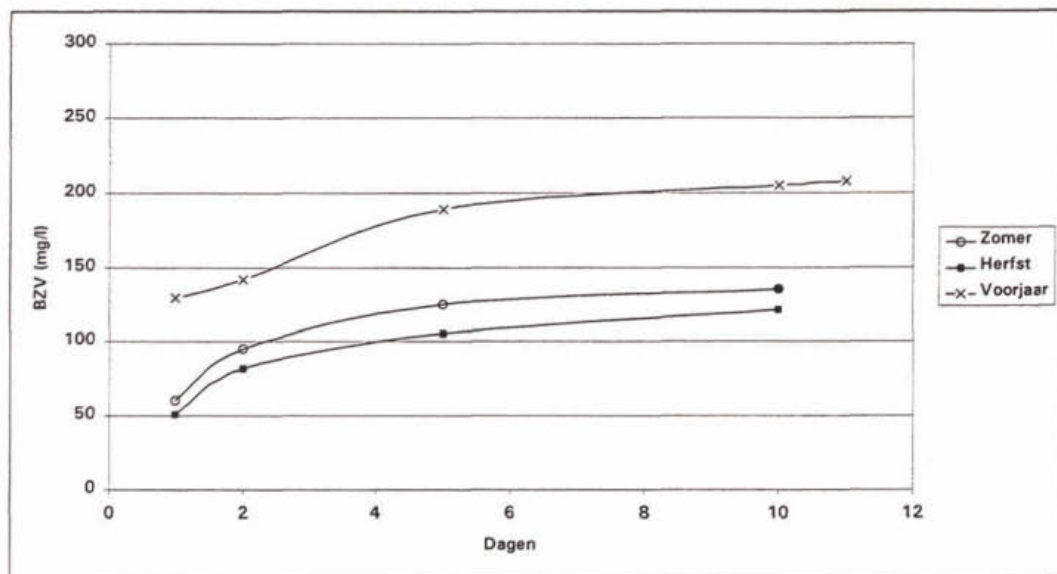
Figuur 16. SVI-verloop rwzi Papendrecht gedurende de meetperiode

In figuur 17 is de SVI en de telling van *Microthrix parvicella* gedurende de meetsessies weergegeven.



Figuur 17. SVI (ml/g) en de telling van *Microthrix parvicella* (*M. p.* in m/ml) rwzi Papendrecht

In figuur 18 is het verloop van de BZV-concentratie van het influent van de rwzi Papendrecht weergegeven. Door het fitten van de curven kan de k_{BZV} worden bepaald. Indien de k_{BZV} bekend is kan vervolgens de BZV_{∞} worden berekend (tabel 19).



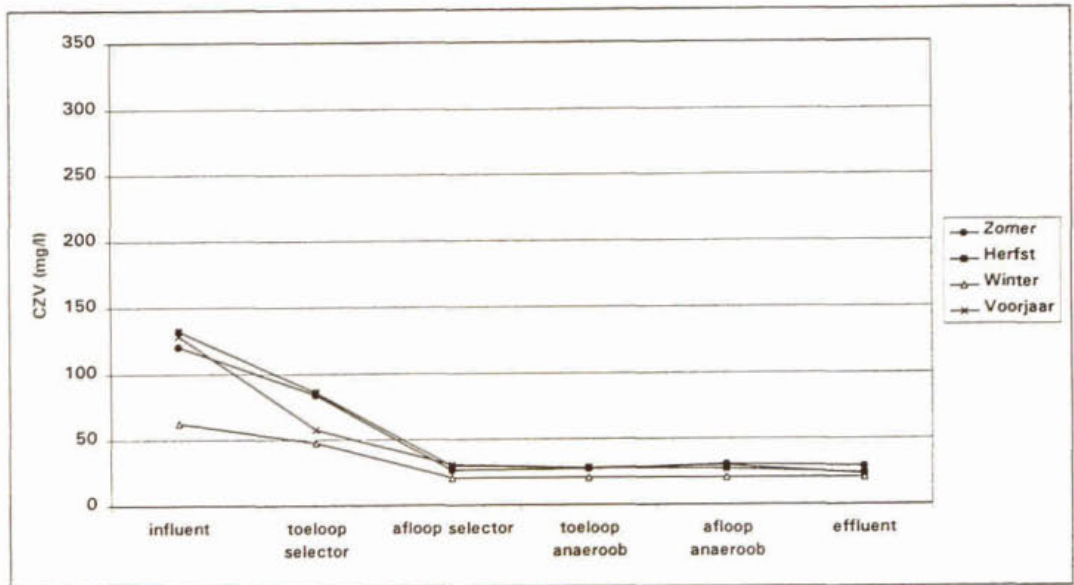
Figuur 18. BZV-curven van het influent van de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies

Tabel 19. CZV, BZV_5 , k_{BZV} , BZV_∞ in het influent van de rwzi Papendrecht gedurende drie van de vier meetsessies

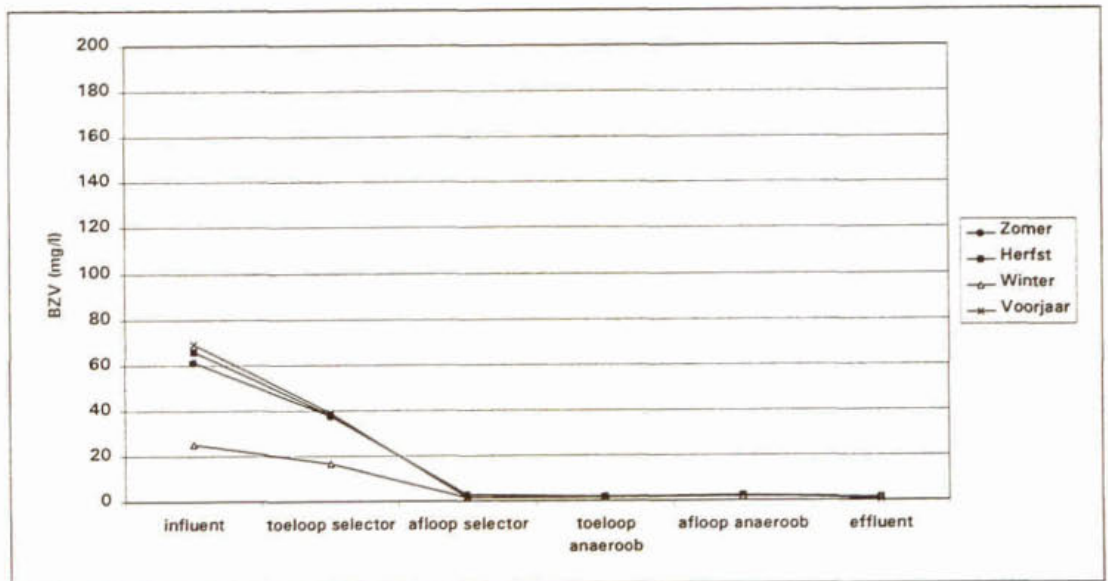
| Meetsessie | CZV (mg/l) | BZV_∞ (mg/l) | BZV_5 (mg/l) | k_{BZV} (d^{-1}) |
|------------|------------|---------------------|----------------|------------------------|
| Zomer | 223 | 134 | 110 | 0,60 |
| Herfst | 235 | 117 | 106 | 0,57 |
| Winter | 263 | - | - | - |
| Voorjaar | 390 | 186 | 166 | 0,64 |

Concentratieprofielen rwzi Papendrecht

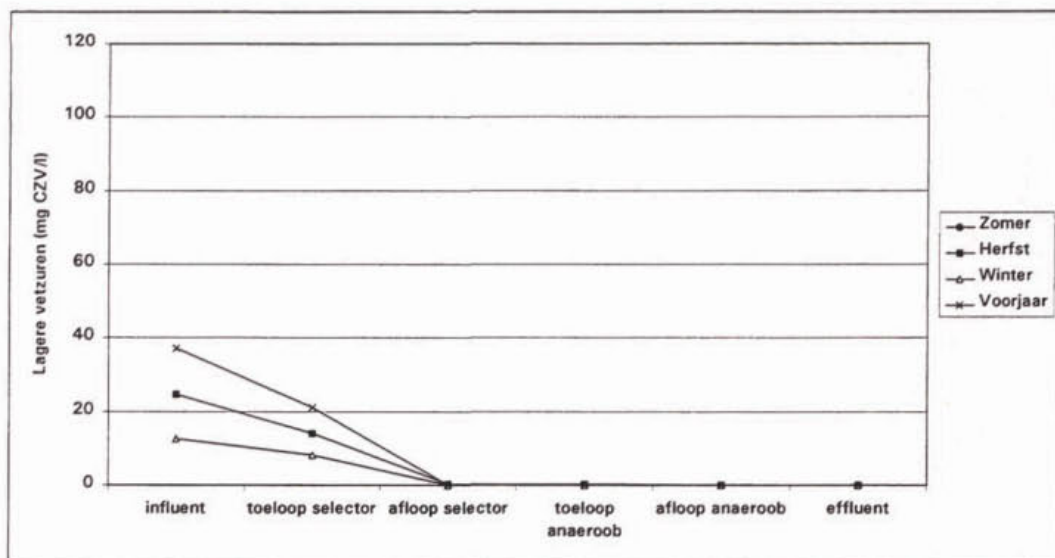
In figuur 19 tot en met figuur 25 zijn de concentratieprofielen van verschillende componenten voor de rwzi Papendrecht tijdens de vier meetsessies weergegeven.



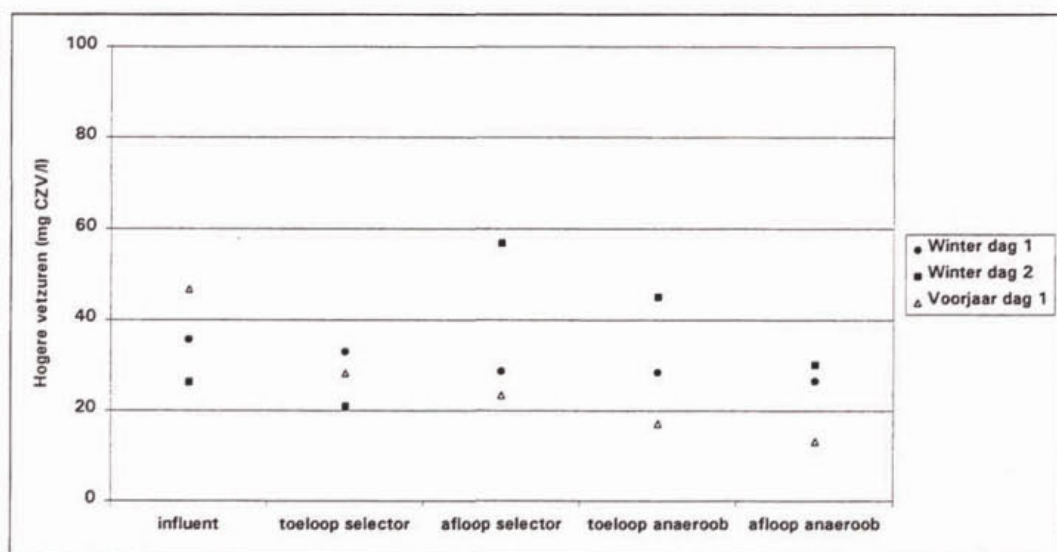
Figuur 19. Concentratieverloop van opgelost CZV in de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies



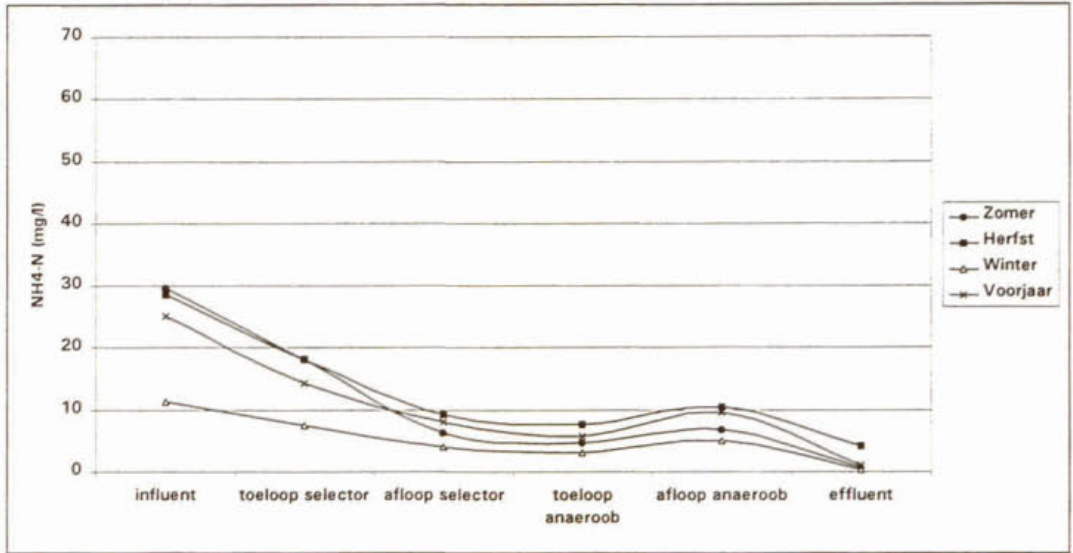
Figuur 20. Concentratieverloop van BZV₅ in de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies



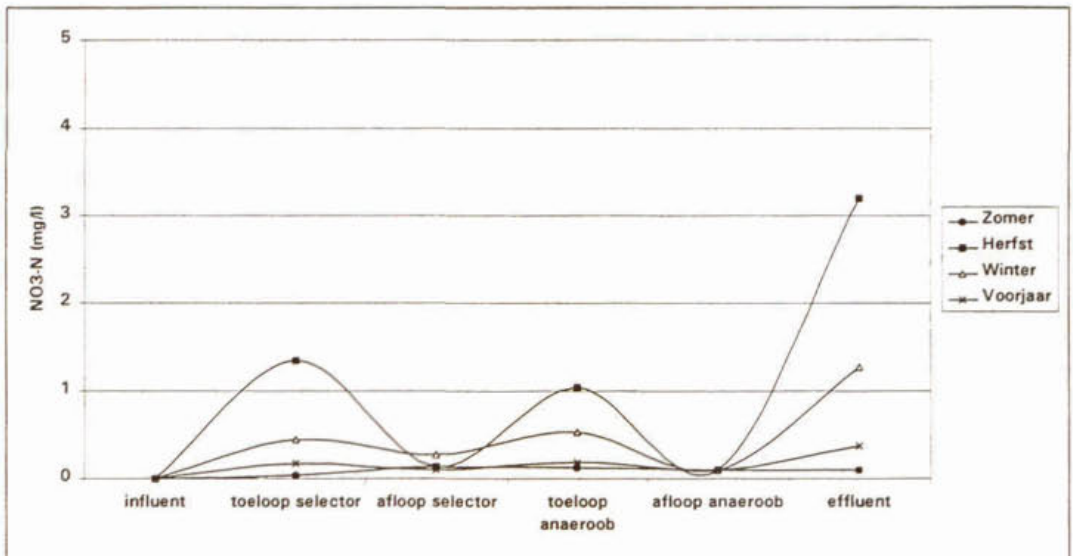
Figuur 21. Concentratieverloop van lagere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies



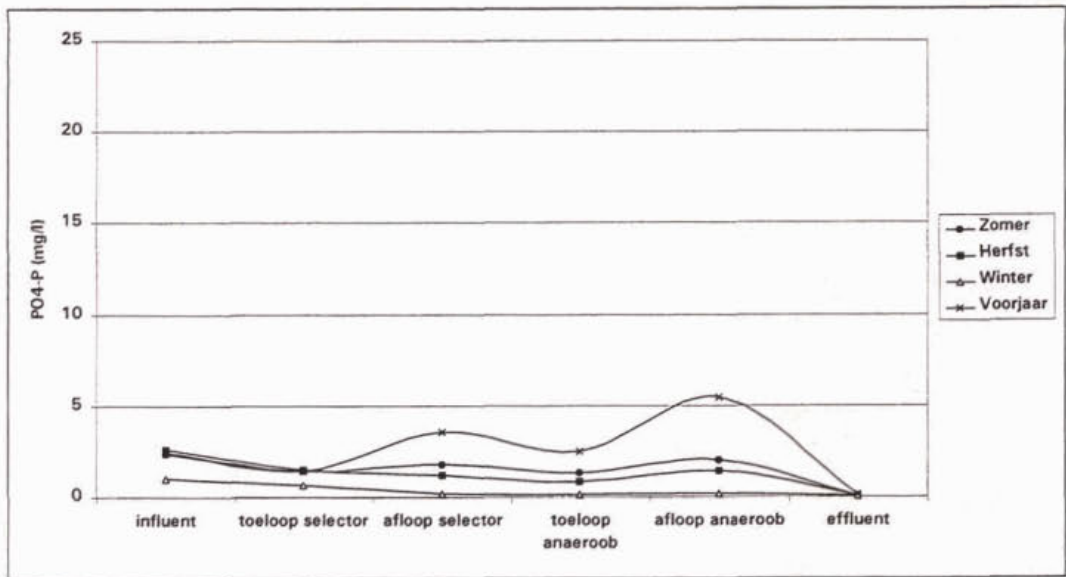
Figuur 22. Concentratieverloop van hogere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies



Figuur 23. Concentratieverloop van ammonium (mg NH₄-N/l) in de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies



Figuur 24. Concentratieverloop van nitraat (mg NO₃-N/l) in de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies



Figuur 25. Concentratieverloop van fosfaat (mg PO₄-P/l) in de rwzi Papendrecht gedurende de vier meetsessies

Omzettingssnelheden rwzi Papendrecht

Selector rwzi Papendrecht

Tabel 20. Omzettingssnelheden in de selector voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|--------|--------|--------|----------|------------------------------|
| CZV | - 22,4 | - 53,0 | - 26,9 | - 16,1 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | - 7,8 | - 33,8 | - 14,9 | - 11,8 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | - 13,4 | - 8,0 | - 7,1 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | - 1,7 | - 8,6 | - 3,2 | - 2,0 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | - 0,2 | - 0,1 | - 0,0 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | 0,0 | - 0,3 | - 0,5 | 0,6 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV | 8,4 | 9,6 | 12,0 | 7,5 | mg PHA-CZV/g ds.h |
| PHB - CZV | 6,9 | 6,6 | 9,2 | 4,7 | mg PHB-CZV/g ds.h |

Anaërobe reactor rwzi Papendrecht

Tabel 21. Omzettingssnelheden in de anaërobe reactor voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|------------------------------|
| CZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | - 0,4 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | 0,2 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | - 0,5 | - 0,1 | 0,0 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,3 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV | - 0,8 | - 0,7 | - 1,8 | - 0,3 | mg PHA-CZV/g ds.h |
| PHB - CZV | - 0,5 | - 0,3 | - 1,6 | - 0,3 | mg PHB-CZV/g ds.h |

Omloopsysteem rwzi Papendrecht

Tabel 22. Omzettingssnelheden in het omloopsysteem voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|------------------------------|
| CZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | | - 0,4 | - 0,3 | - 0,2 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | 0,2 | 0,1 | 0 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | | - 0,1 | 0,0 | - 0,1 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV | 0,1 | - 0,2 | - 0,2 | -0,2 | mg PHA-CZV/g ds.h |
| PHB-CZV | 0,1 | -0,2 | -0,1 | -0,1 | mg PHB-CZV/g ds.h |

RWZI ALPHEN KERK & ZANEN

Werking van de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies

In tabel 23 zijn de gemiddelde concentraties in influent, effluent en de algemene kengetallen gedurende de vier meetsessies weergegeven

Tabel 23. Gemiddelde concentraties in influent en effluent en algemene kengetallen van rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies

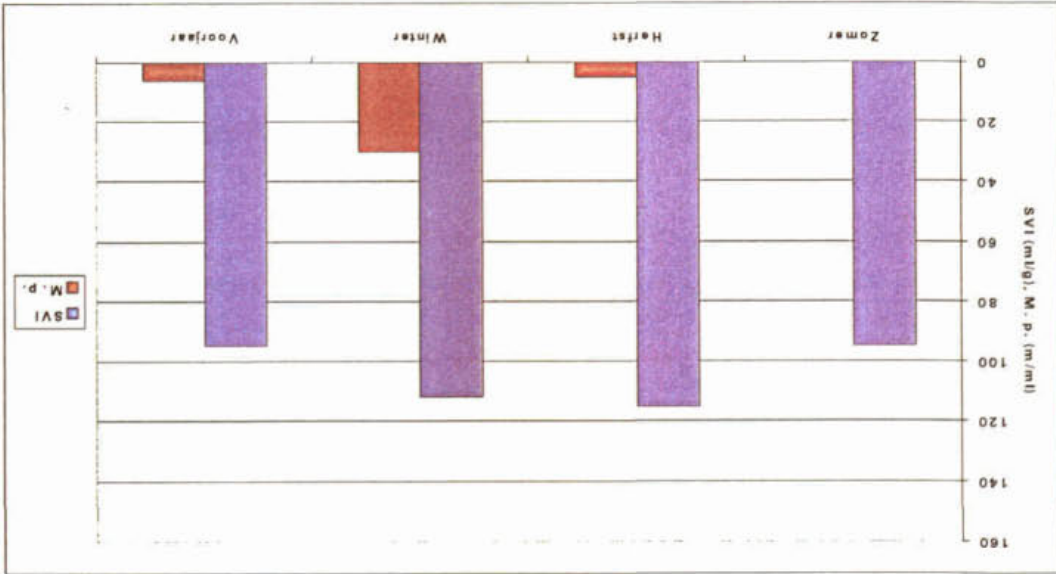
| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------------------------------------|-------|--------|--------|----------|----------------|
| INFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV | 465 | 610 | 290 | 460 | mg/l |
| - BZV ₅ | 180 | 210 | 165 | 150 | mg/l |
| - Lagere vetzuren | | 30,3 | 11 | 55,8 | mg CZV/l |
| - Hogere vetzuren | | 368 | 15,2 | 5,55 | mg CZV/l |
| - Nkj | 46 | 55 | | 50 | mg/l |
| - NH ₄ -N | | 38 | 26 | 38 | mg/l |
| - Ptot | 6,1 | 8,8 | 5,0 | 8,6 | mg/l |
| - BZV/N | 3,9 | 3,9 | | 3,0 | - |
| - BZV/P | 29,5 | 23,6 | 33,0 | 17,4 | - |
| EFFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV (mg/l) | 24 | 33 | 29 | 38 | mg/l |
| - BZV ₅ (mg/l) | 2 | 2 | | 2 | mg/l |
| - Nkj (mg/l) | 1 | 3 | | 1,6 | mg/l |
| - NH ₄ -N (mg/l) | | 1,9 | 0,5 | 0,3 | mg/l |
| - NO ₃ -N + NO ₂ -N (mg/l) | 2 | 1,7 | 2,43 | 2,12 | mg/l |
| - Ptot (mg/l) | <1 | 0,6 | 0,3 | 0,16 | mg/l |
| Temperatuur | 20 | 17 | 10 | 15 | °C |
| SVI | 95 | 115 | 112 | 95 | ml/g |
| %P in slib | 2,5 | 2,3 | 2,5 | 2,8 | % |
| Slibbelasting BZV* | 0,053 | 0,052 | 0,053 | 0,046 | kg BZV/kg ds.d |
| N* | 0,010 | 0,013 | 0,013 | 0,015 | kg N/kg ds. d |

*: exclusief anaërobe reactor

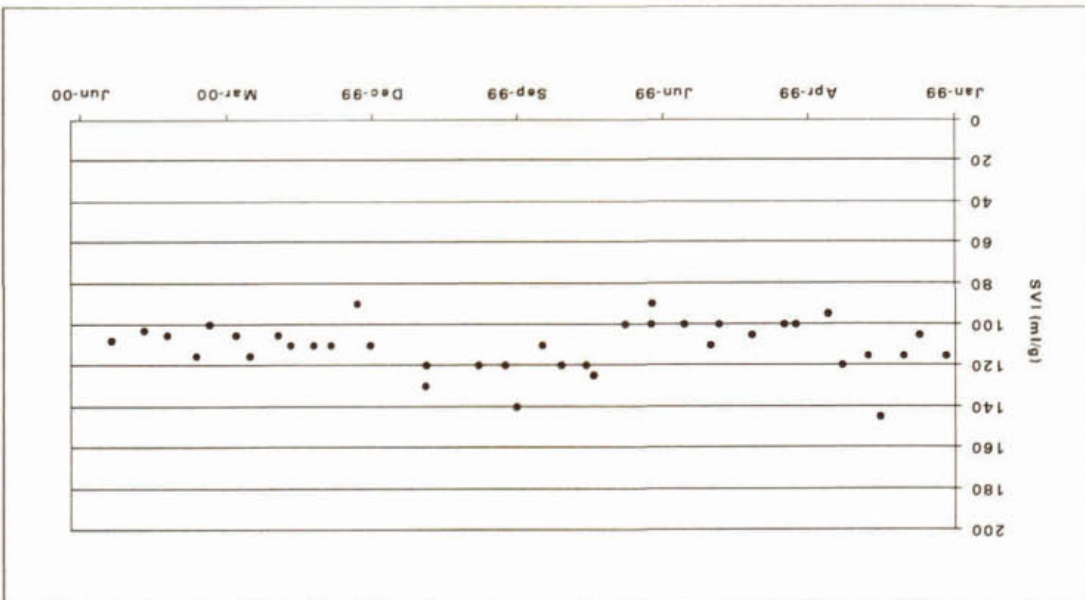
In figuur 26 is het SVI-verloop van de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de meetperiode weergegeven.

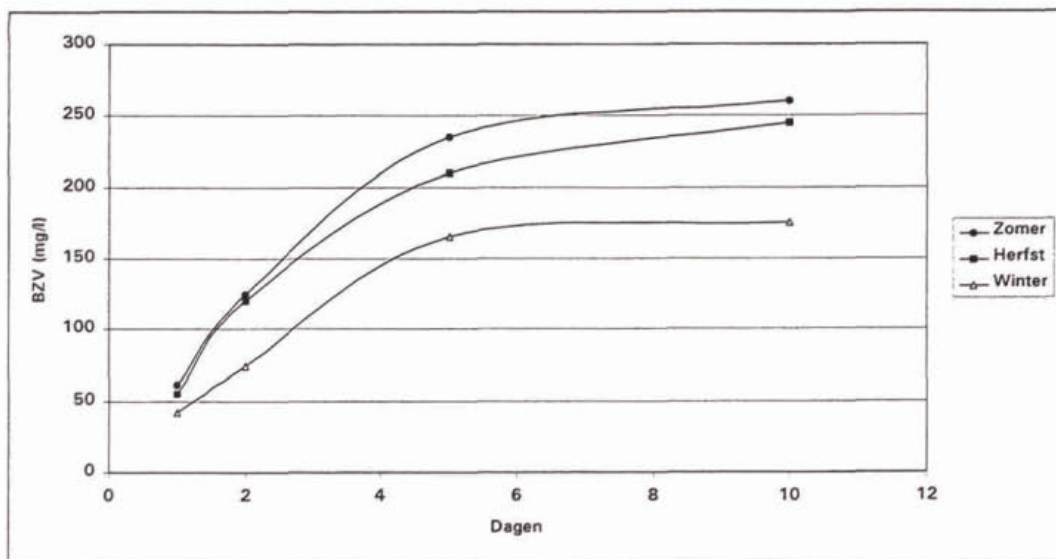
In figuur 28 is het verloop van de BZV-concentratie van het influent van de rwzi Alphen Kerk & Zanen weergegeven. Door het fitten van de curven kan de kasv worden bepaald. Indien de kasv bekend is kan vervolgens BZV_∞ worden berekend (tabel 24).

Figuur 27. SVI (ml/g) en de telling van *Microthrix parvicella* (M.p.) in m/ml) rwzi Alphen Kerk & Zanen



Figuur 26. SVI-verloop van de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de meetperiode





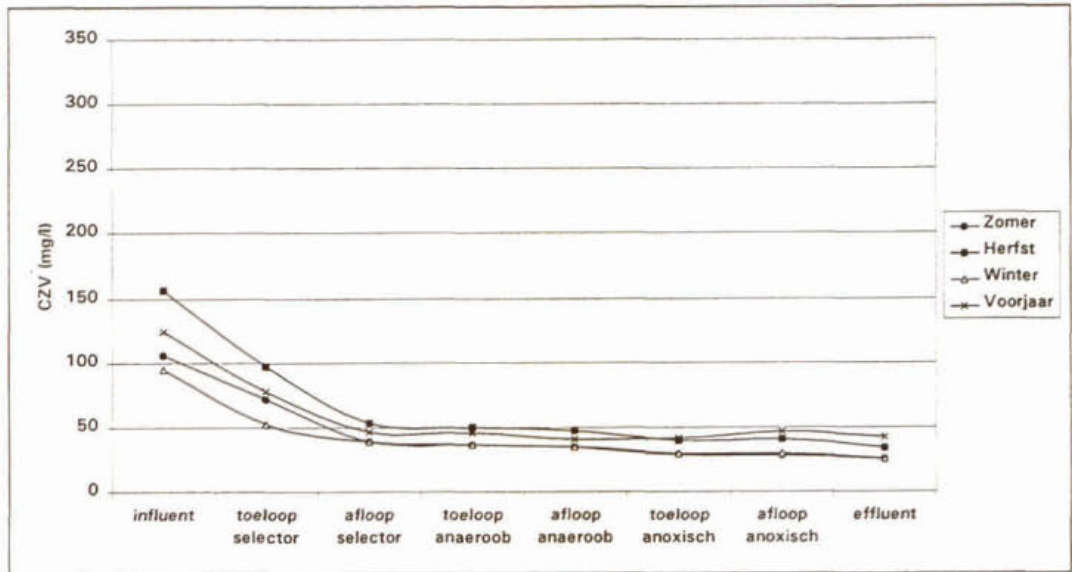
Figuur 28. BZV-curven van het influent van de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies

Tabel 24: CZV, BZV_5 , k_{BZV} , BZV_∞ in het influent van de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de meetsessies

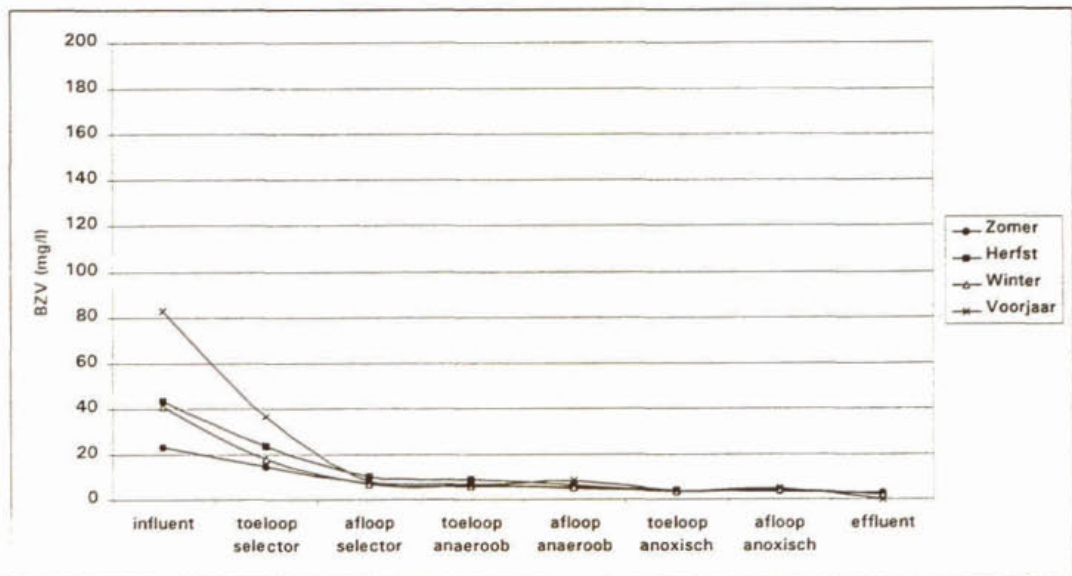
| Meetsessie | CZV (mg/l) | BZV_∞ (mg/l) | BZV_5 (mg/l) | k_{BZV} (d^{-1}) |
|------------|------------|---------------------|----------------|------------------------|
| Zomer | 465 | 274 | 180 | 0,32 |
| Herfst | 610 | 253 | 210 | 0,32 |
| Winter | 290 | 181 | 165 | 0,35 |
| Voorjaar | 460 | - | 150 | - |

Concentratieprofielen rwzi Alphen Kerk & Zanen

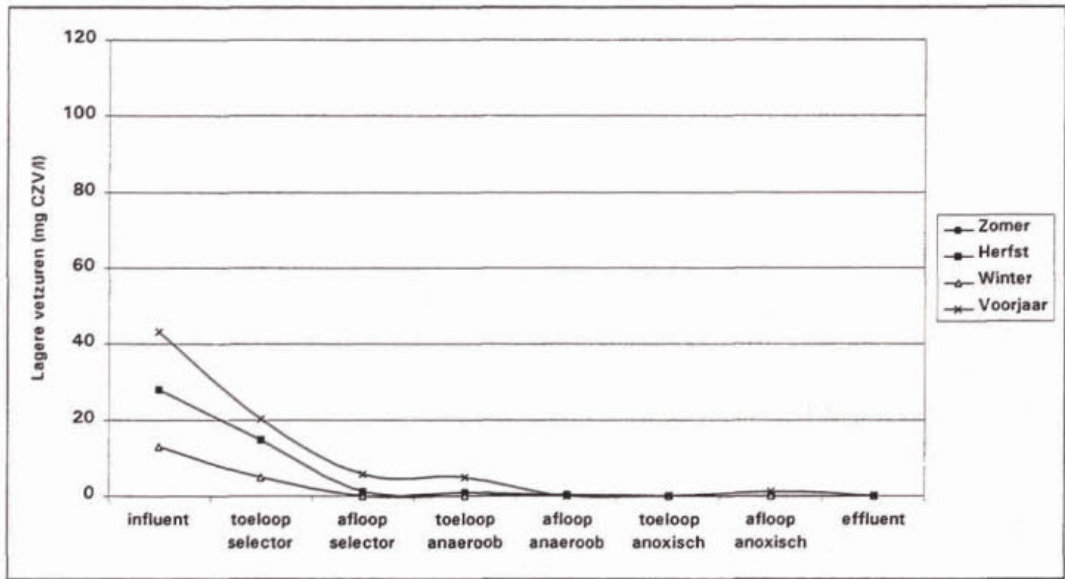
In figuur 29 tot en met figuur 35 zijn de concentratieverlopen van verschillende componenten in de rwzi Alphen Kerk & Zanen weergegeven.



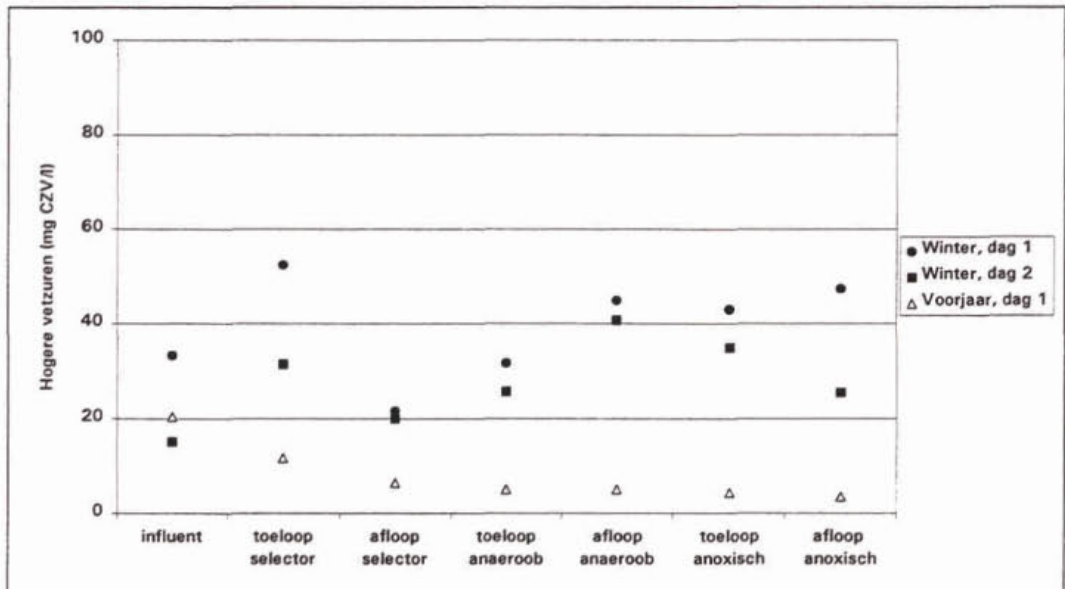
Figuur 29. Concentratieverloop van opgelost CZV in de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies



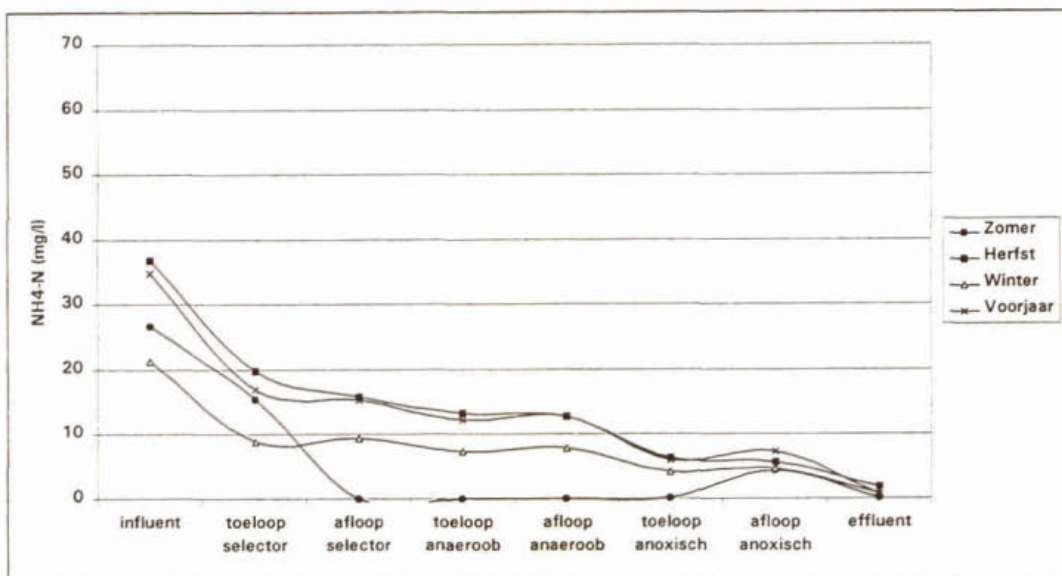
Figuur 30. Concentratieverloop van BZV₅ in de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies



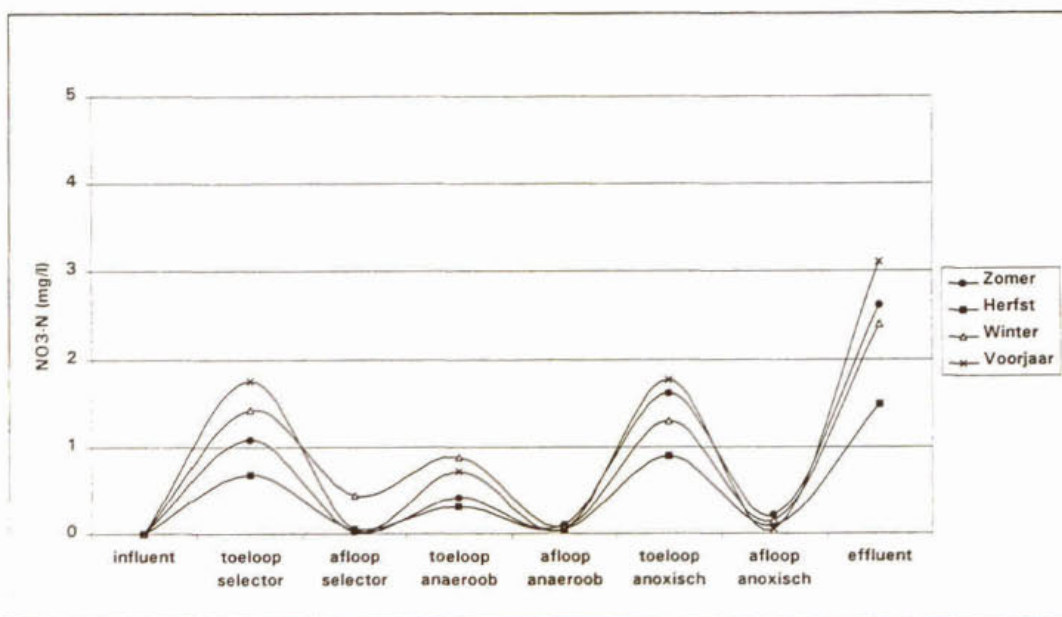
Figuur 31. Concentratieverloop van lagere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies



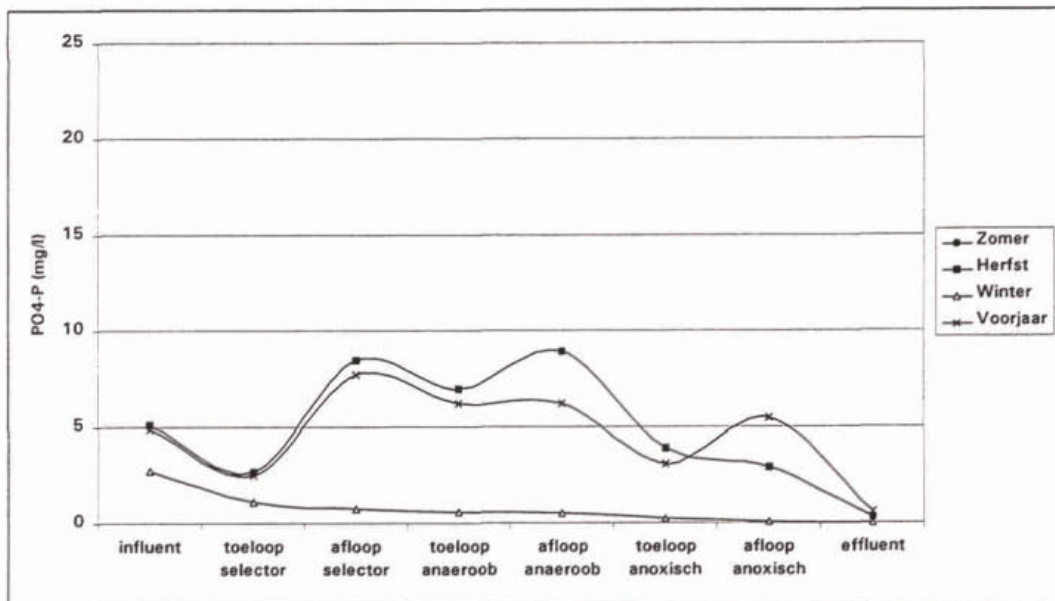
Figuur 32. Concentratieverloop van hogere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies



Figuur 33. Concentratieverloop van ammonium (mg NH₄-N/l) in de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies



Figuur 34. Concentratieverloop van nitraat (mg NO₃-N/l) in de RWZI Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies



Figuur 35. Concentratieverloop van fosfaat (mg PO₄-P/l) in de rwzi Alphen Kerk & Zanen gedurende de vier meetsessies

Omzettingssnelheden rwzi Alphen Kerk & Zanen

Selector rwzi Alphen Kerk & Zanen

Tabel 25. Omzettingssnelheden in de selector voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|--------|--------|---------|----------|-------------------------------|
| CZV | - 19,1 | - 30,7 | - 11,5 | - 18,7 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | - 4,3 | - 9,6 | - 9,8 | - 12,2 | mg BZV/g ds. h |
| Lagere vetzuren | | - 9,1 | - 5,7 | - 16,5 | mg CZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | - 2,8 | 0,4 | 1,5 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | - 0,6 | - 0,5 | - 0,7 | - 1,0 | mg NO ₃ -N/g ds. h |
| PO ₄ -P | | 3,7 | 0,4 | 3,6 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV | 12,1 | 20,8 | 1,75 ** | 13,1 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB-CZV | 8,4 | 13,8 | 1,75 | 7,3 | mg PHB-CZV/g ds. h |

** : alleen PHB omzet

Anaërobe reactor rwzi Alphen Kerk & Zanen

Tabel 26. Omzettingssnelheden in de anaërobe reactor voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|---------|----------|---------------------------------|
| CZV | - 0,5 | - 0,7 | - 0,5 | - 1,7 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | - 0,4 | - 0,6 | 0 | - 0,6 | mg BZV/g ds. h |
| Lagere vetzuren | | - 0,2 | 0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | 0 | 0 | 0,3 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | - 0,1 | 0 | - 0,4 | - 0,2 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | 0,8 | 0 | 0,1 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV | 3,4 | 2,4 | - 0,8** | - 0,6 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB-CZV | 2,8 | 1,3 | - 0,8 | - 0,5 | mg PHB-CZV/g ds. h |

** : alleen PHB omzetting

Anoxische reactor rwzi Alphen Kerk & Zanen

Tabel 27. Omzettingssnelheden in de anoxische reactor voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|---------|----------|---------------------------------|
| CZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg BZV/g ds. h |
| Lagere vetzuren | | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | - 0,3 | 0,2 | 0,7 (0) | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | - 0,5 | - 0,3 | - 0,6 | - 0,6 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | - 0,4 | - 0,1 | 0,3 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV | - 1,6 | - 1,7 | - 0,7** | 1,34 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB-CZV | - 1,3 | - 0,9 | - 0,7 | 0,70 | mg PHB-CZV/g ds. h |

** : alleen PHB omzetting

Aërobe reactor rwzi Alphen Kerk & Zanen

Tabel 28. Omzettingssnelheden in de aërobe reactor voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|---------------------------------|
| CZV | - 0,8 | - 1,0 | - 0,6 | - 0,6 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | 0 | 0 | - 0,3 | - 0,3 | mg BZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | - 0,5 | - 0,6 | - 1,0 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | - 0,4 | 0 | - 0,7 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV | - 0,6 | - 0,8 | 0** | - 0,9 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB-CZV | - 0,3 | - 0,5 | 0 | - 0,4 | mg PHB-CZV/g ds. h |

** : alleen PHB omzetting

RWZI GROESBEEK

Werking van de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies

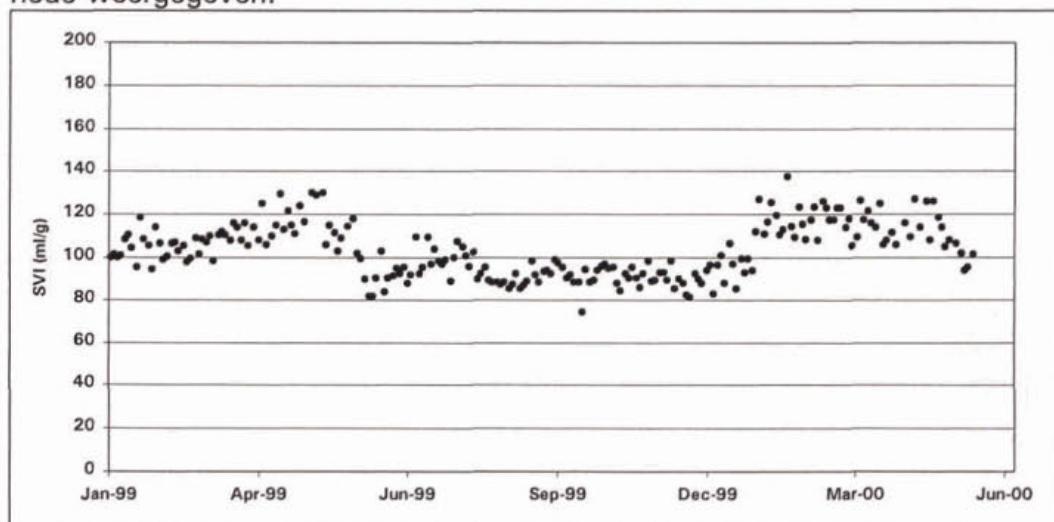
In tabel 29 zijn de gemiddelde concentraties in influent, effluent en de algemene kengetallen gedurende de vier meetsessies weergegeven.

Tabel 29. Gemiddelde concentraties in influent en effluent en algemene kengetallen van rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies

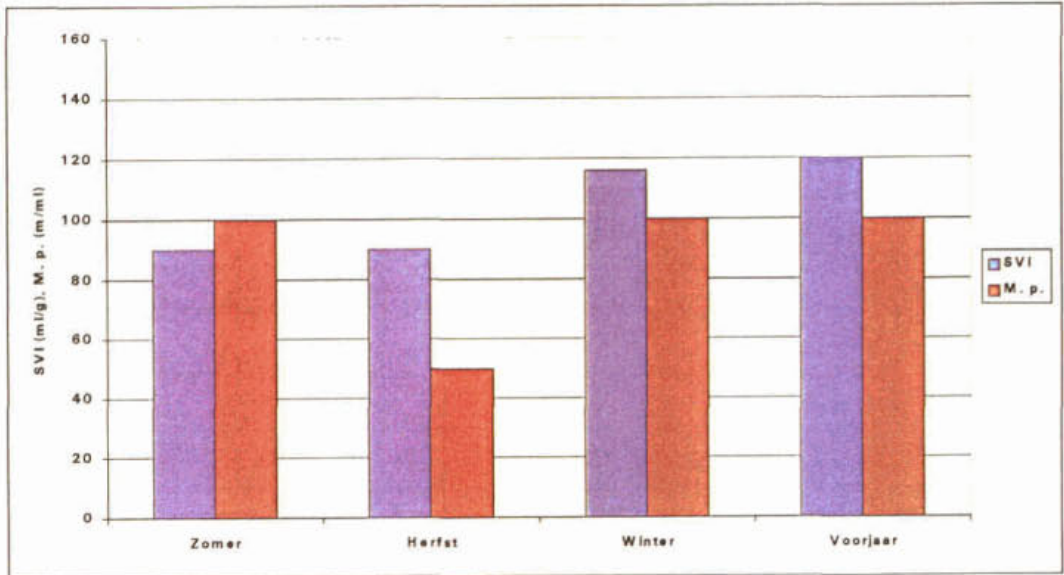
| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------------------------------------|-------|--------|--------|----------|----------------|
| INFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV | 443 | 470 | 348 | 408 | mg/l |
| - BZV ₅ | 173 | 205 | 148 | 192 | mg/l |
| - Lagere vetzuren (gefilt.) | | 10 | 17 | 20 | mg/CZV/l |
| - Hogere vetzuren | | 56 | 73 | 30 | mg CZV/l |
| - Nkj | 39 | 48 | 36 | 49 | mg/l |
| - NH ₄ -N | 26 | 36 | 23 | 33 | mg/l |
| - Ptot | 6 | 7,8 | 5 | 7,2 | mg/l |
| - BZV/N | 4,4 | 4,3 | 4,1 | 3,9 | |
| - BZV/P | 28,8 | 26,2 | 29,6 | 26,7 | |
| EFFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV (mg/l) | 35 | 23 | 39 | 24 | mg/l |
| - BZV ₅ (mg/l) | 5 | 2 | 5 | 2,5 | mg/l |
| - Nkj (mg/l) | 2,6 | | | | mg/l |
| - NH ₄ -N (mg/l) | | 0,6 | 5,9 | 0,4 | mg/l |
| - NO ₃ -N + NO ₂ -N (mg/l) | 0,3 | 0,4 | 4,7 | 2,3 | mg/l |
| - Ptot (mg/l) | | 0,4 | 1,2 | 0,6 | mg/l |
| Temperatuur | 19 | 16 | 10,5 | 13 | °C |
| SVI | 90 | 90 | 116 | 120 | ml/g |
| %P in slib | 2,7 | 2,8 | 2,5 | 2,2 | % |
| Slibbelasting BZV* | 0,036 | 0,043 | 0,046 | 0,051 | kg BZV/kg ds d |
| N* | 0,009 | 0,010 | 0,011 | 0,013 | kg N/kg ds. d |

*: exclusief anaërobe reactor

In figuur 36 is het SVI-verloop van de rwzi Groesbeek gedurende de meetperiode weergegeven.

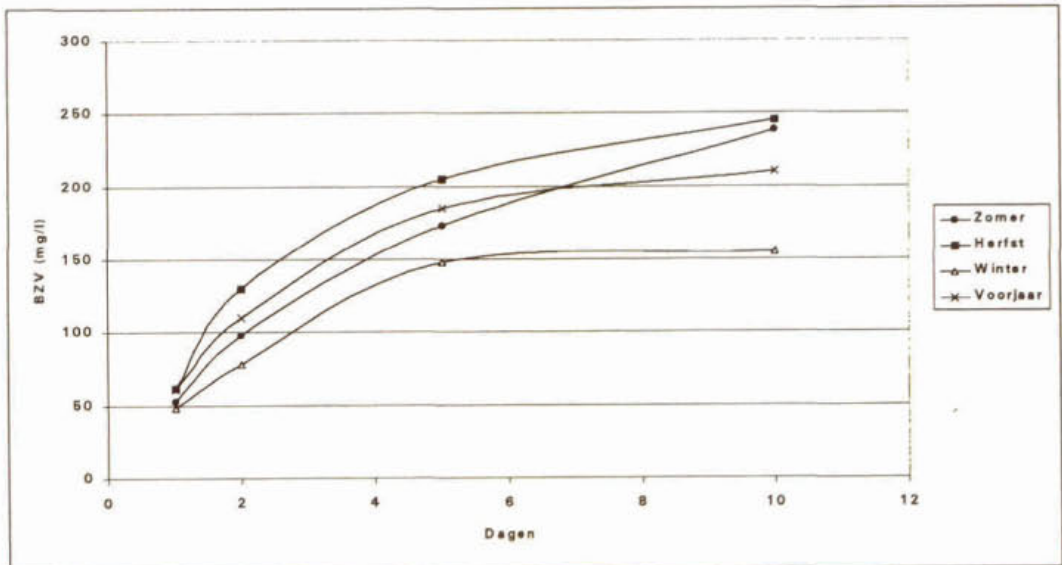


Figuur 36. SVI-verloop van de rwzi Groesbeek gedurende de meetperiode



Figuur 37. SVI (ml/g) en de telling van *Microthrix parvicella* (M.p. in m/ml) rwzi Groesbeek

In figuur 38 is het verloop van de BZV-concentratie van het influent van de rwzi Groesbeek weergegeven. In tabel 30 zijn naast CZV en BZV_5 ook de k_{BZV} en BZV_∞ weergegeven.



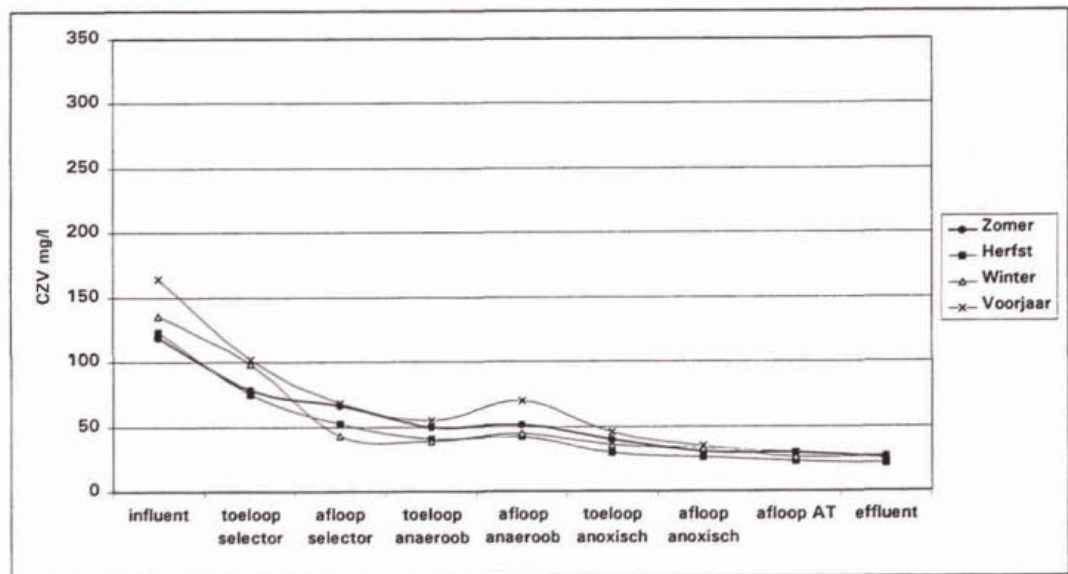
Figuur 38. BZV-curven van het influent van de rwzi Groesbeek gedurende de vier meet sessies

Tabel 30. CZV, BZV₅, k_{BZV}, BZV_∞ van het influent van de rwzi Groesbeek in het influent

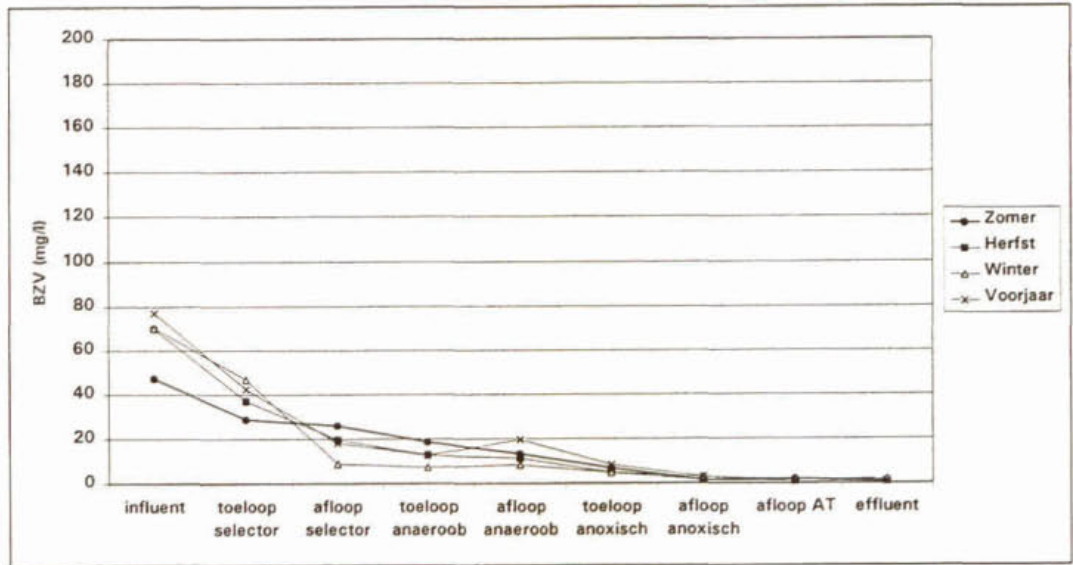
| Meetsessie | CZV (mg/l) | BZV _∞ (mg/l) | BZV ₅ (mg/l) | K _{BZV} (d ⁻¹) |
|------------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Zomer | 443 | 269 | 173 | 0,22 |
| Herfst | 470 | 257 | 205 | 0.32 |
| Winter | 348 | 167 | 148 | 0,36 |
| Voorjaar | 408 | 228 | 192 | 0.33 |

Concentratieprofielen

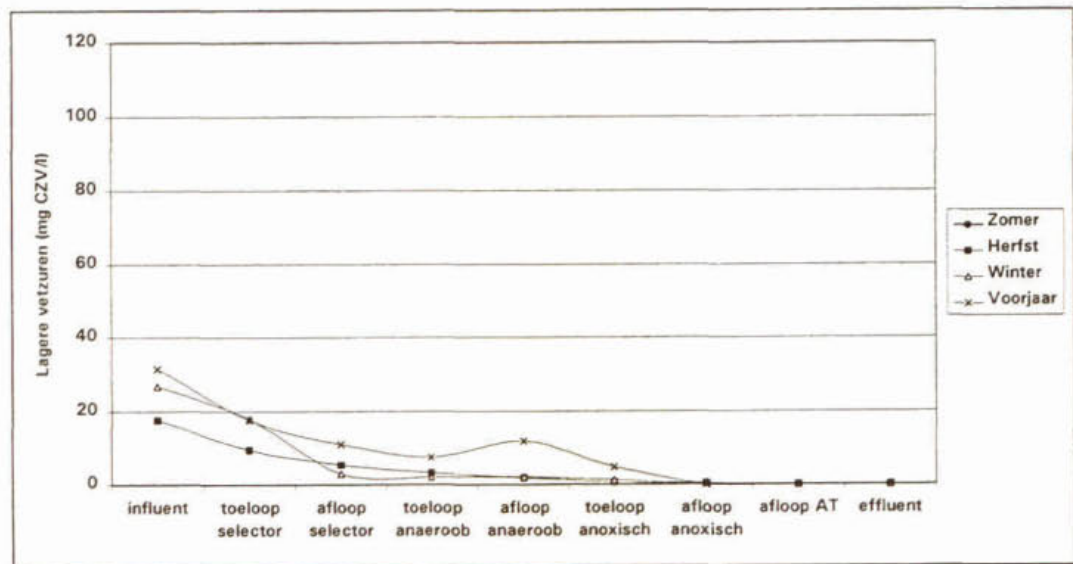
In figuur 39 tot en met figuur 45 zijn de concentratieverlopen van verschillende componenten in de rwzi Groesbeek weergegeven.



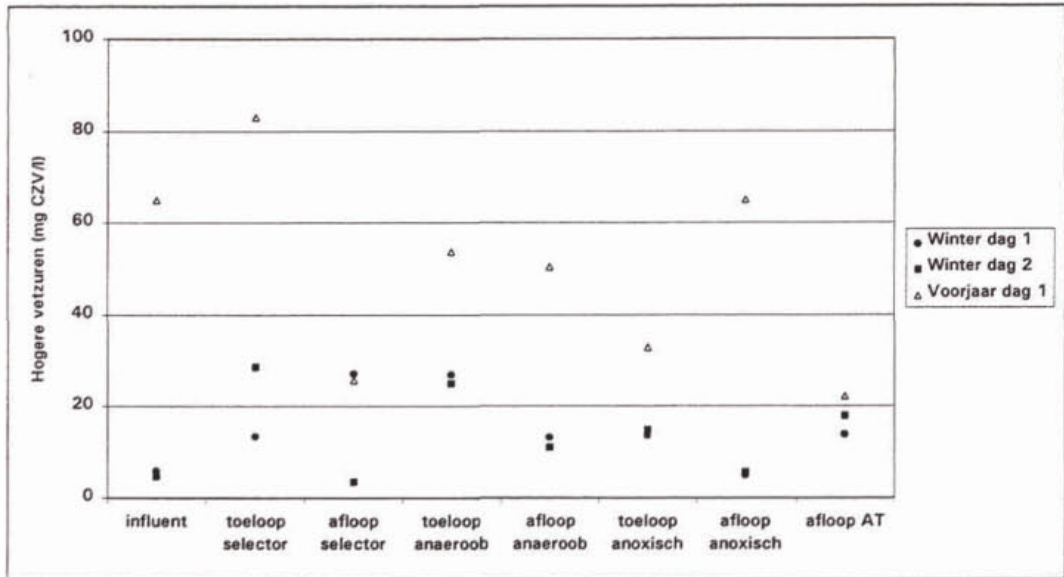
Figuur 39. Concentratieverloop van opgelost CZV in de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies



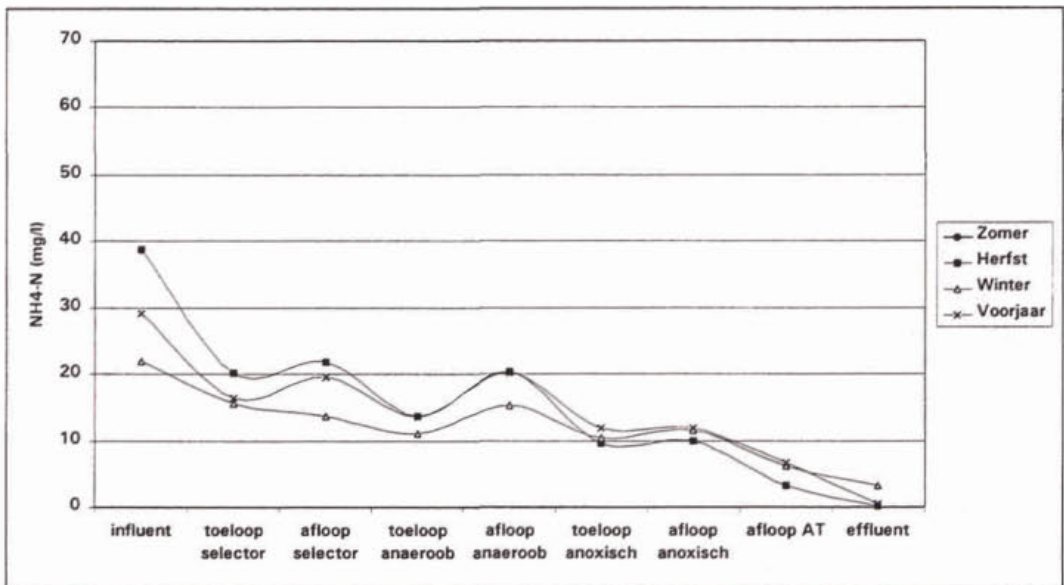
Figuur 40. Concentratieverloop van BZV₅ in de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies



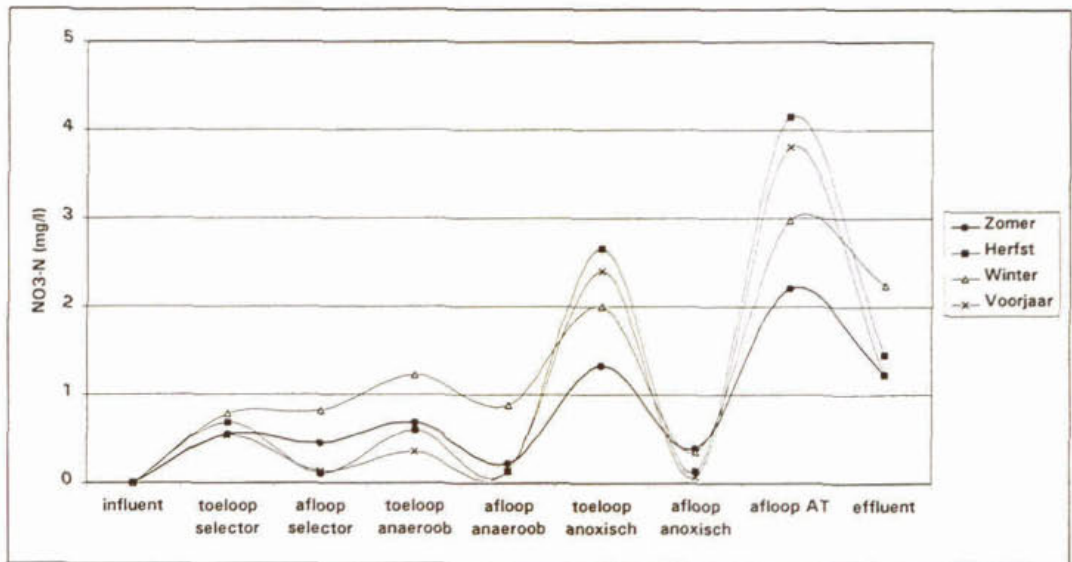
Figuur 41. Concentratieverloop van lagere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies



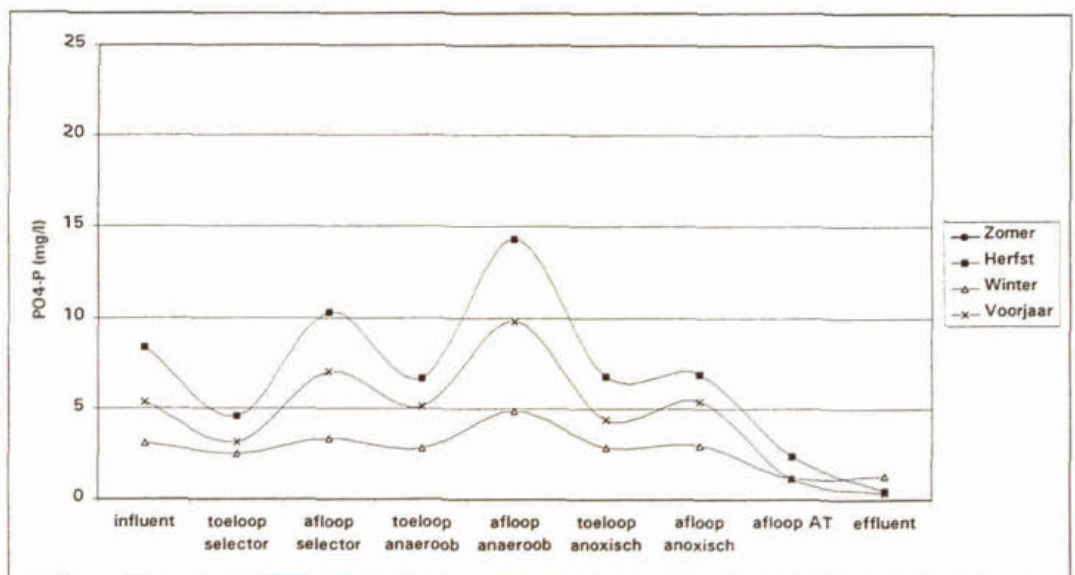
Figuur 42. Concentratieverloop van hogere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies



Figuur 43. Concentratieverloop van ammonium (mg NH₄-N/l) in de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies



Figuur 44. Concentratieverloop van nitraat (mg NO₃-N/l) in de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies



Figuur 45. Concentratieverloop van fosfaat (mg PO₄-P/l) in de rwzi Groesbeek gedurende de vier meetsessies

Omzettingssnelheden rwzi Groesbeek

Selector rwzi Groesbeek

Tabel 31. Omzettingssnelheden in de selector voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|--------|--------|--------|----------|------------------------------|
| CZV | - 26,3 | - 13,9 | - 76,6 | - 28,9 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | - 20,5 | - 10,9 | - 53,7 | - 20,6 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | - 2,8 | - 41,6 | - 6,0 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | | 0,31 | - 2,4 | - 2,1 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | - 0,31 | 0,9 | - 0,3 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | | 3,1 | 1,0 | 3,0 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV | 14,8 | 13,2 | 25,1 | 10,1 | mg PHA-CZV/g ds.h |
| PHB-CZV | 9,6 | 7,0 | 14,1 | 5,9 | mg PHB-CZV/g ds. h |

Anaërobe reactor rwzi Groesbeek

Tabel 32. Omzettingssnelheden in de anaërobe reactor voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-----------|--------|-----------|-----------|------------------------------|
| CZV | 1,5 | - 0,8 | 7,4 | 14,4 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | - 2,1 | - 0,6 | - 0,1 | 5,9 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | - 0,6 | 0,2 | 1,4 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | | 2,9 | 3,0 | 5 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | - 0,2 | 0,0 | - 0,2 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | | 2,9 | 1,3 | 3,1 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV* | - 3,4/3,0 | 5,7 | - 5,1/8,4 | -0,8/1,2 | mg PHA- CZV/g ds.h |
| PHB-CZV* | -2,3/0,1 | 2,9 | -2,0/4,9 | -2,7/-0,5 | mg PHB - CZV/g ds.h |

*: Door de wijze van berekening (m.b.v. massabalans over de reactor) werd op twee opeenvolgende zowel een opslag van reservestoffen (positieve waarde) als een omzetting van reservestof (negatieve waarde) berekend

Anoxische reactor rwzi Groesbeek

Tabel 33: Omzettingssnelheden in de anoxische reactor voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|------------------------------|
| CZV | - 5,4 | -1,3 | - 1,5 | - 4,5 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | - 2,9 | - 1,3 | - 1,0 | - 2,3 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | - 0,2 | - 0,3 | - 1,9 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | | 0,1 | 0,6 | 0,1 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | - 1,0 | - 1,0 | - 0,9 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | | 0 | 0,1 | 0,4 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV | - 1,9 | - 1,7 | 1,2 | 1,1 | mg PHA - CZV/g ds.h |
| PHB-CZV | -1,6 | -1,3 | 1,2 | 0,8 | mg PHB - CZV/g ds.h |

Aërobe reactor 1 rwzi Groesbeek

Tabel 34: Omzettingssnelheden in de aërobe reactor 1 voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|------------------------------|
| CZV | - 0,2 | - 0,9 | - 2,2 | - 1,4 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | 0,0 | 0 | - 0,5 | - 0,5 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | | - 1,6 | - 1,9 | - 1,5 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | 1,0 | 1,0 | 1,0 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | | - 1,1 | - 0,7 | - 1,2 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV | 4,5 | 2,7 | 3,9 | 2,3 | mg PHA - CZV/g ds.h |
| PHB-CZV | 3,1 | 2,1 | 3,4 | 2,0 | mg PHB - CZV/g ds.h |

Omloopstelsel rwzi Groesbeek

Tabel 35: Omzettingssnelheden in het omloopstelsel voor verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|------------------------------|
| CZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| BZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| lagere vetzuren | | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds.h |
| NH ₄ -N | | - 0,1 | - 0,3 | - 0,4 | mg NH ₄ -N/g ds.h |
| NO ₃ -N | | - 0,1 | - 0,1 | - 0,2 | mg NO ₃ -N/g ds.h |
| PO ₄ -P | | 0,1 | 0,0 | 0 | mg PO ₄ -P/g ds.h |
| PHA-CZV | 0,2 | 0,0 | 0,0 | -0,2 | mg PHA - CZV/g ds.h |
| PHB-CZV | 0,2 | 0,0 | 0,0 | -0,2 | mg PHB - CZV/g ds.h |

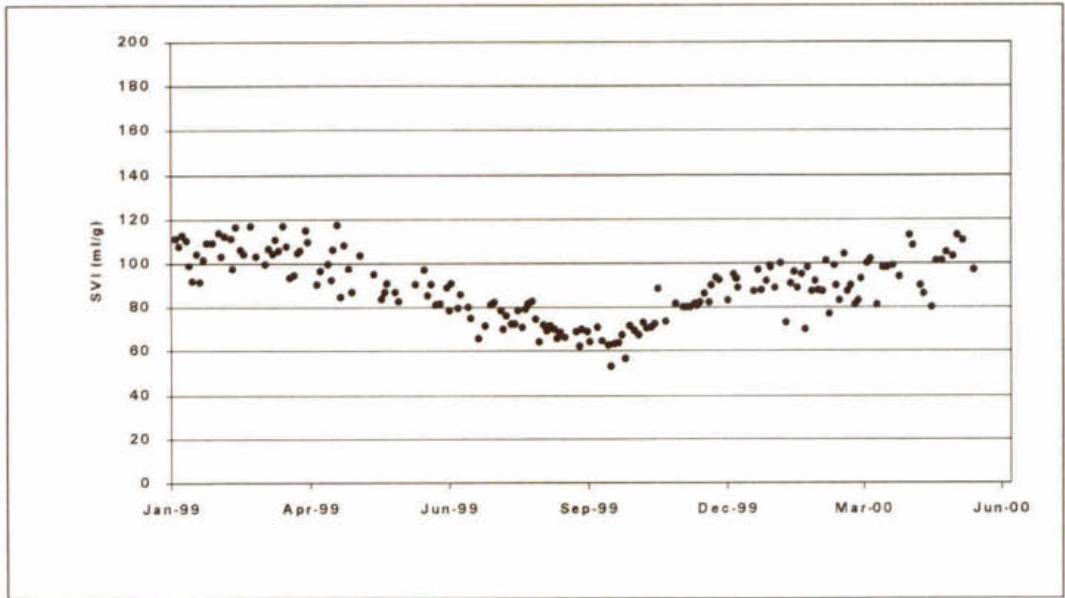
RWZI HARDENBERG

Werking van de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies

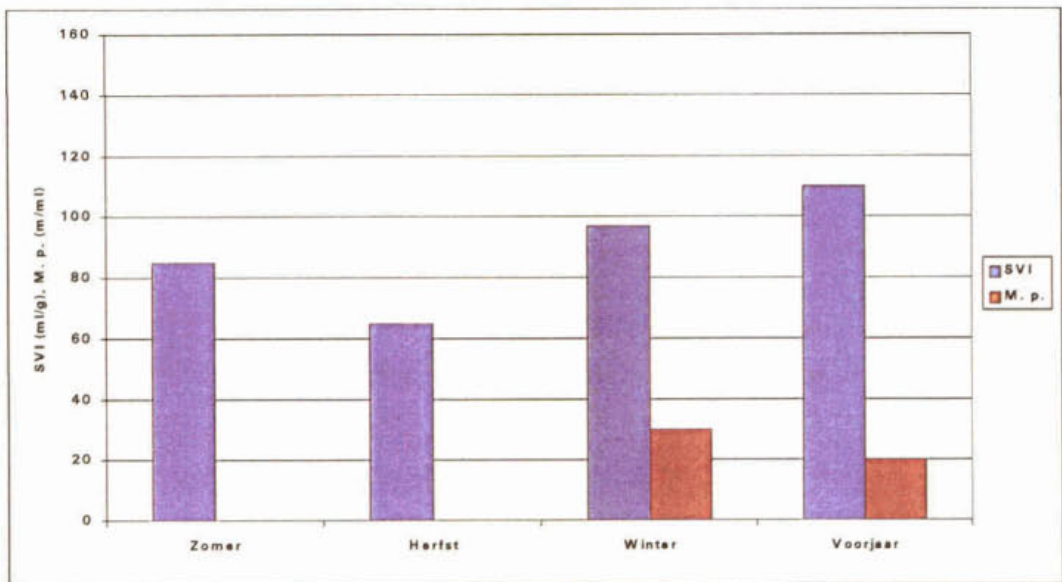
Tabel 36: Gemiddelde concentraties in influent en effluent en algemene kengetallen van de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------------------------------------|-------|--------|--------|----------|-----------------|
| INFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV | 532 | 536 | 445 | 708 | mg/l |
| - BZV ₅ | 193 | 198 | 205 | 273 | mg/l |
| - Lagere vetzuren | | 75,5 | 21,6 | 74,7 | mg CZV/l |
| - Hogere vetzuren | | 67 | 30,7 | 41,8 | mg CZV/l |
| - Nkj | 48 | 67,3 | 51,9 | 86 | mg/l |
| - NH ₄ -N | | 47,2 | 38,1 | 62,3 | mg/l |
| - Ptot | 4,4 | 7,7 | 5,2 | 9,6 | mg/l |
| - Ortho-P | | 4,8 | | | mg/l |
| - BZV/N | 4,0 | 2,9 | 3,0 | 3,2 | - |
| - BZV/P | 43,9 | 25,7 | 30,3 | 28,4 | - |
| EFFLUENT (24 -h) | | | | | |
| - CZV (mg/l) | 27,5 | 33,5 | 43 | 45 | mg/l |
| - BZV ₅ (mg/l) | 3,1 | 2,7 | 3,4 | 3,0 | mg/l |
| - Nkj (mg/l) | | 2,1 | 2,1 | 2,1 | mg/l |
| - NH ₄ -N (mg/l) | < 0,5 | <0,1 | 0,15 | <0,1 | mg/l |
| - NO ₃ -N + NO ₂ -N (mg/l) | 1,58 | 2,75 | 3,76 | 2,95 | mg/l |
| - ortho-PPtot (mg/l) | <0,12 | 0,13 | 0,02 | 0,03 | mg/l |
| Temperatuur | 20 | 16 | 9 | 14 | °C |
| SVI | 85 | 65 | 97 | 110 | ml/g |
| %P in slib | 2,8 | 2,5 | 2,6 | 3,2 | % |
| Slibbelasting BZV* | 0,022 | 0,025 | 0,023 | 0,031 | kg BZV/kg ds. d |
| N* | 0,006 | 0,009 | 0,006 | 0,010 | kg N/kg ds. d |

In figuur 46 is het SVI-verloop van de rwzi Hardenberg gedurende de meetperiode weergegeven.

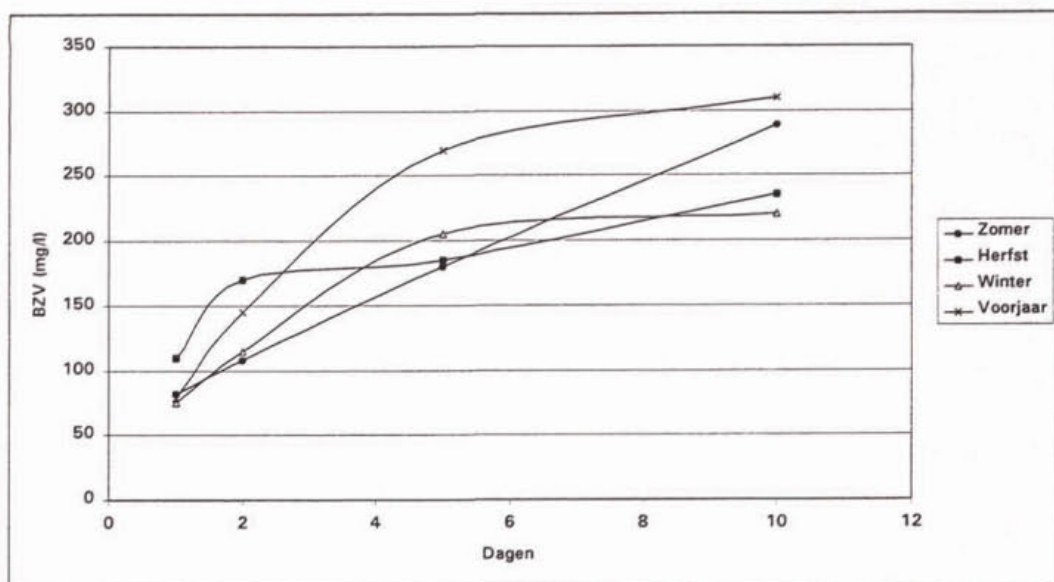


Figuur 46. SVI-verloop van de rwzi Hardenberg gedurende de meetperiode



Figuur 47. SVI (ml/g) en de telling van *Microthrix parvicella* (M.p. in m/ml) rwzi Hardenberg

In figuur 48 is het verloop van de BZV concentratie van het influent van de rwzi Hardenberg weergegeven. De k_{BZV} en BZV_{∞} zijn met behulp van deze BZV-curven bepaald (tabel 37).



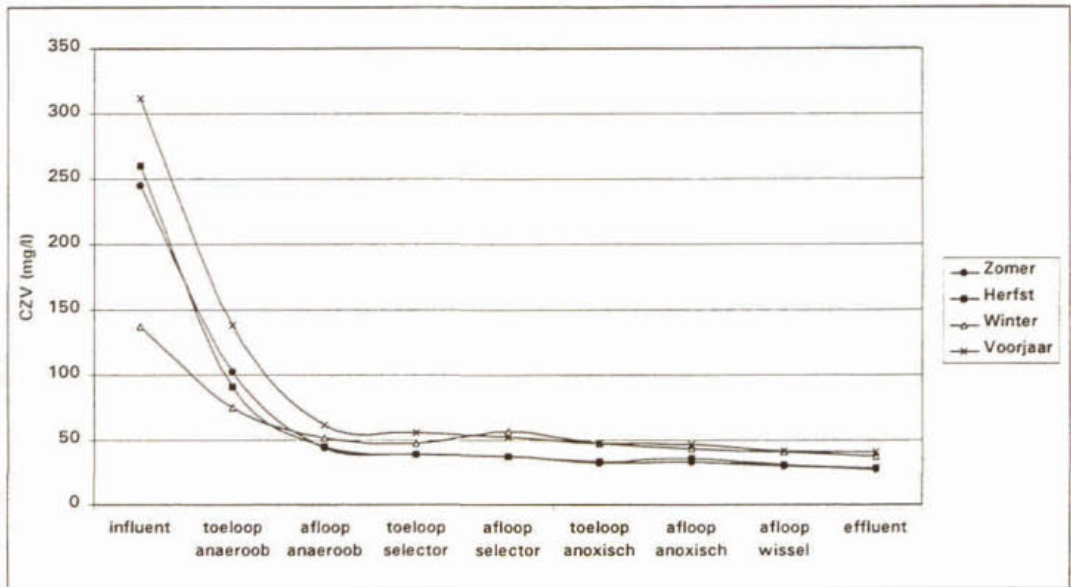
Figuur 48: BZV curven van het influent van de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies

Tabel 37: CZV, BZV₅, k_{BZV}, BZV_∞ van het influent van de rwzi Hardenberg gedurende de meetsessies

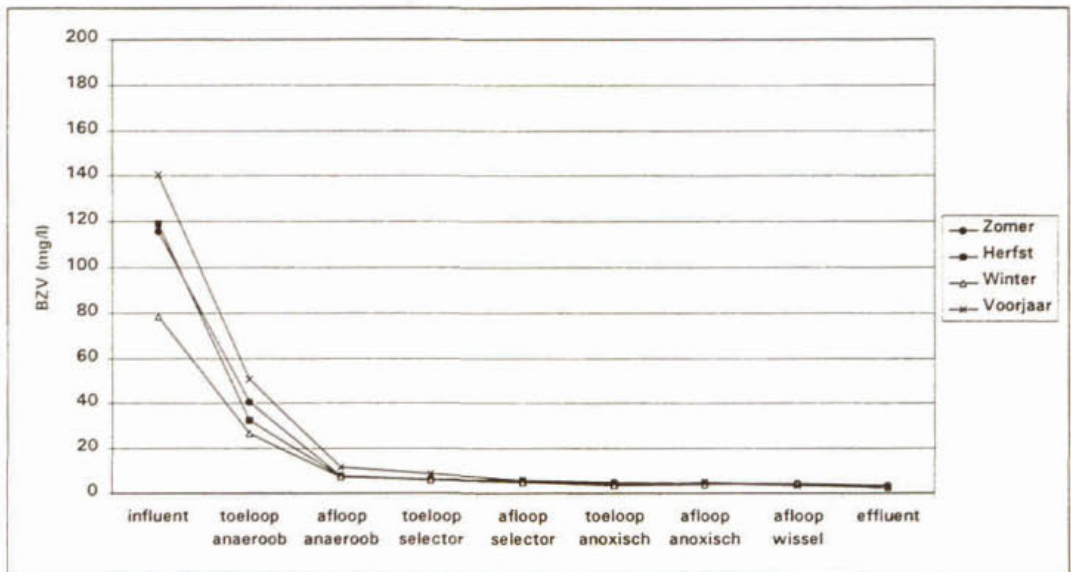
| Meet sessie | CZV (mg/l) | BZV _∞ (mg/l) | BZV ₅ (mg/l) | k _{BZV} (d ⁻¹) |
|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Zomer | 532 | - | 193 | - |
| Herfst | 536 | 235 | 198 | 0,57 |
| Winter | 445 | 227 | 205 | 0,40 |
| Voorjaar | 708 | 325 | 273 | 0,32 |

Concentratieprofielen

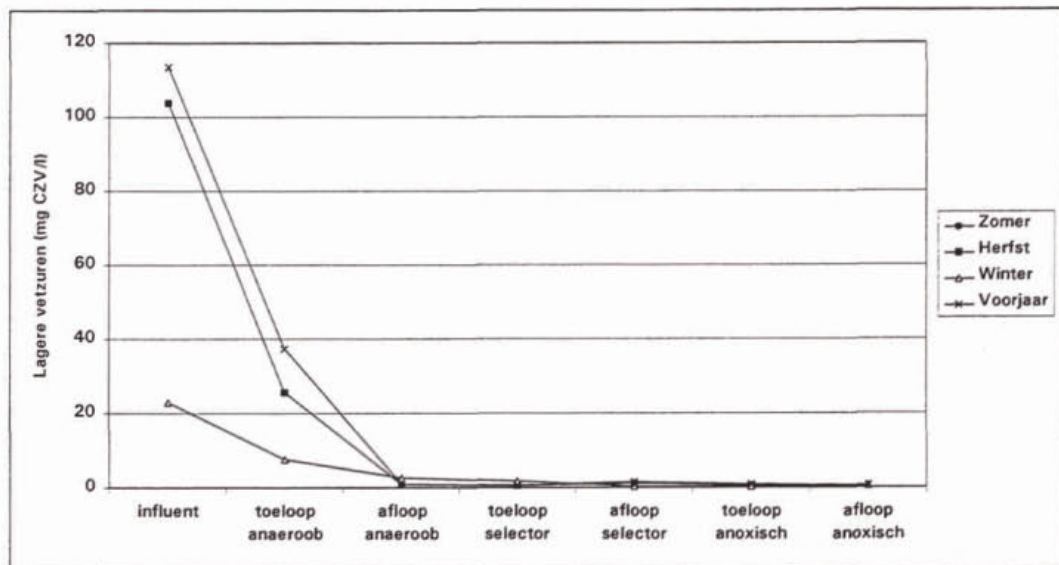
In figuur 49 tot en met figuur 55 zijn de concentratieverlopen van de verschillende componenten in de rwzi Hardenberg weergegeven.



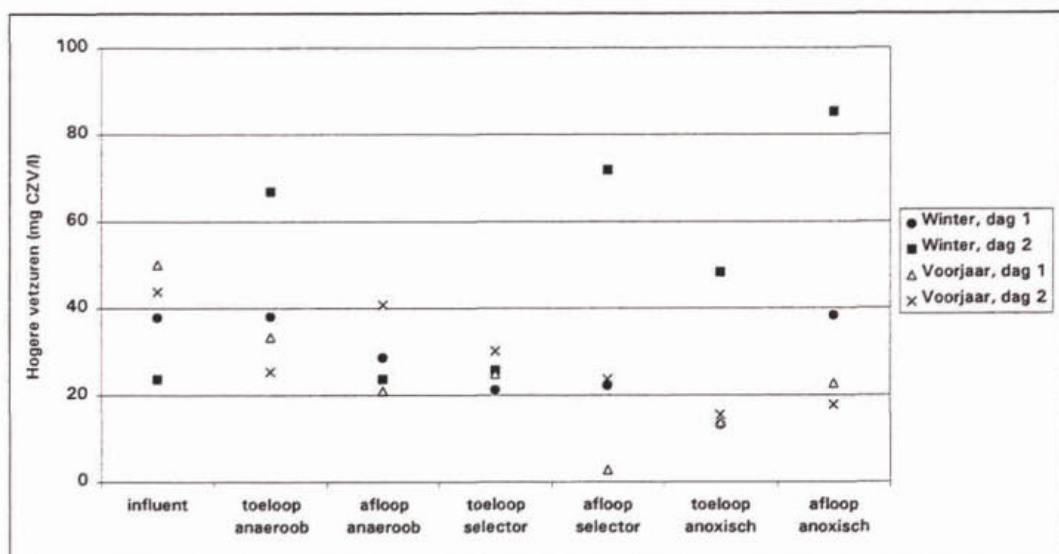
Figuur 49. Concentratieverloop van opgelost CZV in de rwzi Hardenberg gedurende de vier meet sessies



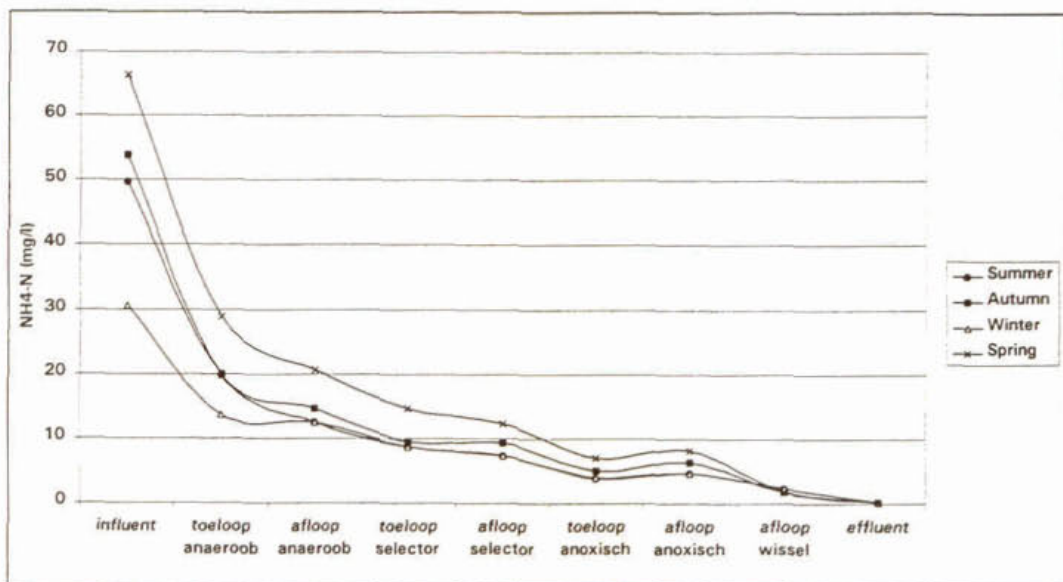
Figuur 50. Concentratieverloop BZV's in de rwzi Hardenberg gedurende de vier meet sessies



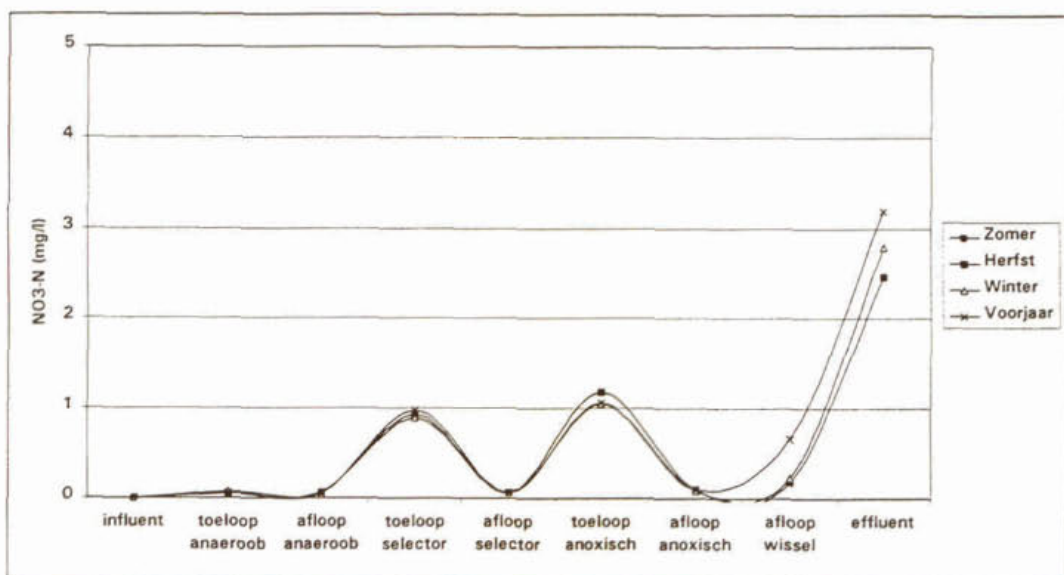
Figuur 51. Concentratieverloop van lagere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies



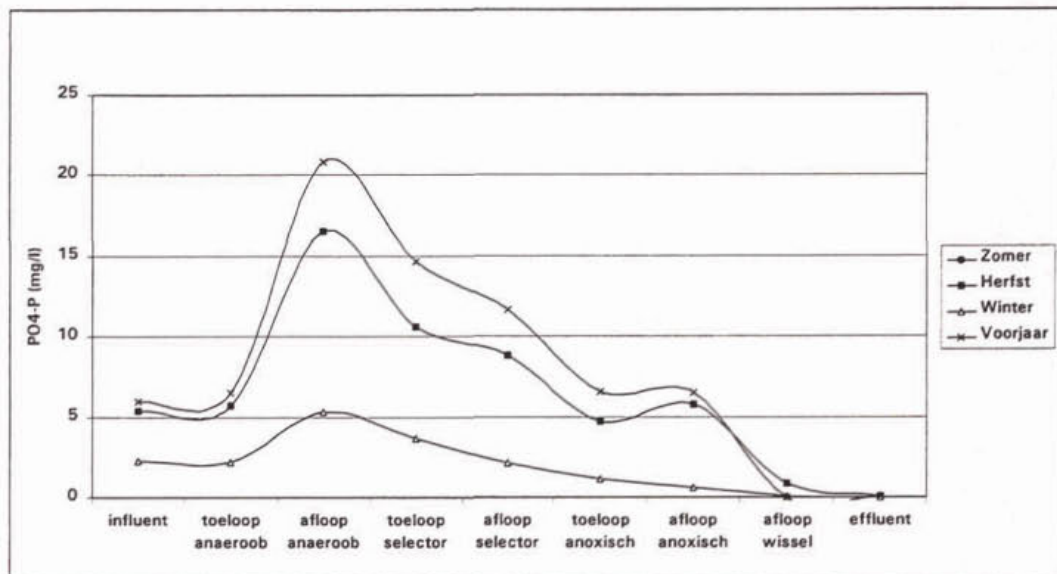
Figuur 52. Concentratieverloop van hogere vetzuren (mg CZV/l) in de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies



Figuur 53. Concentratieverloop van ammonium (mg NH₄-N/l) in de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies



Figuur 54. Concentratieverloop van nitraat (mg NO₃-N/l) in de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies



Figuur 55. Concentratieverloop van fosfaat (mg PO₄-P/l) in de rwzi Hardenberg gedurende de vier meetsessies

Omzettingssnelheden

Anaërobe reactor rwzi Hardenberg

Tabel 38: Omzettingssnelheden van verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies in de anaërobe reactor

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|---------------------------------|
| CZV | -12,2 | - 11,1 | - 5,4 | - 17,6 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | - 7,7 | - 6,2 | - 5,1 | - 8,9 | mg BZV/g ds. h |
| Lagere vetzuren | | - 5,9 | - 1,1 | - 6,3 | mg CZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | - 1,4 | - 0,3 | - 2,00 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | 2,5 | 0,8 | 3,2 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV | 5,8 | 4,2 | 1,6** | 5,9 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB - CZV | 3,6 | 2,3 | 1,6 | 3,3 | mg PHB-CZV/g ds. h |

** : alleen PHB omzetting

Selector rwzi Hardenberg

Tabel 39: Omzettingssnelheden in de selector van verschillende componenten gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|-----------|----------|----------|---------------------------------|
| CZV | - 0,7 | -0,5 | - 1,5 | - 2,0 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | - 0,3 | - 0,1 | - 0,8 | - 1,4 | mg BZV/g ds. h |
| Lagere vetzuren | | 0 | - 1,0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | 0 | - 0,8 | -1,4 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | | -0,5 | - 0,5 | - 0,6 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | - 1,0 | - 1,0 | - 1,9 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV* | - 1,5 | -0,48/1,8 | - 4,95** | - 6,1 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB - CZV* | - 0,8 | - 0,4/1,5 | - 4,95 | - 3,9 | mg PHB-CZV/g ds. h |

*: Door de wijze van berekening (m.b.v. massabalans over de reactor) werd op twee aaneenvolgende zowel een opslag van reservestoffen (positieve waarde) als een omzetting van reservestof (negatieve waarde) berekend

** : alleen PHB omzetting

Anoxische reactor rwzi Hardenberg

Tabel 40: Omzettingssnelheden van de verschillende componenten in de anoxische reactor gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|--------|----------|---------------------------------|
| CZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg BZV/g ds. h |
| Lagere vetzuren | | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | 0,3 | 0,1 | 0,2 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | | - 0,3 | - 0,2 | - 0,2 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | 0,2 | - 0,1 | 0,0 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV | -1,9 | - 0,1 | 1,0** | - 0,9 | mg PHA - CZV/g ds. h |
| PHB - CZV | - 1,2 | 0,1 | 1,0 | - 0,3 | mg PHB - CZV/g ds. h |

** : Alleen PHB omzetting

Wisselreactor rwzi Hardenberg

Tabel 41: Omzettingssnelheden van de verschillende componenten in de wisselreactor gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-----------|--------|---------|----------|---------------------------------|
| CZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | 0 | 0 | 0) | 0) | mg BZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | - 0,4 | - 0,1 | - 0,5 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | | - 0,2 | - 0,2 | - 0,1 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | - 0,5 | - 0,1 | - 0,7 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV* | 1,2/ -1,1 | - 1,2 | - 0,1** | - 0,7 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB - CZV* | 1,1/-0,5 | - 0,8 | - 0,1 | - 0,4 | mg PHB-CZV/g ds. h |

*: Door de wijze van berekening (m.b.v. massabalans over de reactor) werd op twee aaneenvolgende zowel een opslag van reservestoffen (positieve waarde) als een omzetting van reservestof (negatieve waarde) berekend

** : Alleen PHB omzetting

Aërobe reactor rwzi Hardenberg

Tabel 42: Omzettingssnelheden van de verschillende componenten in de aërobe reactor gedurende de verschillende meetsessies

| Meetsessie | Zomer | Herfst | Winter | Voorjaar | Eenheid |
|--------------------|-------|--------|---------|----------|---------------------------------|
| CZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg CZV/g ds. h |
| BZV | 0 | 0 | 0 | 0 | mg BZV/g ds. h |
| NH ₄ -N | | - 0,1 | - 0,1 | - 0,1 | mg NH ₄ -N/g ds. h |
| NO ₃ -N | | 0,1 | 0,1 | 0,1 | mg NO ₃ -N g/g ds. h |
| PO ₄ -P | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | mg PO ₄ -P/g ds. h |
| PHA-CZV | - 0,8 | - 0,3 | - 0,4** | - 0,8 | mg PHA-CZV/g ds. h |
| PHB - CZV | - 0,6 | 0,0 | - 0,4 | - 0,4 | mg PHB-CZV/g ds. h |

** : alleen PHB omzetting

BIJLAGE 2

**FOTO'S VAN DE EERSTE PROCESREACTOREN EN
DE BELUCHTINGSREACTOREN VAN DE BETREF-
FENDE RWZI'S.**

RWZI ALPHEN KERK & ZANEN

Anaerobe reactor



Anoxische/aerobe reactor



RWZI GROESBEEK

Anaerobe, anoxische en aerobe reactor



Anoxische/aerobe reactor



RWZI HARDENBERG

Anaerobe reactor en anoxische reactor



Aerobe reactor en wisselreactor



