

stowa

SLIBAFBRAAK DOOR OLIGOCHAETEN



RAPPORT

2010
09

SLIBAFBRAAK DOOR OLIGOCHAETEN

RAPPORT

2010

09

ISBN 978.90.5773.464.9



COLOFON

UITGAVE STOWA, Amersfoort 2010

PROJECTUITVOERING

ir. J. Tamis (TU Delft / SR Technologie BV)
ir. G. van Schouwenburg (SR Technologie BV)
dhr. H. Bronckhorst (BMI Techniek)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

ir. A.W.A de Man (Waterschapsbedrijf Limburg)
ir. ing. W. Gerittse (Waterschap Rivierenland)
ing. K.J. Agema (Wetterskip Fryslân)
drs. ing. M.P.A.M Augustijn (Waterschap Zeeuwse eilanden)
prof. dr. ir. M.C.M van Loosdrecht (TU Delft)
ir. C.A. Uijterlinde (STOWA)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2010-09
ISBN 978.90.5773.464.9

SAMENVATTING

Het verwerken van slib is een belangrijke kostenpost van het waterzuiveringsproces. Naar verwacht zullen deze kosten de komende jaren alleen maar verder toenemen.

SR Technologie bv heeft een proces ontwikkeld waarbij deze kosten kunnen worden gereduceerd en tegelijkertijd energie wordt geproduceerd. Het proces kan toegepast worden voor het verwerken van surplus of secundair slib. Dit proces is op semi-industriële schaal gedurende 2 jaar op de RWZI van het Wetterskip Fryslân in Wolvega getest in samenwerking met de TU Delft en Alterra. Dit rapport geeft de resultaten van deze testen.

Het proces bestaat uit twee stappen. In de eerste stap wordt het slib door aquatische oligochaeten “begrasd” in een wormenreactor met een verblijftijd van 5-10 uur. Hierbij wordt een deel van het slib afgebroken en het rest-slib wordt ontsloten voor de volgende stap.

In de tweede stap wordt het resterende slib ontwaterd en verder afgebroken bij omgevingstemperatuur. Hierbij komt biogas vrij. Mogelijk zijn door wormen uitgescheiden enzymen betrokken bij deze omzetting. Deze tweede stap is nog niet geoptimaliseerd; laboratorium experimenten uitgevoerd door TU Delft geven aan dat per ton ds toegevoerd slib ongeveer $200 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ wordt geproduceerd bij een verblijftijd van 80 dagen onder psychrofiële omstandigheden ($4-20^\circ\text{C}$).

Door deze aanvullende tweede stap is een stabiel en robuust proces ontstaan voor het verwerken van secundair slib. Gedurende de test op praktijkschaal in Wolvega over 2 jaar werd in totaal 303 ton ds [drogestof] slib behandeld. De afbraak was 193 ton ds; een afbraak percentage van 64%. Tijdens het onderzoek is veel aandacht uitgegaan naar de factoren en processen die de continuïteit en betrouwbaarheid van het proces bepalen. Zo is er een methode ontwikkeld voor het beheersen van de populatiegroei en het beïnvloeden van het nestelgedrag van de wormen. Het is gebleken dat wormen eenvoudig kunnen worden overgeënt zodat bij calamiteiten de wormenpopulatie snel weer kan worden aangevuld en het effect op de afbraak geneutraliseerd wordt.

Kenmerken van het proces zijn:

- Kan als een extra processtap worden toegevoegd aan bestaande zuiveringen voor de verwerking van het surplusslib of het retourslib
- Levert een drogestof afbraak van secundair slib op van 60-70%;
- Het proces heeft een positieve bruto energiebalans van 104 MJ/ie_{136}

Zware metalen en PCB's, bleven gebonden aan het restslib en waren aan het einde van het proces proportioneel met de afbraak van de droge stof toegenomen in het rest-slib. Kleine hoeveelheden stikstof en fosfaat kwamen vrij, resulterend in een extra belasting van de zuivering van 7% en 5,5% respectievelijk als al het slib van een zuivering op deze wijze wordt verwerkt. Het rest-slib bleek goed ontwaterbaar op een filterpers en kon op traditionele wijze verwerkt worden. De anorganische fractie nam slechts beperkt toe maar minder dan zou worden verwacht. Dit komt waarschijnlijk doordat een deel van de anorganische fractie is omgezet en via de waterfase is afgevoerd; dit is nog een belangrijk onderzoekspunt. De wormenbiomassa die in de eerste stap is geproduceerd, wordt in de tweede stap afgebroken tot voornamelijk biogas.

Proeven met pilot installaties op verschillende typen zuiveringen [met en zonder voorbezinking; met en zonder bio-P] hebben aangetoond dat het proces kan worden toegepast op veel van de in Nederland bestaande laagbelaste zuiveringen. Wel is gebleken dat hoge gehalten aan draadvormende bacteriën het proces negatief beïnvloeden. Op een van de pilots waar de SVI boven de 300 ml/g lag, bleken de wormen niet te groeien. IJzer en aluminium dosering beïnvloedden de afbraak door de wormen niet.

Op basis van de ervaringen opgedaan in Wolvega is een nieuw processchema en reactorontwerp gemaakt. De bruto investeringen voor een typische RWZI van 50.000 ie_{136} (1.000 ton ds spuislib per jaar) worden geraamd op ongeveer € 700.000. Deze installatie breekt per jaar 650 ton ds af.

De belangrijkste motivatie voor dit onderzoek is het realiseren van besparingen in het verwerken van slib, met als randvoorwaarden een betrouwbaar en robuust proces. Dit onderzoek heeft aangetoond dat dit proces aan deze voorwaarden voldoet.

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

SLIBAFBRAAK DOOR OLIGOCHAETEN

INHOUD

| | | |
|----------|---|-----------|
| | TEN GELEIDE | |
| | SAMENVATTING | |
| | STOWA IN HET KORT | |
| 1 | INLEIDING | 1 |
| | 1.1 Aanleiding en doel | 1 |
| | 1.2 Opzet van het onderzoek | 2 |
| 2 | AQUATISCHE OLIGOCHAETEN EN SLIBAFBRAAK | 4 |
| | 2.1 Historie | 4 |
| | 2.2 Mengculturen | 5 |
| 3 | MATERIAAL EN METHODEN | 6 |
| | 3.1 Reactoren | 6 |
| | 3.1.1 Processchema praktijkschaal wormenreactor | 6 |
| | 3.1.2 Operationele parameters | 7 |
| | 3.1.3 Ontwerp en bedrijfsvoering praktijkschaal wormenreactor | 7 |
| | 3.1.4 Sedimentatietank als anaerobe reactor voor slibafbraak | 9 |
| | 3.1.5 Ontwerp en bedrijfsvoering pilot wormenreactors | 10 |
| | 3.1.6 Enten wormenreactor | 10 |
| | 3.2 Metingen | 10 |
| | 3.2.1 Slibafbraak | 10 |
| | 3.2.2 Bepaling fosfaat en stikstof massastromen | 11 |
| | 3.2.3 Zware metalen | 11 |
| | 3.2.4 Wormenbiomassa bepalingen | 11 |
| | 3.3 Kengetallen wormenreactor en wormbiomassa | 12 |
| 4 | SLIBAFBRAAK: RESULTATEN EN DISCUSSIE | 13 |
| | 4.1 Wormenreactor Wolvega | 14 |
| | 4.1.1 Afbraak wormenreactor 2007 (optimalisatie van de afbraak in de wormenreactor) | 14 |
| | 4.1.2 Afbraak wormenreactor 2008: (optimalisatie van de afbraak in de wormenreactor in combinatie met de sedimentatietank) | 15 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| | 4.1.3 Kengetallen wormenreactor | 15 |
| | 4.1.4 Wat gebeurt er met de wormenbiomassa? | 15 |
| 4.2 | Afbraak in de sedimentatietank | 16 |
| | 4.2.1 Afbraak sedimentatietank 2007 | 16 |
| | 4.2.2 Afbraak sedimentatietank 2008 | 17 |
| | 4.2.3 'Koude vergisting?' | 17 |
| 4.3 | Stabiliteit | 18 |
| 4.4 | Conclusie slibafbraak | 20 |
| 5 | RELEASE | 21 |
| | 5.1 Release stikstof en fosfaat | 21 |
| | 5.2 Zware metalen | 22 |
| | 5.2.1 Zware metalen in de wormen | 22 |
| | 5.2.2 Zware metalen in het restslib | 23 |
| | 5.3 Overig release | 23 |
| 6 | VERWERKING RESTSLIB | 24 |
| | 6.1 Ontwatering | 24 |
| | 6.2 Verbranding | 24 |
| 7 | NIEUW ONTWERP EN DIMENSIONERING | 25 |
| 8 | DUURZAAMHEID | 27 |
| | 8.1 Elektriciteitsverbruik | 27 |
| | 8.1.1 Energieverbruik huidige systeem | 27 |
| | 8.1.2 Energieverbruik nieuwe systeem | 28 |
| | 8.2 Biogasproductie | 29 |
| | 8.3 Netto energiebalans | 30 |
| 9 | ECONOMISCHE EVALUATIE | 31 |
| 10 | PILOTREACTOREN | 33 |
| | 10.1 Resultaten en discussie | 33 |
| | 10.2 Conclusie pilots | 34 |
| 11 | CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN | 35 |
| | REFERENTIES | 36 |
| | APPENDICES | 37 |
| 1 | Meet- en bemonsterschema | 39 |
| 2 | Massabalans slibafbraak wormenreactor | 40 |
| 3 | Specificaties RWZI 's | 41 |
| 4 | Formules kengetallen | 42 |
| 5 | Voorbeeld Wormenbiomassa dynamica | 43 |
| 6 | Formules betrouwbaarheidsintervallen | 44 |
| 7 | PCB concentraties in secundair slib RWZI Wolvega | 45 |
| 8 | Resultaten biogas productie uit wormenslib | 46 |
| 9 | Procesvoering | 48 |
| 10 | Energieverbruik nieuwe ontwerp | 50 |
| 11 | Energiebalans van de geselecteerde scenarios | 51 |

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING EN DOEL

In Nederland wordt ruim 350.000 ton drogestof aan communaal zuiveringsslib per jaar afgevoerd¹. De kosten van het verwerken van slib in de totale keten van afvalwaterbehandeling nemen steeds toe. Dit is grotendeels te wijten aan het aanscherpen van de normen en de veranderende wetgeving. Er wordt dan ook voortdurend gezocht naar methoden om deze kosten terug te dringen, bijvoorbeeld door nieuwe technologieën die moeten leiden tot minder slib productie, extra neveninkomsten, (bijvoorbeeld meer biogas productie door betere ontsluiting) of betere ontwatering.

Predatie van spuislib door wormen is een mogelijke oplossing voor de hoge kosten van slibverwerking. Aquatische Oligochaeten staan een stap hoger op de voedselketen ten opzichte van slib. De leefomstandigheden sluiten aan bij het milieu waarin de zuivering van afvalwater plaatsvindt en ze komen dan ook in RWZI's voor. Soms zelfs in zulke grote aantallen [zogenaamde bloei] dat dit leidt tot een scherpe - ongewilde- slibreductie in de RWZI. Kenmerken van het proces zijn:

- het is een biologisch proces dat veel overeenkomst vertoont met andere zuiveringsprocessen die bij het reinigen van afvalwater worden gebruikt
- verminderde slibafvoer
- het is een duurzame oplossing, waarbij gebruik gemaakt wordt van de natuurlijke voedselpiramide
- het is een proces dat makkelijk geschakeld kan worden aan bestaande processen

In 2002 is er in STOWA verband een onderzoek gedaan naar de slibreductie door wormen². Hoewel uit de studie bleek dat slib door Oligochaeten wordt afgebroken was het niet duidelijk wat de achterliggende mechanismen waren, en slaagde men er niet in om op pilot niveau een werkend proces te realiseren. De conclusie in het rapport luidde:

“Hoewel borstelwormen in diverse RWZI's vóórkomen, bevestigen de resultaten van de praktijkinventarisatie dat het predatieproces absoluut nog geen beheersbaar proces is. Slibpredatie door wormen is daarmee nog geen reëel alternatief voor een beheersbare slibreductietechniek binnen een biologisch afvalwaterzuiveringsconcept.”

SR Technologie BV is opgezet om een nieuw proces van predatie van slib door wormen te ontwikkelen en te exploiteren. In het ontwikkelde proces zitten vrijzwemmende borstelwormen gevangen in een dragermateriaal en wordt secundair slib, onder geconditioneerde omstandigheden, langs de drager geleid. In diverse proefopstellingen, onder meer op de zuiveringen van het Waterschap Rijn en IJssel in Holten en Aalten is een slibreductie van meer dan 50% van de droge stof gerealiseerd³.

1 CBS, webmagazine, 22 mei 2006

2 Stowa rapport 2002-17 “Slibpredatie door inzet van oligochaete wormen”

3 Intern TNO-rapport R2004/193: Reductie zuiveringsslib door borstelwormen: Fase 2 kweekmethoden en slibafbraak door R.T. van Houten in opdracht van Waterstromen bv en Elsdon bv; mei 2004.

In 2006 heeft SR Technologie een praktijkschaal “wormenreactor” gebouwd met een volume van 125 m³ op de RWZI in Wolvega, in samenwerking met het Wetterskip, de Friese Water Alliantie en het door de provincie Friesland geïnitieerde regionaal innovatieprogramma Fryslân Fernijt. De resultaten van deze proefopstelling waren van dien aard dat de STOWA besloten heeft onderzoek te doen naar de toepasbaarheid van wormen voor de reductie van zuiveringsslib. Dit onderzoek is medegefinancierd door het subsidieprogramma Innowator. Deelnemende partijen: SR Technologie bv, STOWA, Technische Universiteit Delft, Alterra, Wetterskip Fryslân, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Waterschap Rivierenland, Waternet, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en Waterschap Zeeuwse Eilanden.

Doel van dit onderzoek is tweeledig:

- 1 Een **validatie** van het proces op basis van de ervaringen op de RWZI in Wolvega in de jaren 2007 en 2008 waarbij onder meer gekeken is naar:
 - inpassing in het zuiveringsproces en de interactie daarmee
 - fofaat- en stikstofverwijdering
 - zware metalen
 - verdere verwerking van het restslib
 - duurzaamheid
 - kosten
 - drogestof reductie
- 2 De **universele inzetbaarheid** aan te tonen van dit proces, door op verschillende typen zuiveringen te testen of vergelijkbare resultaten kunnen worden gerealiseerd als op de RWZI in Wolvega. Of, als mocht blijken dat dit niet het geval is, wat de factoren zijn die het proces bepalen.

1.2 OPZET VAN HET ONDERZOEK

Voor de **validatie** van het proces is gebruik gemaakt van de resultaten die in 2007 en 2008 zijn verzameld van de proeven met een praktijkschaal wormenreactor in Wolvega.

Het bleek echter dat het restslib dat na de wormenreactor tijdelijk werd opgeslagen, spontaan en significant verder werd gereduceerd. De mate van reductie bleek gecorreleerd te zijn met de mate van afbraak door de wormen. Deze onverwachte ontwikkeling resulteerde er in dat na een jaar besloten is de reactor op een andere manier te bedienen zodat de resultaten van het onderzoek in twee delen uiteenvallen.

In het eerste jaar lag de nadruk op het optimaliseren van de afbraak door de wormen in de wormenreactor. In het tweede jaar is de nadruk komen te liggen op het optimaliseren van het totale proces inclusief de reductie na de wormenreactor. Dit heeft er toe geleid dat er minder nadruk kwam te liggen op de afbraak door de wormen zelf maar meer op de door de wormen teweeg gebrachte reductie in de opslag en de beste verhouding tussen de daadwerkelijke afbraak door de wormen en de verdere reductie in de opslag. Daar dit natuurlijk de nodige gevolgen heeft voor de te beantwoorden deelvragen zoals de interactie met het zuiveringsproces en de invloed op de fosfaat en stikstof verwijdering zullen deze gegevens in dit rapport apart worden gepresenteerd.

Voor het testen van de **universele inzetbaarheid** van het proces is besloten om verschillende typen zuivering te onderzoeken. Hierbij is gekozen voor:

- De aanwezigheid/afwezigheid van voorbezinking
- Biologische/chemische defosfatering

Pilot reactoren met een volume van 5 m³ zijn op een aantal zuiveringen (specificaties in appendix 3) beproefd volgens het volgende schema^{3*}:

- één RWZI met voorbezinking en biologische defosfatering
 - Amsterdam Westpoort (Waternet)
- twee RWZI's met voorbezinking en chemische defosfatering
 - Nieuwegein (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden)
 - Alkmaar (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
- twee RWZI's zonder voorbezinking en biologische defosfatering
 - Vianen (Waterschap Rivierenland)
 - Sint Maartensdijk (Waterschap de Zeeuwse eilanden)
- één RWZI zonder voorbezinking en chemische defosfatering
 - Wolvega (Wetterskip Fryslân)

Motivatie voor deze keuze was te onderzoeken of de verschillende slibtypen invloed hebben op het proces. Bij voorbezinking was de vraag in het bijzonder wat de invloed is op de afbreekbaarheid van het secundaire slib door de wormen. Wat betreft bio-P slib is het vooral interessant om te kijken in welke mate er fosfaat vrijkomt.

^{3*} De oorspronkelijke opzet was om van elk type zuivering het proces te testen in duplo. Gedurende het onderzoek is besloten dat de universele inzetbaarheid van het proces ook kon worden aangetoond met een beperkter aantal experimenten (in totaal 6 verschillende locaties) en is hier om praktische redenen van de oorspronkelijk opzet afgeweken.

2

AQUATISCHE OLIGOCHAETEN EN SLIBAFBRAAK

2.1 HISTORIE

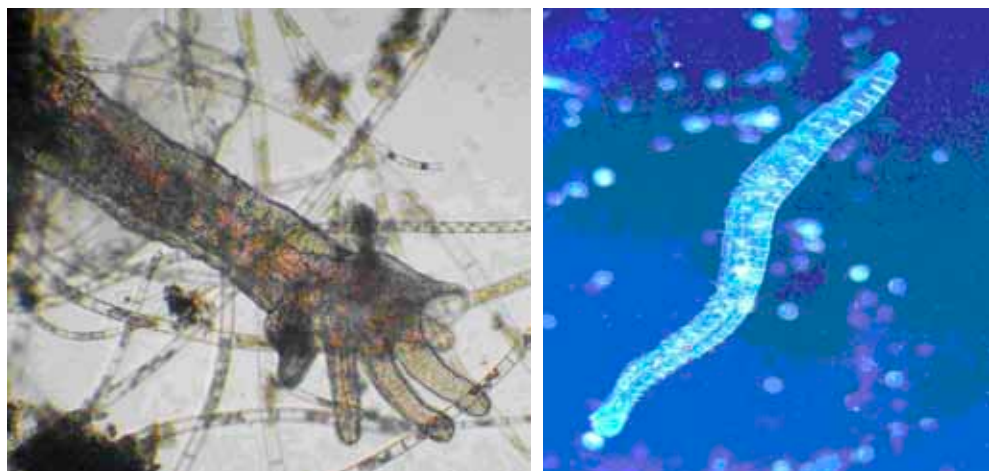
Er is veel onderzoek gedaan naar de afbraak van slib door aquatische wormen. Het begin van dit onderzoek dateert van meer dan 30 jaar geleden naar aanleiding van een toevallige observatie bij een afstudeeronderzoek aan de universiteit van Wageningen. De laatste jaren is het zwaartepunt van het onderzoek verschoven naar China. Ook deze interesse is echter terug te voeren naar de eerste stappen op dit gebied in Wageningen (WUR) en een merendeel van het oorspronkelijke onderzoek heeft dan ook in Nederland plaatsgevonden.

Aanvankelijk heeft het onderzoek zich geconcentreerd op zogenaamde vrijzwemmende wormen, met name met *Aeolosomatidae* (in het bijzonder *A. hemprichi*). Later is het merendeel van het onderzoek gedaan met zogenaamde sessiele wormen zoals *Tubifex* en recentelijk *Lumbriculus*.

Onderzoekers⁴ constateren, soms zelfs zeer veel, slibafbraak, tot wel 75%. Toch is iedere keer weer de conclusie dat het in praktijk toepassen stuit op problemen met procesbeheersing, oncontroleerbare groei van de wormen en daarmee samenhangende variatie in afbraak.

Daarnaast zijn er problemen door de onbekendheid van het effect van een groot aantal proceseigenschappen zoals reactor grootte, energieverbruik en het effect van de aanwezigheid zware metalen in het slib op de wormenpopulatie alsook het effect van slibafbraak door wormen op de zware metalen (blijven deze in het slib, komen ze in de wormen of gaan ze in oplossing?).

FIGUUR 2.1 AULOPHORUS FURCATUS, SCHAAL 1:50 (LINKS), SCHAAL 1:20 (RECHTS)



4 Elissen, T. L. G. Hendrickx, H. Temmink et al., Water Research 40 (20), 3713 (2006).

In het onderzoek aan de WUR is men overgestapt op *Lumbriculus variegatus*. Dit is een relatief grote, zeer robuuste sessiele worm waarmee een reactorsysteem met een relatief stabiele groei is bereikt, maar waarbij de bovengenoemde problemen niet zijn opgelost. Eén van de problemen is de relatief lage omzetsnelheid⁴ en de grote reactorvolumes die daarvan het gevolg zijn. SR Technologie heeft gekozen voor een vrijzwemmende Oligochaete: *Aulophorus furcatus* (figuur 1) al dan niet in combinatie met een aanverwante worm *Dero digitata*.

Aulophorus behoort tot de familie der Naididae. Het is een kleine worm (2-5 mm gemiddeld tot maximaal 10mm) die zich ongeslachtelijk voortplant. Het heeft een tweetal karakteristieken die het voor deze toepassing bijzonder geschikt maken:

- een bijzonder hoge specifieke consumptiesnelheid. *Aulophorus* kan per dag –onder optimale condities- zijn eigen lichaamsgewicht aan slib verorberen.
- het heeft de bijzondere eigenschap dat het zich in clusters nestelt op dragermateriaal waardoor het mogelijk is zeer grote hoeveelheden op één te pakken waardoor het reactorontwerp relatief klein kan worden gehouden [en daarmee goedkoper]. Door deze eigenschap spoelen de wormen zelfs bij zeer korte hydraulische verblijftijden niet uit, één van de problemen bij vrijzwemmende wormen.

Aulophorus is reeds in 1773 ontdekt door Müller⁵. Deze komt in gematigde klimaat streken voor, maar heeft een voorkeur voor wat warmere wateren. De enige recentelijke observatie in Europa was in koelwater van een elektriciteitscentrale in Letland.

2.2 MENGKULTUREN

In de praktijk is gebleken dat allerlei soorten borstelwormen met het slib meekomen en proberen in de reactor een plaats te veroveren. Dit zijn zowel sessiele (zoals *Tubifex* en *Lumbriculus*) als vrijzwemmende borstelwormen. Op zich hoeft deze constante kolonisatie niet nadelig te zijn. Het probleem van een monocultuur is dat de populatie erg kwetsbaar is vooral ook omdat de *Aulophorus* zich voortplant door middel van deling zodat alle wormen in principe genetisch identiek zijn. Het gevolg daarvan is dat de gehele populatie op dezelfde manier reageert op externe stimuli, zoals schommelingen in temperatuur- of zuurstofniveau. Als er één dood gaat, gaat vaak een groot deel van de populatie dood. Dus een zekere biodiversiteit is op zich een voordeel omdat dit tot een stabiel proces zal leiden.

Toch is er in het proces gekozen voor een cultuur waarbij de *Aulophorus* prevaleert. Dit heeft te maken met de slib consumptiesnelheid van *Aulophorus* die hoger ligt dan de meeste andere wormen. Onder optimale omstandigheden kan de *Aulophorus* per dag zijn eigen gewicht aan slib opeten. In de praktijk wordt dit niet gerealiseerd omdat de omstandigheden altijd maar kortstondig optimaal zijn. Maar de consumptiesnelheid is nog altijd een factor 2 tot 3 hoger dan onder gelijke omstandigheden door andere borstelwormen wordt gerealiseerd. Dit is interessant want dit maakt een compacter, en dus goedkoper, reactorontwerp mogelijk.

Toch is er een poging gedaan om een mengcultuur te creëren met *Dero digitata*. Ook dit is een Naididae en in alle opzichten sterk verwand. Deze borstelworm komt in Nederland veelvuldig voor en het is bekend dat dit een zeer robuuste worm is. Een bijkomend voordeel zou kunnen zijn dat deze worm waarschijnlijk zijn optimale temperatuur iets lager heeft liggen dan de *Aulophorus* waarvan wordt aangenomen dat deze boven de 18°C ligt.

5 Müller (1773) *Vermium terrestrium et fluviatilium*

3

MATERIAAL EN METHODEN

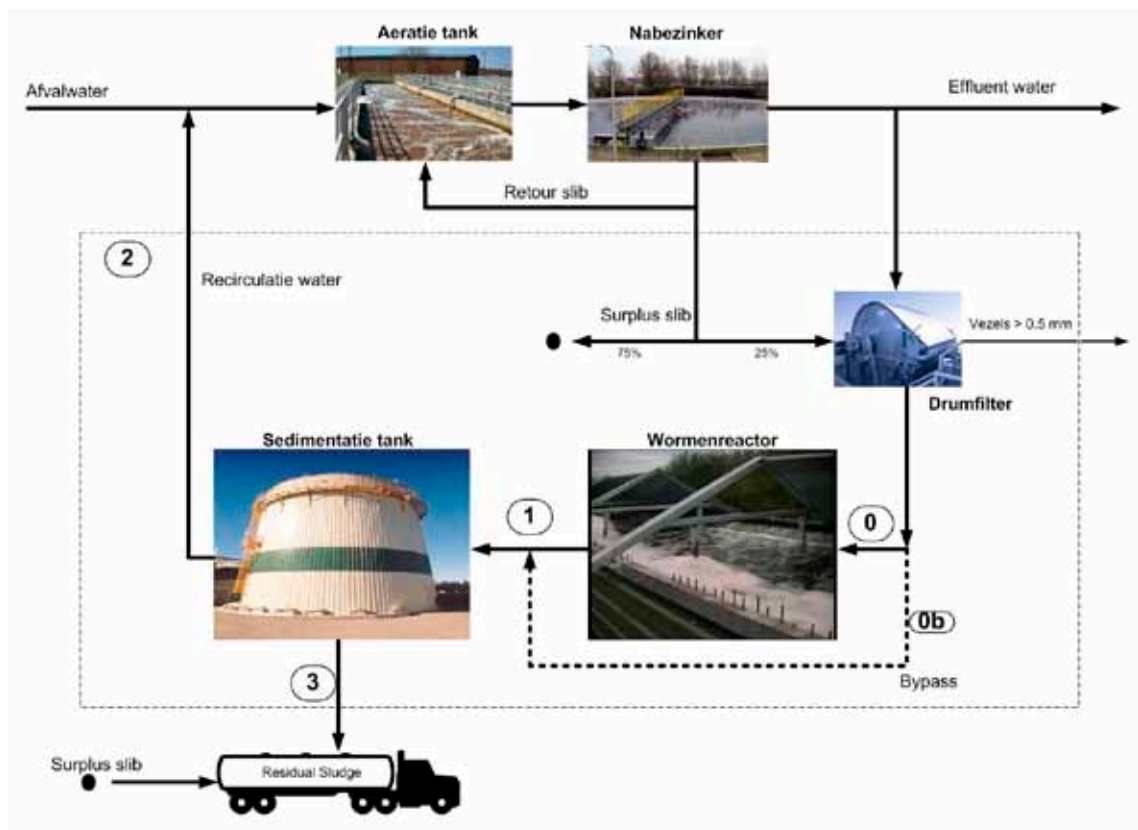
In dit hoofdstuk worden het proces en de gebruikte meet- en bemonstermethoden beschreven. Ook bevat dit hoofdstuk een beschrijving van de kengetallen die het systeem karakteriseren.

3.1 REACTOREN

3.1.1 PROCESSCHEMA PRAKTIJKSCHAAL WORMENREACTOR

In het processchema zijn de relevante stromen en bemonsteringspunten van het systeem weergegeven (figuur 3.1). De slibafbraak vindt plaats in een wormenreactor met als tweede stap een niet beluchte sedimentatietank met anaerobe condities bij omgevingstemperatuur. Voor het onderzoek met de pilots is uitgegaan van een systeem dat enkel uit een wormenreactor bestaat (zie paragraaf 3.1.5). In appendix 1 is het meet- en bemonsterschema weergegeven met de betrouwbaarheidsintervallen en ijkingsfrequenties.

FIGUUR 3.1 SCHEMATISCH OVERZICHT VAN HET SYSTEEM IN WOLVEGA. WEERGEGEVEN ZIJN DE PROCESSTAPPEN, DE STROMEN EN DE BELANGRIJKSTE BEMONSTERINGSPUNTEN (0-3). DE GESTIPPELDE LIJN IS DE SYSTEEMGREN



3.1.2 OPERATIONELE PARAMETERS

De operationele parameters van de wormenreactor komen voort uit eerder onderzoek van SR Technologie (tabel 3.1). De operationele parameters van de sedimentatietank zijn gegeven in tabel 3.2.

TABEL 3.1: OVERZICHT VAN DE OPERATIONELE PARAMETERS WORMENREACTOR WOLVEGA

| | | |
|--|-----------|-------------------|
| Volume | 125 | m ³ |
| Oppervlakte dragermateriaal | 1.100 | m ² |
| Debiet (slib + water) | [200-350] | m ³ /d |
| Hydraulische verblijftijd | 12 | h |
| Slib concentratie influent | [1-3] | g/l |
| Ingaand massavracht | [400-700] | kg ds/d |
| Temperatuur | [20-27] | °C |
| Opgeloste zuurstof | >2 | mg/l |
| Stroomsnelheid langs het dragermateriaal | [10-100] | cm/s |

TABEL 3.2: OVERZICHT VAN DE OPERATIONELE PARAMETERS SEDIMENTATJETANK

| | | |
|------------------------------|-----------|-------------------|
| Volume | 900 | m ³ |
| Gemiddelde drogestof gehalte | 3 | % |
| Debiet (slib + water) | [200-350] | m ³ /d |
| Hydraulische verblijftijd* | [2-4] | d |
| Gemiddelde slibverblijftijd | 80 | d |
| Temperatuur | [4-18]** | °C |
| Opgeloste zuurstof | <0,1 | mg/l |

* Gemiddelde verblijftijd van de waterfractie afkomstig uit de wormenreactor

** Afhankelijk van buitentemperatuur

3.1.3 ONTWERP EN BEDRIJFSVOERING PRAKTIJKSCHAAL WORMENREACTOR

Aquatische borstelwormen komen in vele vormen en maten voor en leven onder allerlei omstandigheden. Het proces is zo ontworpen dat het instandhouden van een populatie van een specifieke soort wil bevorderen. De omstandigheden moeten dus zo gekozen worden dat de gewenste borstelworm andere borstelwormen en andere ongewenste organismen er uit concurreren. Dit wordt bereikt door een combinatie van ontwerp [het dragermateriaal] en het sturen van de omstandigheden [zuurstof, temperatuur, pH, stroming, etc.].

Eind 2006 is begonnen met een onderzoek op de RWZI in Wolvega (figuur 3.2). Dit is een zuivering volgens het carrousel principe. De specificaties van RWZI Wolvega zijn weergegeven in appendix 3.

FIGUUR 3.2

RWZI WOLVEGA



In Wolvega is een wormenreactor gebouwd met een volume van 125 m^3 , hiermee kan ongeveer 25% van de totale slibproductie van de Wolvega worden verwerkt. Retourslib wordt gefilterd in een drumfilter met een doorlaat van $500 \mu\text{m}$ en aangelengd met effluent tot een concentratie van 1-3 g/l. Deze filtering is noodzakelijk in verband met de platenwarmtewisselaar die een doorlaat heeft van 2 mm. In deze warmtewisselaar wordt de ingaande stroom op temperatuur gebracht met de uitgaande stroom met een rendement van 93-95%. Een warmtepomp met een COP van 4,5-6 zorgt voor een toevoer van warmte indien noodzakelijk. Dit betekent dat voor elke verbruikte MJe 4,5-6 MJth verkregen wordt.

Een belangrijk onderdeel van het ontwerp is het dragermateriaal. Het dragermateriaal bestaat uit een netstructuur dat verticaal in het medium hangt en waarlangs het zuurstofrijke slib/water mengsel van boven naar beneden stroomt met een bekende stroomsnelheid. *Aulophorus* nestelt zich op deze structuur. Hierdoor ontstaan kolonies met wormen op deze netten. De dimensionering van deze kolonies is een belangrijke grootheid in het sturen van de afbraak en kan door het "management" van de reactor worden beïnvloed.

FIGUUR 3.3

DRAGERMATERIAAL MET KOLONIES AULOPHORUS



In de reactor wordt het medium door de airlift langs het dragermateriaal geleid. De airlift heeft een dubbele functie. Enerzijds zorgt het voor het inbrengen van zuurstof. In het algemeen wordt er naar gestreefd de concentratie van de zuurstof boven de 2 mg/l te houden. Anderzijds wordt hiermee een stroming opgewekt, die noodzakelijk is voor het creëren van voor de borstelwormen juist leefmilieu en die tegelijkertijd zorgt voor het transport van zuurstof en voeding.

FIGUUR 3.4 WORMENREACTOR IN WOLVEGA



Het retourmedium wordt naar de warmtewisselaar geleid door de warmtepomp die de restwarmte onttrekt en tot hoogwaardiger proceswarmte omzet. Het retour medium is dan ook in het algemeen 3-4 graden kouder dan het ingaande medium. Dit uitgaande medium bevat de afbraakproducten van de wormen en verder slib, nitraat, ammonium, nitriet, fosfaat en een wisselende hoeveelheid levende en dode wormen.

Bij het ontwerp van de installatie in Wolvega was het doel minimaal 50% afbraak te realiseren. Uit pragmatische overwegingen is er in eerste instantie voor gekozen de reactor in Wolvega te bouwen op ongeveer een kwart van de grootte noodzakelijk om de totale slibproductie van 600 ton ds per jaar te verwerken. De modulaire opbouw maakt het mogelijk om meerdere reactor units later toe te voegen.

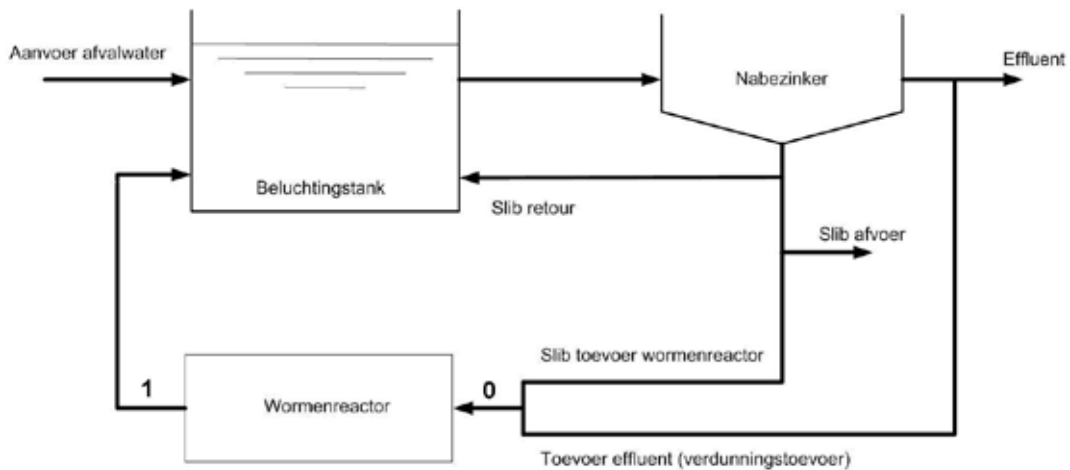
3.1.4 SEDIMENTATIETANK ALS ANAEROBE REACTOR VOOR SLIBAFBRAAK

Het slib uit de wormenreactor wordt in een grote opslagbuffer opgevangen. Daar wordt het gravitair ontwaterd. De waterlagen in de tank met slib worden opgezocht en het water wordt afgelaten door een schuifje te openen. De schuifjes sluiten zich van zelf als de slibconcentratie te hoog wordt. De hydraulische verblijftijd in deze opslag was gemiddeld 2-4 dagen. Het slib dikt in tot een concentratie van rond de 3% drogestof en heeft een gemiddelde verblijftijd van 60-110 dagen. Deze reactor is bedreven als een sequenced batch reactor, waarbij telkens 2-5% van het slib werd achtergehouden als ent.

3.1.5 ONTWERP EN BEDRIJFSVOERING PILOT WORMENREACTORS

Bij ontwerp van de pilotreactors is ervoor gekozen de intrinsieke dimensies zoveel mogelijk te laten lijken op die van de praktijkschaal wormenreactor. Daarnaast is gekozen voor een volume van 5 m³. Een schematisch overzicht van het pilot systeem is weergegeven in figuur 3.5. Het meet- en bemonsterschema is te vinden in appendix 1.

FIGUUR 3.5 SCHEMATISCH OVERZICHT VAN HET PILOT WORMENREACTOR SYSTEEM. WEERGEGEVEN ZIJN DE PROCESSTAPPEN, STROMEN EN DE BELANGRIJKSTE BEMONSTERINGSPUNTEN (0,1)



3.1.6 ENTEN WORMENREACTOR

Enting vindt plaats door middel van het overplaatsen van dragermateriaal van de wormenreactor in Wolvega naar de pilot. Een normale ent bevat ongeveer 15-30 g ds wormen per m³ reactor. Onder deze omstandigheden hebben de wormen een verdubbelingstijd van maximaal 1 week. Afbraak is dan goed meetbaar na maximaal 4 weken.

Als met meer materiaal wordt geënt is afbraak binnen kortere tijd mogelijk: na 2 weken bij een ent van 100 g ds wormen per m³ reactor.

3.2 METINGEN

Het doel van de metingen is het vaststellen van de massastromen van drogestof, stikstof, fosfaat en zware metalen. Een compleet overzicht van het meet- en bemonster schema is weergegeven in appendix 1.

3.2.1 SLIBAFBRAAK

Voor het berekenen van de slibafbraak in de wormenreactor en de sedimentatietank is een standaard massabalans toegepast (appendix 2). Voor de wormenreactor is gerekend met de aanname dat de accumulatie van slib in de reactor over de bemonsterde perioden te verwaarlozen is.

Voor de berekening van de slibreductie in de sedimentatietank, is de accumulatie gemeten op het moment dat deze geleegd is. Voor het legen is de sedimentatietank gehomogeniseerd. Een mengmonster van het afgevoerde volume is vervolgens gebruikt om de overgebleven massa vast te stellen.

3.2.2 BEPALING FOSFAAT EN STIKSTOF MASSASTROMEN

Voor het vaststellen van de stikstof en fosfaat massastromen zijn de volgende ingaande en uitgaande concentraties gemeten. Dit is zowel voor de wormenreactor als voor de tweede, anaerobe stap (sedimentatietank) gemeten.

- $\text{NH}_4\text{-N}$
- $\text{NO}_2\text{-N}$
- $\text{NO}_3\text{-N}$
- $\text{PO}_4\text{-P}$

3.2.3 ZWARE METALEN

Het slib en de waterfase van de sedimentatietank zijn geanalyseerd op gehalte van de volgende elementen:

- IJzer
- Koper
- Nikkel
- Zink
- Cadmium
- Chroom
- Lood

De gebruikte methode was ICP-OES. De meetgrens in de waterfase was 0,01 mg/l voor alle elementen behalve voor lood waarvoor de meetgrens 0,2 mg/l was.

3.2.4 WORMENBIOMASSA BEPALINGEN

De wormbiomassa werd een aantal maal per week bemonsterd en gemeten waarbij onderscheid gemaakt is tussen wormenbiomassa op het dragermateriaal en in de reactorvloeistof.

De hoeveelheid wormenbiomassa op het dragermateriaal werd bepaald door de aangehechte massa en de percentages wormenbiomassa en slib. Hiertoe is met een waterstofzuiger een oppervlakte van 2 m² opgezogen waarna het volume en het drooggewicht zijn bepaald. Daarnaast is het percentage wormenbiomassa op de netten bepaald aan de hand van aparte monsters waarvan door middel een zeef de wormen en slib zijn gescheiden, waarna van de verkregen fracties het drooggewicht bepaald is.

De hoeveelheid wormenbiomassa op het dragermateriaal is als volgt berekend:

$$X_{WN} \left(\frac{\text{kg ds}}{\text{m}^3} \right) = \frac{V_{\text{sample}} \cdot C_X}{A_{\text{sample}}} \cdot \%W \cdot \frac{A_R}{V_R}$$

| | | |
|---------------------|--|--------------------------------|
| X_{WN} | wormenbiomassa op dragermateriaal | kg ds worm/m ³ |
| V_{sample} | volume van monster | l |
| C_X | concentratie vaste stof monster | g ds/l |
| A_{sample} | bemonsterd oppervlakte | m ² |
| %W | percentage wormen (m/m) | % |
| A_R/V_R | Oppervlakte/Volume verhouding van de reactor | m ² /m ³ |

De hoeveelheid wormenbiomassa in de waterfase werd dagelijks bepaald door het tellen van het aantal wormen in een monster uit de waterfase. De totale hoeveelheid wormenbiomassa in de waterfase werd bepaald door dit aantal te vermenigvuldigen met het gemiddelde drooggewicht van een worm: 0,06 mg ds/worm. In een goed functionerend systeem is het percentage wormbiomassa in de waterfase minder dan 1%.

3.3 KENGETALLEN WORMENREACTOR EN WORMBIOMASSA

Om het systeem te karakteriseren is gebruik gemaakt van een aantal kengetallen.

Volume specifieke afbraak snelheid (rs): Dit kengetal geeft aan hoeveel kg drogestof slib gemiddeld wordt afgebroken per m³ reactor per dag (kg ds slib/m³.d).

Biomassa specifieke afbraak snelheid (qs): De gemiddelde hoeveelheid slib die wordt afgebroken per kg wormen per dag op drogestofbasis (kg ds slib/kg ds wormen.d).

Actieve wormbiomassa (X_{wn}): De gemiddelde hoeveelheid wormbiomassa op het dragermateriaal (kg ds wormen/m³).

Biomassa specifieke groeisnelheid (μ): De toename van wormbiomassa per hoeveelheid wormbiomassa per dag ((d) Dit getal staat direct in verhouding tot de verdubbelingstijd van de wormen volgens de relatie:

$$t_d = \frac{0,7}{\mu}$$

Van dit kengetal kan alleen de netto effectieve groei worden bepaald omdat wormensterfte (nog) niet goed te bepalen is in het huidige systeem. Daarom wordt μ bepaald in de exponentiële groeifase, waardoor sterfte een relatief kleine invloed heeft.

Groeiopbrengst van wormen op slib (Y): De toename van wormbiomassa per hoeveelheid afgebroken slib berekend op basis van de groeisnelheid (in de exponentiële groeifase) (kg ds wormen/kg ds slib).

De kengetallen voor de reactor in Wolvega zijn berekend over een periode van 2 jaar waarbij periodes met grote verstoringen buiten beschouwing zijn gelaten*. De pilots waren gevoeliger voor technische storingen; de berekeningen zijn gedaan op basis van cijfers van tenminste 4 weken.

De formules die gebruikt zijn om de kengetallen uit te rekenen zijn gegeven in appendix 4.

Deze kengetallen zijn gekozen omdat ze de groei- en consumptie-dynamica van de wormen volledig kunnen vastleggen. Daarom kunnen de kengetallen gebruikt worden bij het vergelijken van resultaten van de pilotreactoren en ook bij het ontwerpen van een nieuwe reactor.

* In de 2 jaar is de wormenpopulatie 3 maal door technische verstoringen gedecimeerd; deze perioden zijn buiten beschouwing gelaten bij het bepalen van deze kengetallen.

4

SLIBAFBRAAK: RESULTATEN EN DISCUSSIE

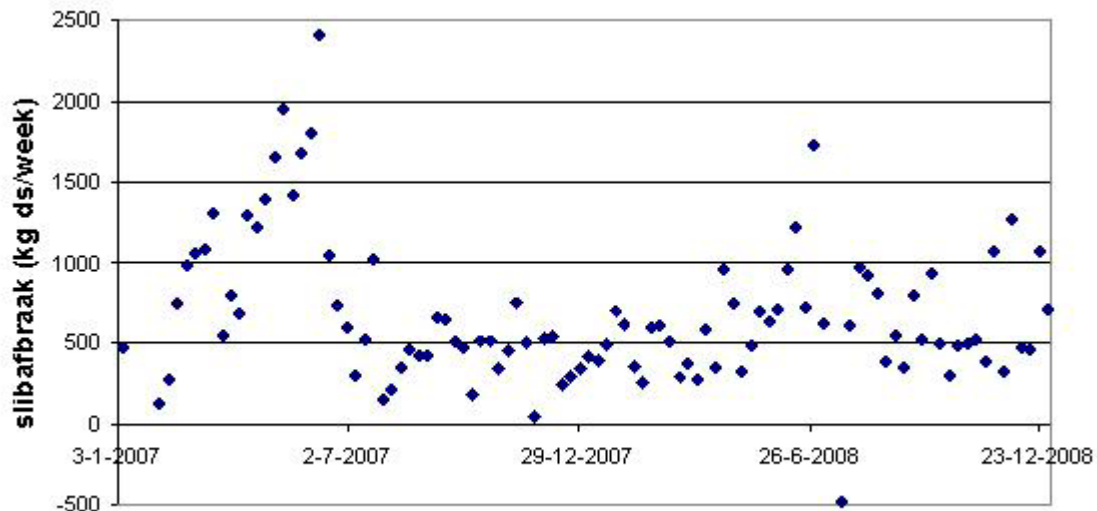
In eerste instantie richtte de bedrijfsvoering zich op het optimaliseren van de afbraak door de wormen. In een proef met een 5 m³ pilot reactor met spuislib uit de RWZI in Wolvega was reeds aangetoond dat er geen, voor wormen, giftige componenten in het slib zaten en dat de wormen het slib als voedsel konden gebruiken. In overleg met het Wetterskip werd afgesproken dat het slib uit de wormenreactor tijdelijk opgeslagen kon worden in een buffertank van 900 m³.

De reactor werd geënt met wormen uit een proefreactor (zie paragraaf 3.1.6). Daar dit voor de grootte van de reactor een kleine hoeveelheid was, duurde het geruime tijd voordat de groei van de wormen zichtbaar werd. Aanvankelijk was er ook een grote populatie zoetwater slakjes in de reactor. Deze verdwenen na enige weken. Na ongeveer 1 maand was de wormenpopulatie zodanig gegroeid dat er ook afbraak gemeten kon worden.

De afbraak liep op tot gemiddeld een kleine 1.000 kg droge stof per week. De wormenpopulatie groeide zo voortvarend dat deze in week 6 van 2007 te groot geworden was, hetgeen leidde tot een massale sterfte. Dat was in de maanden die er opvolgde een wederkerend fenomeen, terwijl er gezocht werd naar de beste methode om de populatie optimaal in stand te houden. In het begin van de zomer van 2007 leken daarvoor de optimale procesomstandigheden gevonden te zijn en werd er een afbraak van rond de 2.000 kg ds/week gerealiseerd. Het afbraakpercentage lag boven de 50%. Maar ook dit bleek niet stabiel want de wormenpopulatie nam af, hetgeen weer in lagere afbraken resulteerde.

In de zomer van 2007 waren er veel technische problemen, vooral met de slibtoevoer, en werden de wormen gedurende enkele weken ondervoed. Ook is in die tijd de reactor geheel leeg gepompt in verband met een noodzakelijke reparatie van het beluchtingsysteem.

FIGUUR 4.1 OVERZICHT AFBRAAK PRAKTIJSCHAAL (125 M3) WORMENREACTOR 2007-2008



Ondertussen werd ook duidelijk dat de sedimentatietank veel meer slib toegevoerd had gekregen dan de verwachte opslagcapaciteit van de sedimentatietank zonder dat enige afvoer had plaatsgevonden. Onderzoek naar uitspoeling en/of lekken leverde geen resultaat en het werd langzamerhand duidelijk dat in de buffer het slib verder afgebroken werd.

Dit leidde er toe dat voor een andere aanpak werd gekozen. In 2008 kwam de nadruk te liggen op de optimalisatie van de totale afbraak. De totale afbraak is de som van de afbraak in de wormenreactor plus de afbraak in de sedimentatietank. Er bleek een correlatie te zijn tussen de afbraak in de wormenreactor en de afbraak in de sedimentatietank. De maximale totaal afbraak werd gerealiseerd bij een afbraak van 25-30% in de wormenreactor. In 2008 werd er dan ook niet langer geprobeerd om de afbraak in de wormenreactor te maximaliseren.

Afbraak in de sedimentatietank leek een relatief simpel en makkelijk beheersbaar proces en levert bovendien methaan als bijproduct. Het leek dus verstandig te onderzoeken in hoeverre het mogelijk was de wormenreactor als een “katalysator” te gebruiken en de bulk van de afbraak in de tweede stap te doen. Hierbij speelde ook de overweging een rol dat naarmate de belasting van de wormenreactor (kg ds slib toevoer per m³ reactor per dag) meer werd opgevoerd het risico van instabiliteit toenam, terwijl juist de afbraak in de sedimentatietank, door zijn veel grotere verblijftijd, de totale stabiliteit van het proces vergrootte.

Zo kan er een onderscheid worden gemaakt in twee perioden waarbij de wormenreactor anders werd ingezet. Deze perioden vielen samen met de jaren 2007 en 2008:

Bedrijfsvoering wormenreactor:

2007 : ‘optimalisatie van de afbraak in de wormenreactor’

2008 : stabiliteitsgericht, ‘optimalisatie van de afbraak in de wormenreactor in combinatie met sedimentatietank’

4.1 WORMENREACTOR WOLVEGA

4.1.1 AFBRAAK WORMENREACTOR 2007 (OPTIMALISATIE VAN DE AFBRAAK IN DE WORMENREACTOR)

De afbraak in de wormenreactor is een continu proces. Toch zijn de resultaten in drie periodes ingedeeld, omdat deze overeenkomen met het legen van de sedimentatietank. In 2007 werd 145 ton verwerkt in de wormenreactor waarvan gemiddeld 32% werd afgebroken.

TABEL 4.1 AFBRAAK IN DE WORMENREACTOR 2007

| | IN | | UIT | | Afbraak | | |
|-----------------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|-----|
| | ton ds | kg ds/d | ton ds | kg ds/d | ton ds | kg ds/d | % |
| 7/11/06-23/4/07 | 64 | 384 | 45 | 269 | 19 | 115 | 30% |
| 23/4/07-30/8/07 | 42 | 328 | 24 | 183 | 19 | 145 | 44% |
| 30/8/07-18/1/08 | 39 | 279 | 30 | 154 | 9 | 64 | 23% |
| | 145 | 332 | 98 | 225 | 47 | 107 | 32% |

Wat opvalt zijn de duidelijk slechtere resultaten in de derde periode. Dit is volledig toe te schrijven aan een infiltratie van *Lumbriculus*. In begin augustus was de populatie sterk teruggevallen als gevolg van het ondervoeden van de populatie in combinatie met verstopping-

problemen met de slib toevoerpomp. Op dat ogenblik heeft *Lumbriculus* zich, door een gebrek aan concurrentie, in de reactor kunnen vestigen. Daar *Lumbriculus* een veel grotere en zeer robuuste worm is, werd dit in eerste instantie positief opgevat. Een mengcultuur van twee wormen zou stabielere moeten zijn dan een monocultuur.

Lumbriculus is een sessiele worm en kan zich in het algemeen niet echt handhaven in het dragermateriaal. Maar juist in combinatie met *Aulophorus* wist *Lumbriculus* zich een plaats in de reactor te veroveren. En begon in de loop der tijd *Aulophorus* zelfs te verdringen. De afbraak cijfers over deze periode liggen een heel stuk lager. De gemiddelde afbraak per dag komt uit op 64 kg/d.

In januari 2008 werd de conclusie getrokken dat het voordeel van een stabielere mengpopulatie niet opwoog tegen de lagere afbraak en werd begonnen met een aantal pogingen om *Lumbriculus*, die tegen die tijd bijna de gehele reactor had overgenomen, uit te roeien.

4.1.2 AFBRAAK WORMENREACTOR 2008: (OPTIMALISATIE VAN DE AFBRAAK IN DE WORMENREACTOR IN COMBINATIE MET DE SEDIMENTATIE-TANK)

De afbraak in de wormenreactor ligt hier, zoals te verwachten, een stuk lager vergeleken met 2007. Gedurende de eerste 3 maanden van 2008 was er ook veel last van *Lumbriculus*. Daarna is deze succesvol verwijderd uit het systeem doordat hij de competitie met *Aulophorus* verliest.

TABEL 4.2 AFBRAAK IN DE WORMENREACTOR 2008

| | IN | | UIT | | Afbraak | | |
|-----------------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|-----|
| | ton ds | kg ds/d | ton ds | kg ds/d | ton ds | kg ds/d | % |
| 18/1/08-25/7/08 | 63 | 335 | 48 | 255 | 15 | 80 | 24% |
| 25/7/08-16/9/08 | 22 | 423 | 19 | 354 | 4 | 69 | 16% |
| 16/9/08-9/12/08 | 38 | 451 | 32 | 380 | 6 | 71 | 16% |
| | 124 | 379 | 99 | 303 | 25 | 76 | 20% |

4.1.3 KENGETALLEN WORMENREACTOR

De kengetallen voor de praktijkschaal wormenreactor in Wolvega zoals beschreven in materiaal en methode zijn berekend aan de hand van de afbraak en wormenbiomassagroei. De resultaten zijn weergegeven in tabel 4.3.

TABEL 4.3 OVERZICHT VAN DE KENGETALLEN VOOR DE PRAKTIJKSCHAAL WORMENREACTOR IN WOLVEGA

| | | |
|-----------------------------------|-----|---------------------------|
| Afbraaksnelheid (rs) | 0,8 | kg ds/m ³ /d |
| Wormenbiomassa (X _{wn}) | 1,9 | kg ds/m ³ |
| Specifieke afbraaksnelheid (qs) | 0,5 | kg ds slib/kg ds wormen/d |
| Specifieke groeisnelheid (μ) | 0,1 | /d |
| Groeiopbrengst (Y) | 0,2 | kg ds wormen/kg ds slib |

4.1.4 WAT GEBEURT ER MET DE WORMENBIOMASSA?

Voor elke 5 kilo drogestof slib die afgebroken is in Wolvega is ongeveer 1 kilo drogestof wormenbiomassa gevormd. Dit betekent dat in het systeem een overschot aan wormenbiomassa is, welke constant moet worden afgevoerd om steady state te behouden in de wormenreactor. De afgevoerde wormen komen terecht in het zuurstofloze milieu van de sedimentatietank en desintegreren zeer snel. De vrijgekomen bouwstoffen worden voornamelijk omgezet in biogas.

4.2 AFBRAAK IN DE SEDIMENTATIETANK

In de loop van 2007 werd duidelijk dat er in de sedimentatietank onverwachte processen zich afspeelden. Onderzoek toonde aan dat er geen uitspoeling van slib plaats vond. En hoewel het onwaarschijnlijk werd geacht, werd ook onderzocht of er geen lek in de tank zat. Toen dit niet het geval bleek, zijn er een aantal voorzichtige pogingen gedaan om te onderzoeken wat er aan de hand zou kunnen zijn.

Naar het zich laat aanzien is er sprake van een complexe serie van opeenvolgende en parallelle reacties. Eén van de hypothesen is dat zich in de sedimentatietank vergelijkbare processen zouden afspelen, maar vele malen minder efficiënt, als in het darmkanaal van de worm. Ook is gesuggereerd dat hier sprake is van het reeds in STOWA rapport² over predatie van slib door wormen genoemde “indirecte afbraak”.

In het eerdere STOWA onderzoek naar wormen was al aangegeven dat de mechanismen die voor de slibafbraak verantwoordelijk zijn niet echt bekend waren en een tweetal hypothesen werden geponeerd:

Hoewel het predatieprincipe op het niveau van voedselrelaties min of meer duidelijk is, bestaat er nog grote onduidelijkheid over de werkelijke mechanisme(n) van predatie. Verschillende hypothesen voor het predatiemechanisme zijn bekend. Twee belangrijke zijn:

- 1) Directe slibpredatie door de borstelwormen. De hoeveelheid slib die het darmkanaal van de worm verlaat is (sterk) gereduceerd. Bij dit mechanisme reduceert de worm zelf de hoeveelheid slib.
- 2) Indirecte slibpredatie door borstelwormen. De wormen reduceren het slib niet zelf, maar bewerken het slib voor, waardoor bacteriën in het slib vervolgens in staat zijn het slib verdergaand te mineraliseren.

Aansluitend op de tweede hypothese is de mogelijkheid dat in de sedimentatietank een afbraakproces plaats vindt zoals dat ook in een waterig milieu in de natuur voorkomt, waarbij de worm als een soort van katalysator fungeert. Het is zeker interessant om hier verder onderzoek naar te doen, maar dit valt buiten het kader van de validatie van het proces. Wel is duidelijk geworden dat er grote hoeveelheden methaan gevormd worden en dat dit proces ook bij lage temperaturen (4-18°C) doorgaat.

4.2.1 AFBRAAK SEDIMENTATIETANK 2007

Wat opvalt is de zeer matige afbraak gedurende de tweede periode en de juist hoge afbraak in de eerste periode. De lage afbraak in periode 2 laat zich verklaren door de hoge afbraak in de wormenreactor. Het is te verwachten dat de wormen toch het makkelijk verteerbare materiaal gebruiken zodat de moeilijke fractie in de sedimentatietank meer tijd nodig zal hebben

2 STOWA rapport 2002-17 “Slibpredatie door inzet van Oligochaete wormen”

TABEL 4.4

AFBRAAK IN DE SEDIMENTATIETANK 2007

| | IN | | UIT | | Afbraak | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------|----|
| | ton ds | ton ds | ton ds | ton ds | ton ds | % |
| 7/11/06-23/4/07 | 45 | 15 | 30 | | | 67 |
| 23/4/07-30/8/07 | 24 | 16 | 7 | | | 31 |
| 30/8/07-13/3/08 | 30 | 19 | 11 | | | 36 |
| | 98 | 50 | 48 | | | 49 |

De hoge afbraak in de eerste periode laat zich niet zo gemakkelijk verklaren. Dit vindt in de winterperiode plaats en daar dit proces zich bij omgevingstemperatuur afspeelt zou eerder een lagere afbraak verwacht worden in de winter.

4.2.2 AFBRAAK SEDIMENTATIETANK 2008

In 2008 lag de nadruk op de optimalisatie van proces als geheel: wormenreactor plus afbraak in de sedimentatietank. Om de benutting van het mechanisme achter de waargenomen slibafbraak in het voorgaande jaar verder te onderzoeken leek het interessant om slib bij te mengen dat niet door de wormenreactor was gevoerd. Dit was mede gedaan omdat het vermoeden was gerezen dat bij een verblijftijd van 10 uur in de wormenreactor het onwaarschijnlijk was dat al het slib dat in de sedimentatietank terecht kwam via het darmkanaal van een worm was gegaan. Daarom is ongeveer 25% procent onbehandeld slib bijgemengd via een bypass.

TABEL 4.5

AFBRAAK IN DE SEDIMENTATIETANK IN 2008

| | IN | | | UIT | Afbraak | |
|-----------------|----------|---------|--------|-----|---------|----|
| | Reactor* | Extra** | Totaal | | ton ds | % |
| | ton ds | ton ds | ton ds | | | |
| 18/1/08-5/9/08 | 48 | 6 | 54 | 21 | 34 | 62 |
| 25/7/08-3/11/08 | 19 | 15 | 34 | 16 | 17 | 52 |
| 16/9/08-26/1/09 | 32 | 13 | 45 | 23 | 23 | 50 |
| | 99 | 34 | 133 | 60 | 74 | 55 |

- * Via wormenreactor
- ** Via bypass (zie processchema paragraaf 3.1.1)

Opvallend is het hoge afbraak percentage van gemiddeld 55%. Het lijkt erop dat het bijgemengde slib net zo goed afbreekbaar is in de sedimentatietank.

4.2.3 'KOUDE VERGISTING?'

De gemiddelde afbraakpercentages van 49% en 55% drogestof in de sedimentatietank zijn opvallend hoog in vergelijking met de afbraak van 25-30% drogestof die wordt waargenomen bij conventionele mesofiele vergisting, te meer omdat de processen in de sedimentatietank werken bij omgevingstemperaturen (4-18°C).

Onderzoekers hebben al eerder slibafbraak aangetoond bij lage temperaturen bij vergelijkbare verblijftijden⁶. Reducties van het secundair slib tussen de 30-50% organische stof werden gevonden. Uitgaande van een anorganische fractie van 30-40% van het slib levert dit dan een slibafbraak van 25-30% drogestof, vergelijkbaar met de afbraak in mesofiele vergisters maar beduidend lager dan de waargenomen afbraak in de sedimentatietank.

6 P. Lowe and S. Williamson, Water Pollution Control 82 (4), 457 (1983).

Daarbij komt nog het feit dat een gedeelte van het slib reeds is afgebroken in de wormenreactor, waarmee het totale afbraakpercentage gemiddeld zelfs op 64% drogestof komt, ruim 2 keer zo hoog als de afbraak in mesofiele vergisters.

De voorlopige conclusie die uit het voorafgaande kan worden getrokken is dat de voorbehandeling door de wormen schijnbaar een effect heeft op de afbraak in de sedimentatietank.

4.3 STABILITEIT

Zoals al vermeld zijn de conclusies van alle vorige onderzoeken naar de toepasbaarheid van slibreductie door middel van borstelwormen gestuit op het feit dat het proces niet beheerbaar bleek. Ook in Wolvega zijn deze problemen naar voren gekomen. Het opschalen van een 5 m³ pilot naar een 125 m³ reactor maakte dat deze problemen versterkt werden. Toch is er in Wolvega grote vooruitgang gemaakt en is het gelukt om de fluctuaties in de wormenpopulatie sterk in te dammen, respectievelijk te neutraliseren.

De belangrijkste beperkingen zijn:

1 Het management van de populatie

De beste afbraak wordt verkregen als er een optimaal evenwicht bestaat tussen de opbouw van de populatie, de grootte van de populatie, aanbod van voedsel en uitwisseling met zuurstof. In de praktijk betekent dit dat de populatie zorgvuldig moet worden gemanaged. Wordt de laag met wormen op het dragermateriaal te dik dan kunnen de wormen onvoldoende voedsel tot zich nemen en wordt ook de zuurstofopname geremd. Op den duur leidt dit tot anaërobie zones en sterven de wormen af. Het is dan ook zaak de populatie nauwkeurig te beheren, qua densiteit, leeftijdopbouw en wormen/slib verhouding.

Door de keuze van de procesomstandigheden kan een competitief voordeel worden gecreëerd voor een specifieke borstelworm. Op deze manier kan gestuurd de gewenste soort populatie.

2 De gevoeligheid voor fluctuaties in de leefomstandigheden

In de praktijk is gebleken dat de wormen erg heftig reageren op wijzigende procesomstandigheden. In de natuur leven de wormen in stromend water. Als de leefomstandigheden niet ideaal zijn dan laten de wormen zich met de stroom meedrijven op zoek naar gunstiger omstandigheden. In de reactor is dit gedrag ook goed zichtbaar. Kleine veranderingen in bepaalde procesomstandigheden maakt dat de wormen plotseling massaal een ander onderkomen proberen te vinden en van het dragermateriaal loskomen en in de waterfase gaan zwemmen. Bij een korte hydraulische verblijftijd kan zo in korte tijd de populatie decimeren. Deze zelfde gevoeligheid heeft ook invloed op de afbraak zelf. Veranderingen van temperatuur, voeding, stroming etc., beïnvloeden de afbraak.

3 De tijd om een populatie te verkrijgen

De wormen planten zich voort door deling. Onder optimale omstandigheden is dit iedere drie dagen. In de praktijk is iedere zeven dagen echter goed haalbaar gebleken. Onder suboptimale omstandigheden kan dit echter oplopen tot 20 dagen. Een technische storing die een sterke reductie van de populatie tot gevolg heeft kan dan ook makkelijk leiden tot een terugval in de afbraak waarbij enkele weken nodig zijn om weer op het oude niveau terug te keren.

Een voorbeeld van de dynamica van de wormenbiomassa is gegeven in appendix 5.

In de loop van het onderzoek zijn oplossingen ontwikkeld om aan deze tekortkomingen c.q. beperkingen van deze technologie tegemoet te komen of te ondervangen.

Zo is er in de loop van 2008 een methode ontwikkeld om de populatiegroei te beheersen en het nestelgedrag te sturen. Dit resulteerde in minder grote fluctuaties en maakt het ook mogelijk om in de toekomst compactere reactoren te kunnen bouwen.

De gevoeligheid voor veranderingen in het leefmilieu is alleen te ondervangen door een robuuste bouw. Technische verstoringen moeten zoveel mogelijk uitgebannen worden. In Wolvega waren met name de technische problemen de grootste boosdoener, zoals verstoppingen bij het oppompen van het slib uit de slibretourleiding. Technische problemen waren verantwoordelijk voor de meeste fluctuaties.

Het dood gaan van de populatie wormen is een groot afbreukrisico. Het opbouwen van een nieuwe populatie kan enkele weken tot maanden duren als er een grote sterfte heeft plaatsgevonden, bijvoorbeeld als gevolg van een stroomuitval of onderbreking van de zuurstofvoorziening. Dit heeft in het huidige onderzoek verschillende malen de afbraak volledig stil gelegd. Dit probleem is echter heel goed te managen als er meerdere installaties zijn. Het is namelijk mogelijk gebleken de wormen en masse over te enten. Daar een goed lopende installatie per definitie een overschot aan wormen heeft is het geen enkel probleem om 20% wormen uit een reactor over te brengen naar een andere. Dat heeft op de afbraak nauwelijks invloed. Door een reactor op deze wijze met 3 of 4 charges te enten is het mogelijk om eigenlijk onmiddellijk de invloed van een massale sterfte te neutraliseren.

Maar de grootste stabiliserende factor is de “naverbranding” in de sedimentatietank. De verblijftijd in de wormenreactor is slechts enkele uren. Dit leidt automatisch tot flinke schommelingen in de afbraak. In de sedimentatietank was de verblijftijd van het bezonken slib gemiddeld 80 dagen* waardoor veel van de schommelingen vereffend worden.

Het bovengenoemde effect is goed te zien als de betrouwbaarheidsinterval van de fluctuaties van de totale afbraak (2-staps systeem: wormenreactor + sedimentatietank) wordt vergeleken met die van de twee processtappen apart (tabel 4.6). De fluctuaties in de afbraakpercentages nemen af met een factor 2-3.

TABEL 4.6 OVERZICHT VAN DE MATE VAN FLUCTUATIES VAN DE AFBRAAK IN DE VERSCHILLENDE PROCES STAPPEN VERGELEKEN MET DE FLUCTUATIES OVER HET TOTALE SYSTEEM (2-STAPS SYSTEEM) BEREKEND OVER DE PERIODE 2007-2008

| | Afbraak | 95% betrouwbaarheidsinterval* |
|----------------------------------|---------|-------------------------------|
| Wormenreactor | 27% | 18-36% |
| Sedimentatietank | 53% | 41-65% |
| Wormenreactor + sedimentatietank | 64% | 56-72% |

* zie appendix 6

* Zie ook tabel 3.2, paragraaf 3.1.

4.4 CONCLUSIE SLIBAFBRAAK

Over het totale proces (wormenreactor en sedimentatietank) werd in 2007 145 ton ds slib verwerkt. Hiervan werd 95 ton ds afgebroken; dit komt overeen met een overall rendement van 66%.

Over heel 2008 werd 158 ton slib verwerkt, waarbij 24% van het slib niet via de wormenreactor maar via de bypass aan de sedimentatietank is toegevoerd. Van de totaal toegevoerde drogestofvrucht (158 ton) is 97 ton drogestof afgebroken; een overall rendement van 61%.

De cijfers voor 2008 zijn vergelijkbaar met de cijfers voor 2007. Dit is opvallend gezien het kleinere deel van het slib dat door de wormenreactor is gegaan en door predatie is afgebroken. 20% van het slib is in deze periode rechtstreeks in de sedimentatie toegevoerd. Het extra toegevoerde slib is blijkbaar met een percentage afgebroken in de sedimentatietank vergelijkbaar met het slib dat uit de wormenreactor komt. Dit doet vermoeden dat de wormen een enzym afscheiden dat het slib ontsluit en bij omgevingstemperatuur laat vergisten.

5

RELEASE

De wormen gebruiken slib als voedsel. Uit eerdere onderzoeken is bekend dat hierbij stikstof en fosfaat vrijkomt. Ook is de vraag wat er met de zware metalen gebeurt. Dit laatste is niet in het slib dat uit de wormenreactor komt gemeten, maar alleen bij het slib uit de sedimentatietank. Het doel van deze metingen is het vaststellen van de extra belasting op de zuiveringen qua N, P en zware metalen.

5.1 RELEASE STIKSTOF EN FOSFAAT

Het proces is bemonsterd volgens het schema in appendix 1 en de massastromen zijn bepaald voor een periode van 295 dagen (3 januari 2008 tm 24 oktober 2008). Gedurende deze periode werd ongeveer 25% van het slib van de zuivering behandeld met een gemiddelde toevoer naar het systeem van ongeveer 450 kg ds/d. De afbraak was gemiddeld 77 kg ds per dag in de wormenreactor en 208 kg ds per dag in de sedimentatietank. De resultaten zijn weergegeven in de onderstaande tabellen: 5.1-5.3.

TABEL 5.1 INGAANDE EN UITGAANDE STROMEN STIKSTOF EN FOSFAAT VOOR DE WORMENREACTOR

| | IN | | UIT | | Slibafbraak wormenreactor 77 kg/d | | |
|--------------------|------|------|------|------|-----------------------------------|---------------|------------------|
| | mg/l | kg/d | mg/l | kg/d | Δ mg/l | Δ kg/d | g/kg slibafbraak |
| PO ₄ -P | 2,2 | 0,6 | 3,4 | 0,9 | 1,2 | 0,3 | 3,9 |
| NH ₄ -N | 1,3 | 0,3 | 10,7 | 2,7 | 9,4 | 2,4 | 30,7 |
| NO ₃ -N | 2,6 | 0,7 | 12,2 | 3,1 | 9,6 | 2,4 | 31,1 |
| NO ₂ -N | 0,6 | 0,1 | 3,0 | 0,7 | 2,4 | 0,6 | 7,8 |

TABEL 5.2 INGAANDE EN UITGAANDE STROMEN STIKSTOF EN FOSFAAT VOOR DE SEDIMENTATIETANK

| | IN | | UIT* | | Slibafbraak sedimentatietank 208 kg/d | | |
|--------------------|------|------|------|------|---------------------------------------|---------------|------------------|
| | mg/l | kg/d | mg/l | kg/d | Δ mg/l | Δ kg/d | g/kg slibafbraak |
| PO ₄ -P | 3,4 | 0,9 | 5,0 | 1,2 | 1,5 | 0,4 | 1,8 |
| NH ₄ -N | 10,7 | 2,7 | 17,3 | 4,3 | 6,7 | 1,7 | 8,0 |
| NO ₃ -N | 12,2 | 3,1 | 6,8 | 1,7 | -5,4 | -1,4 | -6,5 |
| NO ₂ -N | 3,0 | 0,7 | 3,3 | 0,8 | 0,3 | 0,1 | 0,4 |

* De uitgaande stroom van de sedimentatietank is verder nog onderzocht op uitspoeling van zwevende stof. De concentratie zwevende stof was maximaal 0,01 g/l.

TABEL 5.3 STIKSTOF EN FOSFAAT VRIJGAVE OVER TOTALE SYSTEEM

| | Slibafbraak systeem:285 kg/d | | |
|--------------------|------------------------------|------|------------------|
| | mg/l | kg/d | g/kg slibafbraak |
| PO ₄ -P | 2,7 | 0,7 | 2,4 |
| NH ₄ -N | 16,1 | 4,0 | 1,4 |
| NO ₃ -N | 4,1 | 1,0 | 3,6 |
| NO ₂ -N | 2,7 | 0,7 | 2,4 |

Op basis van de resultaten in tabel 5.3 kan een schatting worden gemaakt van de extra N en P belasting voor de zuivering die het verwerken van het slib op deze manier met zich mee zou brengen. Dit kan voor het proces op RWZI Wolvega worden gedaan aan de hand van de kengetallen uit het meerjarenoverzicht van de zuivering (2002-2008):

- Productie secundair slib: 600 ton ds/j
- N belasting influent: 110 ton N/j
- P belasting influent: 17 ton P/j
- Daarnaast wordt uitgegaan van:
- Slibafbraakpercentage: 65%

Als al het slib van de zuivering verwerkt zou worden zou de zuivering + 7% N en + 5,5% P extra belasting moeten verwerken. Belangrijk hierbij te vermelden is dat het ging om een zuivering waarbij fosfaat werd neergeslagen door toevoeging van ijzer. Bij zuiveringen met biologische fosfaat verwijdering is het mogelijk dat andere hoeveelheden fosfaat vrijkomen. Hier wordt verder in detail op ingegaan in de resultaten van de pilots (Hoofdstuk 10).

5.2 ZWARE METALEN

5.2.1 ZWARE METALEN IN DE WORMEN

Als onderdeel van het onderzoek is gekeken of zich in de wormen ook giftige stoffen ophopen. In het proces zoals dat in Wolvega wordt toegepast spoelen de wormen met het effluent van de wormenreactor in de sedimentatietank. Daar zijn de omstandigheden anaeroob. De wormen sterven daar af en zijn voeding voor verdere afbraak voor anaërobe bacteriën. De wormenreactor produceert een overmaat aan wormen. Het zou goed denkbaar zijn deze wormen niet af te voeren naar de sedimentatietank, maar te oogsten. De wormen bestaan voor zo'n 50% uit ruw eiwit. Toepassing als veevoer is onder de huidige EU wetgeving echter uitgesloten. Na de recente "gekke koeien ziekte" affaire is het terugbrengen van afval in de voedselketen praktisch geheel uitgesloten.

TABEL 5.4 ZWARE METALEN EN PCB'S IN WORMEN

| | | |
|---|----------------|-----|
| Arseen (As) ICP-AES – hydride | 2,3 mg/kg | * G |
| Cadmium (Cd) ICP-AES | 0,80 mg/kg | * G |
| Lood (Pb) ICP-AES | 9,3 mg/kg | * G |
| Kwik (Hg) ICP-AES – hydride | < 100 µg/kg | * G |
| Dioxinen - upper bound, only PCDD/F HR-GCMS | 0,38 ngTEQ/kg | * |
| Dioxine achtige PCB s - upper bound, only PCB | 0,657 ngTEQ/kg | * |

* op ds basis; G: GMP+ standaard B10 gecertificeerde methode.

De cijfers geven aan dat er geen accumulatie van de zware metalen Cadmium en Lood in de wormen plaatsvindt in vergelijking met de gehalten in slib uit dezelfde zuivering (tabel 5.5). Wat betreft PCB gehalten is ook geen sprake van accumulatie ten opzichte van het slib (appendix 7).

5.2.2 ZWARE METALEN IN HET RESTSLIB

De resultaten van de metaalgehalten van normaal slib (AT Wolvega) en slib dat is afgebroken in het wormenreactor (wormenslib) zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

TABEL 5.5 OVERZICHT VAN DE METAALGEHALTES VAN NORMAAL SLIB EN WORMENSLIB (95% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL)

| | AT Wolvega (2005-2008) | Wormenslib (einde proces*) | |
|----|---------------------------|-------------------------------|-------|
| Fe | 53.000(±11.000) | 84.100 | mg/kg |
| Cd | 1,0(±0,4) | 0,74 | mg/kg |
| Cr | 37(±6) | 68 | mg/kg |
| Cu | 320(±86) | 640 | mg/kg |
| Pb | 73(±13) | 140 | mg/kg |
| Ni | 18(±2) | 27 | mg/kg |
| Zn | 830(±150) | 1.600 | mg/kg |

* Wormenreactor inclusief sedimentatietank na een verblijftijd van gemiddeld 80 dagen.

De verhoogde gehalten van metalen in het wormenslib geven aan dat zware metalen zich ophopen in het slib tijdens de afbraak in het wormenreactor systeem en niet in de waterfase terecht komen.

Dit wordt bevestigd door analyse van een mengmonster van de waterfase met ICP-OES techniek. Hier in werd alleen ijzer aangetoond. Alle andere elementen konden niet aangetoond worden daar de concentratie onder de detectiegrens was. De detectiegrens was 0,01 mg/l voor alle elementen behalve lood waarvoor deze 0,2 mg/l was.

Het is belangrijk om op te merken dat de uitgaande waterfase stroom van 10 m³/h relatief klein was ten opzichte van het effluent debiet van de RWZI met gemiddeld 300 m³/h.

Daar de zware metalen niet in de wormen cumuleren en de concentraties in het slib aan het einde van het proces in relatie tot de afbraak zijn toegenomen, worden de zware metalen blijkbaar ingevangen in het resterende slib.

5.3 OVERIG RELEASE

Opvallend is dat de asrest minder toeneemt dan verwacht. Normale afbraak betreft het "(biologisch) verbranden" van de organische fractie. De anorganische fractie zou dan ook navenant moeten toenemen. Dat bleek echter niet het geval. De verhouding organisch/anorganisch neemt wel enigszins toe [van 31% naar 40%] maar dat staat niet in verhouding tot de 60+% drogestof afbraak die is gemeten. De verklaring hiervoor moet worden gezocht in een ander type omzetting die aan het proces ten grondslag liggen. Deze processen vinden bij lage temperatuur plaats en zijn vergelijkbaar met de afbraakprocessen zoals die ook in de natuur plaatsvinden. Hierbij komt een deel van de anorganische fractie vrij. Geprojecteerd op de situatie in Wolvega zou dit resulteren in een lichte toename van de zoutconcentratie in het effluent van de RWZI in de orde van maximaal 10 mg/l op een gemiddelde zoutconcentratie van 300 mg/l en bij een drogestof afbraak van 65% van het slib.

6

VERWERKING RESTSLIB

In totaal is 108 ton ds slib na verwerking in de wormenreactor en na enkele maanden opslag in de sedimentatietank overgebleven als eindproduct over een periode van 2 jaar. Dit slib is op de voor het Wetterskip gebruikelijke manier verwerkt. Ook is de energiewaarde van het restslib onderzocht in verband met de mogelijkheid tot verbranding.

6.1 ONTWATERING

Al het slib van het Wetterskip wordt centraal verzameld in Heerenveen waar het door middel van een filterpers wordt ontwaterd. Na het ontwateren wordt het als koek afgevoerd, waarna het gedroogd wordt. Het gedroogde slib wordt bijgestookt in energiecentrales of in een cementoven.

In totaal werden 6 ladingen afgevoerd over 2007 en 2008. Deze werden op de gebruikelijke wijze verwerkt. Van deze 6 charges was één charge die een kleine hoeveelheid extra polymeer toegediend kreeg. De overige charges werden “standaard” behandeld. Het droge stof gehalte van alle charges na persing was conform de verwachtingen tussen de 22 en 24% droge stof.

6.2 VERBRANDING

Een steeds groter deel van het slib wordt in Nederland verbrand. In 2002 was dit 52% van het totale aanbod⁷. Om te kijken of het slib uit de wormenreactor ook hiervoor geschikt is, is er een proef gedaan in samenwerking met SNB nv.

Hiervoor zijn monsters aan het begin van het proces genomen, na het drumfilter, en aan het einde na de sedimentatietank [zie figuur 3.1 monsterpunten 0 en 3]. Op het moment van monsternamen was de afbraak over het totale proces 55% op ds basis.

TABEL 6.1 STOOKWAARDE SLIB WORMENPROCES

| | Slib IN [monsterpunt 0] | Slib UIT [monsterpunt 3] |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Ds gehalte monster [%] | 99,1 | 97,6 |
| Gloeiverlies [organische stof] [%ds] | 57,8 | 54,9 |
| Calorische waarde (droog) [kJ/kg ds] | 15.400 | 14.000 |
| Stookwaarden (droog) [kJ/kg ds] | 14.300 | 13.200 |
| Stookwaarden organische stof [kJ/ kg os] | 24.000 | 24.000 |

Ondanks een slibreductie over het proces van 55% is er slechts een geringe achteruitgang in de stookwaarde van 14.300 kJ/kg ds naar 13.200 kJ/kg ds [7,7% afname].

⁷ CBS, webmagazine, 22 mei 2006

7

NIEUW ONTWERP EN DIMENSIONERING

De reactor in Wolvega is een prototype. Het ontwerp is gebaseerd op de ervaringen in een aantal pilots. Tijdens het onderzoek is ontdekt dat de wormen het slib ontsluiten en is een tweede stap aan het proces toegevoegd. Het proces is daarmee stabiel geworden, maar de oorspronkelijke configuratie was verre van optimaal voor deze gecombineerde toepassing. Bovendien bleek tijdens de proefperiode dat een aantal ontwerpverbeteringen de robuustheid van de procesvoering zouden kunnen verbeteren.

In Wolvega zijn proeven gedaan met verschillende typen slib als voeding zowel op grote schaal als op pilot niveau. Zo zijn retourslib, slib uit de indikker en slib uit de sedimentatie tank geëvalueerd onder andere op verwerkbaarheid, afbraak en verdubbelingstijd van de wormen. Op de TU Delft zijn een aantal proeven gedaan naar het vergisten van het restslib (appendix 8). Daarbij is onder meer onderzocht: het effect van de predatie door de wormen en het effect van de temperatuur. Ook is onderzoek gedaan naar het effluent van het proces.

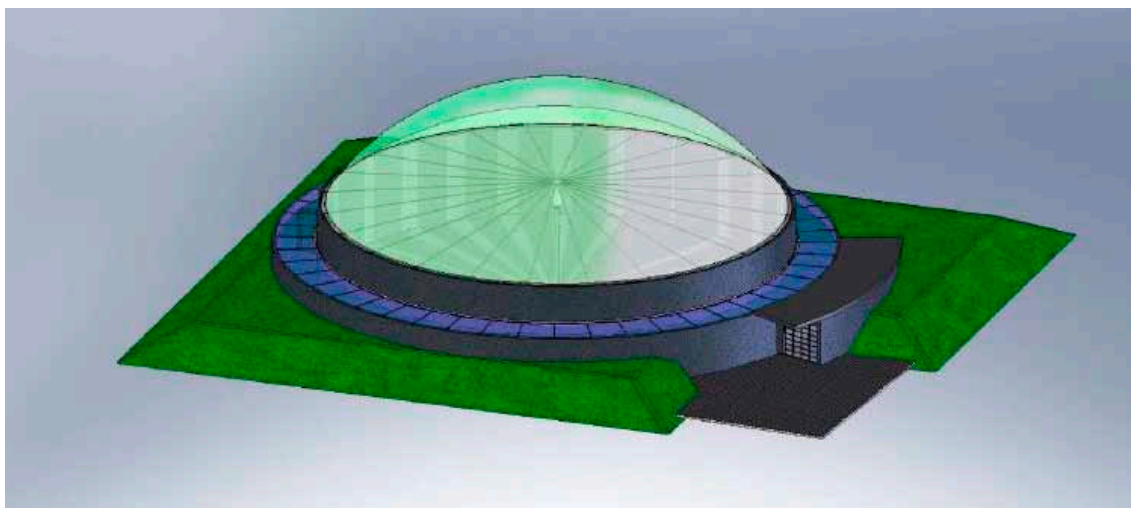
In samenwerking met Alterra is de database met procesgegevens samen met de laboratorium bepalingen op het gebied van ds, asresten, NO_3 , NO_2 , NH_4 en fosfaat in combinatie met de overige metingen en biomassabepalingen, aan een multivariate analyse onderworpen om de optimale procesomstandigheden te bepalen. Ook is er een model ontwikkeld om de biofilm te optimaliseren.

Dit heeft geleid tot een nieuw processchema waarbij de eerste stap [de wormenreactor] en de tweede stap [de sedimentatietank] zijn geïntegreerd. Het proces is verder vereenvoudigd. Veel aandacht is besteed aan de energie huishouding.

De wormenreactor wordt gevoed met ingedikt slib. Dit kan ook vanaf andere zuiveringen worden aangevoerd. Dit wordt gefilterd om vervuiling van de wormenreactor tegen te gaan. Het dragermateriaal en de beluchting in de wormenreactor worden geïntegreerd tot cassettes. In de cassettes is een systeem ingebouwd om de aangroei van wormen actief te kunnen sturen. Slib uit de wormenreactor wordt in de sedimentatietank ingedikt. Op basis van laboratorium experimenten (appendix 8) is er voor gekozen de temperatuur op het zelfde niveau te brengen als in de wormenreactor (25°C). Naar verwacht zal dit de afbraaksnelheid en de gasproductie verhogen. De warmte uit de effluentstroom uit de sedimentatietank wordt door middel van een warmtewisselaar teruggewonnen met een rendement van 93-95%.

Een nieuw reactor concept is ontwikkeld op basis van dit nieuwe processchema. Hierbij is uitgegaan van een capaciteit van de verwerking van 1000 ton ds per jaar bij een afbraak van 60-70%. Er is voor gekozen twee concentrische reactoren. De sedimentatie tank in het centrum met een 'air blow cover' (een opblaasbare kap voor gasopslag, zie figuur 7.1) die als gashouder fungeert. De inhoud van de sedimentatietank is 3800 m³. Om de sedimentatie tank heen is de wormenreactor gebouwd en is tevens ruimte gereserveerd voor twee buffer tanks en machinekamer. De wormenreactor is hieromheen 'gevouwen' en heeft een volume van 600 m³.

FIGUUR 7.1 IMPRESSIE VAN HET NIEUWE GECOMBINEERDE ONTWERP (WORMENREACTOR ALS SCHIL OM SEDIMENTATIE-TANK MET "AIR-BLOW-COVER")



De wormenreactor biedt ruimte aan 20 ton natgewicht wormen. De reactor is zo gedimensioneerd dat bij een toevoer van 2.500-3.000 kg ds slib per dag gemiddeld 500-600 kg ds wordt afgebroken. Het restslib heeft een verblijftijd in de sedimentatie tank van 80 dagen. De afbraak in de sedimentatietank is 50%; ongeveer 1.000-1.200 kg/dag.

Naar verwachting zal het energie verbruik van een 50.000 ie installatie rond de 400.000 kWh (1.400 GJ) per jaar zijn. Er wordt 160.000 -175.000 m³ per jaar methaangas geproduceerd met een energie-inhoud van ongeveer 6000 GJ (hoofdstuk 8.2).

De investeringen voor de installatie exclusief grondwerk worden geraamd op € 700.000 (hoofdstuk 9). In deze prijs zit geen voorziening voor het aanwenden van het gas. Het gas kan direct verstoekt worden in een ketel, in een WKK worden gebruikt om elektriciteit op te wekken, of worden opgewerkt tot aardgas kwaliteit (appendix 11).

8

DUURZAAMHEID

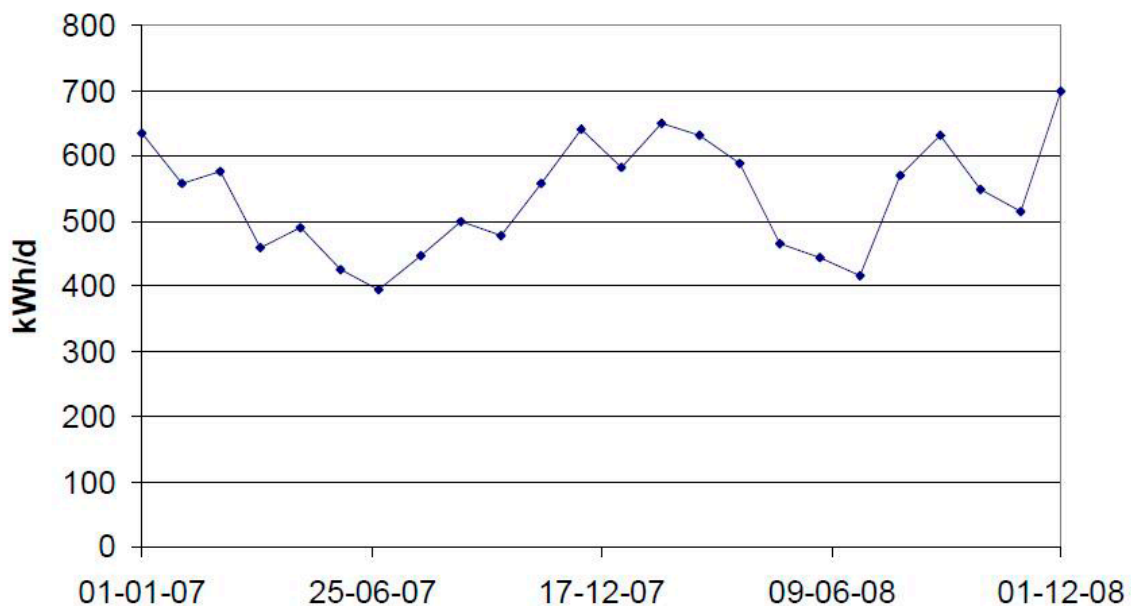
In de discussie rond slibverwerking speelt de duurzaamheid een steeds belangrijkere rol. Met betrekking tot het inzetten van wormen voor de predatie van zuiveringsslib zijn de twee belangrijkste factoren met betrekking tot de duurzaamheid van het proces het energieverbruik en de energieproductie in de vorm van biogas.

8.1 ELEKTRICITEITSVERBRUIK

8.1.1 ENERGIEVERBRUIK HUIDIGE SYSTEEM

Het energieverbruik van het onderzochte systeem op RWZI Wolvega, dat ongeveer 300 kg ds afbraak per dag doet, ligt gemiddeld tussen de 500 kWh/d in de zomer en 600 kWh/d in de winter (dit verschil wordt veroorzaakt door de warmtepomp die dan gemiddeld 20 uur per dag aan staat). Een overzicht van de gegevens over de periode januari '07 tot en met december '08 is weergegeven in figuur 8.1.

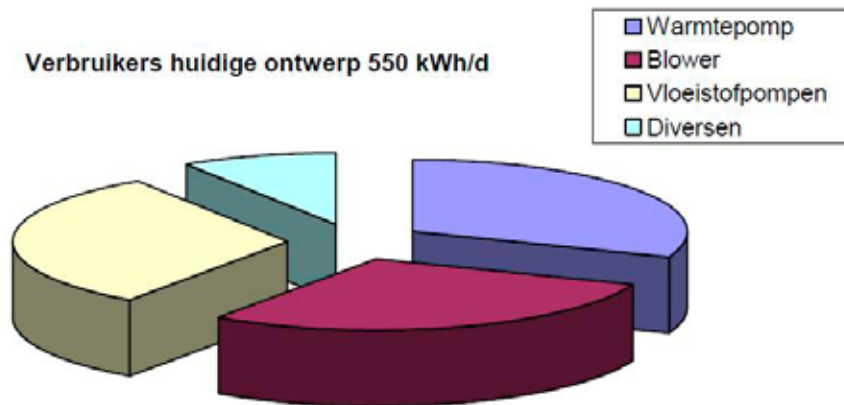
FIGUUR 8.1 OVERZICHT VAN HET ENERGIEVERBRUIK VAN DE PRAKTIJSCHAAL WORMENREACTOR



Om de verdeling van de energievraag van de verschillende verbruikers in kaart te brengen is het huidige systeem doorgemeten met een amperetang. Dit was een steekproef onder representatieve omstandigheden in de winter. De resultaten zijn weergegeven in figuur 8.2.

FIGUUR 8.2

VERDELING ENERGIEVERBRUIK WORMENREACTOR WOLVEGA (WINTERPERIODE)



Het grootste energieverbruik zit in de beluchting en in de warmtepomp. Zij verbruiken samen 50% van alle energie. Deze cijfers gelden voor de winter. In de zomer draait de warmtepomp minder dan 2 uur per dag, in de winter vrijwel continu.

De snelheid van biologische processen verdubbelt door de bank genomen bij iedere temperatuurstijging van 10°C totdat de optimumtemperatuur is bereikt. Dit is ook het geval bij de wormen. Om een bepaalde afbraak te realiseren moet er een afweging gemaakt worden tussen de grootte van de reactor, en dus de investering, en de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur hoe kleiner de reactor. Het natuurlijke leefdoorn van *Aulophorus* omvat met name gematigde omgevingen zoals bijvoorbeeld Nederland. Toch is van *Aulophorus furcatus* bekend dat hij beter gedijt in warmere wateren. (Hoofdstuk 2) Er is daarom besloten om de wormenreactor op een temperatuur van 18-27°C te bedienen. Bij hogere temperaturen wordt het proces snel instabiel. Het is bekend dat de wormen bij 33°C dood gaan.

Om het energieverbruik zo laag mogelijk te houden is er op RWZI Wolvega voor gekozen om een platenwarmtewisselaar in combinatie met een warmtepomp in te zetten. Dit betekent dat de verwarmingskosten met een factor 100 zijn teruggebracht in vergelijking met een systeem zonder deze voorzieningen (zie hoofdstuk 3.1.3).

Er kleeft echter een groot nadeel aan deze oplossing. Een platenwisselaar is erg gevoelig voor verstopping door vezels. Het is dan ook noodzakelijk gebleken een aantal voorzieningen te treffen om te voorkomen dat de platenwisselaar verstopt. Hiervoor is het onder meer nodig om het slib te filteren door middel van een drumfilter met een maaswijdte van 500µ. Desondanks bouwt de warmtewisselaar veel tegendruk op. Gedurende proef periode werd dan ook met een gemiddelde druk van 4-5 bar gewerkt. Er kan dus nog bespaard worden op pompenergie in het nieuwe het systeemontwerp.

8.1.2 ENERGIEVERBRUIK NIEUWE SYSTEEM

De reactor zoals deze nu in Wolvega wordt gebruikt is een prototype. Tijdens het onderzoek werd echter snel duidelijk dat het energieverbruik fors terug gebracht kan worden met een aantal veranderingen in het reactorontwerp. Een ontwerp dat mede anders kan als de afbraak in de sedimentatietank wordt geïntegreerd met de wormenreactor (zie hoofdstuk 7). Naar verwachting zal het energie verbruik van een 50.000 i_{e,136} installatie ongeveer 400.000 kWh (1.500 GJ) per jaar zijn. (appendix 10) De onderverdeling van de verbruikers zou dan zijn als weergegeven in tabel 8.1

TABEL 8.1

ENERGIEVERBRUIKERS IN HET NIEUWE ONTWERP

| | | kWh/d | kWh/j |
|-----------------|-----|--------------|----------------|
| (Warmtepomp* | 21% | 238 | 87.000) |
| Blower | 32% | 360 | 131.000 |
| Vloeistofpompen | 42% | 475 | 173.000 |
| Diversen | 6% | 70 | 26.000 |
| Totaal | | 1.143 | 417.000 |

* afhankelijk van het ontwerp, kan vervangen worden door gasbrander of WKK.

Dit is berekend voor een installatie die 1.000 ton ds slib per jaar verwerkt met een afbraak van 65%. Dit geeft een energieconsumptie van ongeveer 400 kWh/ton ds slib verwerkt of 670kWh/ton ds slib afgebroken. (resp. 1.500 en 2.400 MJ/ton ds)

8.2 BIOGASPRODUCTIE

In de huidige opstelling in Wolvega wordt de biogasproductie niet gemeten. De sedimentatietank van 900 m³ heeft een diameter van 22 meter. Om een goede meting te doen is het noodzakelijk al het gas gedurende de 4 maanden dat een tank in gebruik is op te vangen. Daar de sedimentatietank ontworpen is voor de opslag en het ontwateren van slib bleek het niet mogelijk dit op eenvoudige wijze te realiseren. Het werken met een gaskap werd als weinig zinvol gekwalificeerd. In plaats daarvan zijn er een groot aantal laboratoriumtesten gedaan om te bepalen hoeveel biogas geproduceerd wordt. Deze testen zijn op 25°C en op 12°C uitgevoerd op de TU Delft. De resultaten zijn weergegeven in appendix 8.

Conclusie was dat na 80 dagen bij een temperatuur van 25°C de biogas productie als volgt is:

- 200 Nm³ CH₄ gas per ton drogestof slib uit wormenreactor en/of via bypass
- 500 Nm³ CH₄ gas per ton drogestof wormen uit de wormenreactor

Interessant is nog wel op te merken dat verdere optimalisatie, met een andere verhouding in de afbraak tussen predatie en afbraak door opslag, deze hoeveelheid biogas mogelijk opgevoerd kan worden.

Er is een rekenmodel gemaakt voor de processen in de sedimentatietank dat is geijkt op de bovengenoemde gasproducties. Voor het nieuwe ontwerp wordt uitgegaan van een sedimentatietank met een temperatuur van 25°C.

Overeenkomstig hiermee kan de verwachte methaangasproductie worden geschat op ruim 180.000 Nm³ per jaar voor een 50.000 ie₁₃₆ zuivering met een spuislibproductie van 1.000 ton ds op jaarbasis. Dit komt ook overeen met een jaarproductie van ruim 280.000 Nm³ biogas met een methaan gehalte van 65%. De energie-inhoud van deze hoeveelheid gas is ruim 6.600GJ. Het biogas kan aangewend worden voor verschillende doeleinden, mogelijke scenario's zijn verder uitgewerkt in appendix 11.

8.3 NETTO ENERGIEBALANS

Een kleine decentrale wormenreactor voor het verwerken van 1.000 ton ds slib op jaarbasis [ontworpen voor 50.000 ie_{136}] levert op jaarbasis ruim 6.600 GJ [=1.800.000 kWh_{th}] per jaar aan primaire energie. Het energieverbruik is ongeveer 400.000 kWh per jaar, ongeveer 20% van de geproduceerde energie.

Het biogas kan op verschillende manieren worden aangewend afhankelijk van de omstandigheden. De alternatieve mogelijkheden en de mogelijke productie van “groene energie” maken geen onderdeel uit van dit rapport. Minimaal zal het geproduceerde gas gebruikt kunnen worden voor de verwarming van de reactor. Maar het is ook mogelijk het gas op te werken tot aardgaskwaliteit of het in een WKK of microturbine om te zetten in electriciteit (appendix 11).

9

ECONOMISCHE EVALUATIE

De integrale kosten voor de totale water- en slibketen van een RWZI zijn gemiddeld € 37-40/ie₁₃₆.⁷ Naar verwacht zullen de kosten in de toekomst alleen maar verder toenemen vooral door de steeds stijgende kosten van de slibeindverwerking.

De haalbaarheid van de predatie van wormen wordt volledig bepaald door economische factoren. Het onderzoek in Wolvega heeft aangetoond dat predatie in combinatie met een verdere afbraak in een sedimentatietank de hoeveelheid secundair slib sterk kan terug brengen. In de wetenschap dat dit proces nog in een eerste ontwikkelingsfase verkeert, mag verondersteld worden dat de procesvoering in de loop der jaren alleen nog maar zal verbeteren.

Voor de economische analyse er vanuit gegaan dat het mogelijk moet zijn om 65% reductie te realiseren; dit is vergelijkbaar met de 64% die gedurende de twee jaar proeven in Wolvega zijn gerealiseerd. Verder zijn de volgende economische kengetallen gebruikt (tabel 9.1).

TABEL 9.1

UITGANGSWAARDEN ECONOMISCHE FACTOREN

| | | |
|--|----------|----------------------|
| Afschrijvingstermijn bouwkundig | 15 | jaar |
| Afschrijvingstermijn mechanisch/elektrisch | 15 | jaar |
| Rente | 5 | % van de investering |
| Onderhoud bouwkundig | 5 | % van de investering |
| Onderhoud mechanisch/elektrisch | 6 | % van de investering |
| Personeelskosten dagdienst | € 50.000 | per jaar |
| Elektriciteitsverbruik | € 0,13 | per kWh |
| Kosten conventionele slibverwerking | € 600 | per ton ds |
| Rendement slibafbraak wormensysteem | 65% | op ds basis |

Verder moet er een afweging worden gemaakt tussen de afbraak in de wormenreactor en in het effect dat dit heeft op de afbraak in de tweede anaerobe stap. Hierbij zijn twee keuzes mogelijk, namelijk het maximaliseren van de totaal afbraak, hetgeen in de praktijk er op neer komt dat de afbraak in de wormenreactor gemaximaliseerd wordt, of een maximalisatie van de gasproductie, waarbij een deel van het slib niet via de wormenreactor gaat maar via een bypass direct in de sedimentatietank komt.

Een van de voordelen van het proces is de kleinschaligheid en het feit dat het op locatie kan worden toegepast. Dit voorkomt veel transport van slib.

⁷ Wiegant, W. M., M. Wurdemann, H. E. Kamphuis, J. van de Marel & W. F. Koopmans (2005). Slibketenstudie. Onderzoek naar de energie- en kostenaspecten in de water- en slibketen. STOWA, the Netherlands. Rapport 2005-26; Hfd 5.

Om de kosten laag te houden- zowel de investeringskosten als ook de operationele kosten- is gekozen voor een standaard ontwerp. Hierbij is gekozen voor twee schaalgroottes, namelijk een installatie voor de verwerking van 500 ton een een voor 1.000 ton droge stof slib per jaar. In de economische evaluatie is uitgegaan van de cijfers voor de installatie van 1.000 ton.

In tabel 9.2 zijn de verwachte kosten van het proces weergegeven.

TABEL 9.2

KOSTENOVERZICHT VAN HET PROCES

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| Investering [1.000 ton ds /jaar] | € 700.000 |
| Afschrijving | € 47.000 |
| Rente | € 17.500 |
| Onderhoud | € 24.000 |
| Personeelskosten | € 12.500 |
| Energie* 320.000 kWh _e | € 40.000 |
| Methaangas 175.000 m ³ | p.m. |
| totale jaarkosten | € 141.000 |
| per ton verwerkt slib | € 141 |
| per ie ₁₃₆ | € 2,80 |
| totale slibverwerkingskosten (/t) | € 350 |
| besparing op slibverwerking | 40% |

*uitgaande van gebruik restwarmte voor verwarming.

De integrale kostprijs van het verwerken van slib door wormen bedraagt € 150 per ton ds slib of € 3 per ie₁₃₆. Dit is ongeveer een kwart van de gemiddelde variabele kostprijs voor slibverwerken [€ 600/ton ds], zodat de totale slibverwerkingskosten 40% lager uitkomen [€ 350/ton ds].

De kapitaalslasten bedragen 46% van de jaarkosten; de operationele kosten 54%. De bedieningskosten zijn gebaseerd op een “stand alone” situatie.

De bruto investering van 700.000 euro is exclusief grondwerk en eventueel benodigde fundering. Bij de berekening van de benodigde energie is uitgegaan dat het geproduceerde biogas gebruikt wordt om te verwarmen. In de investering zijn andere mogelijke toepassingen van het gas niet meegenomen (Appendix 11).

Door de verwerking van 1.000 ton ds slib van een 50.000 ie₁₃₆ RWZI wordt zo'n € 250.000 bespaard. De terugverdientijd komt daarmee op een kleine 3 jaar.

10

PILOTREACTOREN

10.1 RESULTATEN EN DISCUSSIE

De resultaten van de pilot wormenreactoren op de locaties Nieuwegein, Westpoort, Alkmaar en St. Maartensdijk waren vergelijkbaar met Wolvega wat betreft de belangrijkste biologische parameters (tabel 10.1). Daarnaast waren er een aantal in het oog springende verschillen.

Met name de wormenbiomassa (X_{wn}) was over het algemeen lager in de pilots dan in de praktijkschaal wormenreactor in Wolvega. Dit werd veroorzaakt doordat de pilots niet zo geavanceerd bestuurd werden als het systeem in Wolvega. Hierdoor onstonden relatief vaker technische storingen met ineenstorting van de wormenpopulatie tot gevolg. Ondanks de snelle herstelperiode van ongeveer 2 weken was hierdoor de gemiddelde populatiedichtheid lager dan in Wolvega.

Opvallend is ook dat de biomassa specifieke omzettingssnelheid (q_s) gemiddeld wat hoger lag in de pilots. Dit kan verklaard worden doordat de wormen minder beperkingen hebben met de stofoverdracht bij lagere populatiedichtheden.

De relatief hoge biomassa specifieke omzettingssnelheden compenseren in dit geval gedeeltelijk voor de lagere wormbiomassa dichtheden met als gevolg dat de volume specifieke afbraak in de pilots toch goed vergelijkbaar was met Wolvega.

Voorbezinking (Nieuwegein, Alkmaar en Westpoort) had geen merkbare invloed op de wormen. Tijdens de proeven met een pilot wormenreactor op RWZI Nieuwegein is PAX gedoseerd in de beluchtingstank waarbij geen merkbare effecten op de wormen zijn geconstateerd. Ook ijzerdosering in de beluchtingstank van RWZI's Alkmaar en Wolvega had geen invloed.

Fosfaatconcentraties bleven relatief laag in de pilots. Zelfs in de wormenreactoren die gevoed werden met bio-P slib was de concentratie gemiddeld niet hoger dan 2 mg/l. Dit is verwonderlijk omdat bij een slibafbraak van 0,5 kg ds/m³/d een fosfaatvrijgave van tussen de 5-20 g/m³/d zou worden verwacht, afhankelijk van het percentage biologisch gebonden fosfaat in het slib. Bij een hydraulische verblijftijd van 10 uur is 3-10 mg/l fosfaat te verwachten, dit is echter niet waargenomen.

De enige pilot die afwijkende resultaten gaf, was de reactor in Vianen. Het slib van Vianen was op het moment van het onderzoek echter niet representatief met een gemiddelde SVI van boven de 200 ml/g als gevolg van het hoge gehalte aan filamenteuze bacteriën. De voorlopige conclusie van het onderzoek in Vianen was dan ook dat de wormen significant belemmerd worden als het veel draadvormers bevat. Dit probleem is echter makkelijk te verhelpen door het doseren van PAX. Hiervan is bekend dat dit geen nadelig effect heeft op de populatiedynamica van de wormen.

10.2 CONCLUSIE PILOTS

Het proces bleek inzetbaar op alle geteste RWZI's waar de omstandigheden normaal waren, ongeacht de aanwezigheid van Bio-P of voorbezinking. Aanwezigheid van draadvormers in de RWZI bleek het proces te remmen.

TABEL 10.1 VERGELIJKING VAN DE KENGETALLEN VOOR DE PILOT WORMENREACTOREN MET DE PRAKTIJSCHAAL WORMENREACTOR WOLVEGA

| Kengetal* | Locatie | | | | | |
|------------------------------------|---------|------------|--------|-----------|---------|------------------|
| | Wolvega | Nieuwegein | Vianen | Westpoort | Alkmaar | St. Maartensdijk |
| rs (kg ds slib/m ³ /d) | 0,8 | 0,7 | X | 0,7 | 0,7 | 0,5 |
| Xwn (kg ds wormen/m ³) | 1,9 | 1,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 1,0 |
| qs (kg ds slib/kg ds wormen/d) | 0,5 | 0,5 | X | 0,9 | 0,6 | 0,5 |
| μ (/d) | 0,1 | 0,1 | X | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| Y (kg ds wormen/kg ds slib) | 0,2 | 0,2 | X | 0,2 | 0,3 | 0,3 |

* Zie materiaal en methode paragraaf 3.3

11

CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Op basis van de praktijkschaal proef in Wolvega kan worden concludeerd dat het wormenproces de hoeveelheid spuislib met 65% reduceert. Proeven met pilotreactoren op verschillende zuiveringen wijzen uit dat het proces toegepast kan worden op de typische laagbelaste zuiveringen zoals die in Nederland voorkomen. Het proces kan als een extra stap worden gekoppeld aan het bestaande zuiveringsproces, in de sliblijn aan het einde van het proces of als tussenstap bij het retourslib. De terugverdiëntijd is kort zodat een investering goed lonend is te maken. Bovendien belooft het een aantal milieuvoordelen zoals minder transport, minder afval en een positieve energiebalans.

De toevoeging van een tweede anaerobe stap heeft geresulteerd in een stabiel en robuust proces, waarbij de fluctuaties in de afbraak in de wormenreactor gecompenseerd worden. Hiermee is het belangrijkste nadeel dat tot nu toe aan de predatie van slib door wormen kleefde, namelijk de onbeheersbaarheid van het proces, ondervangen.

Het proces staat nog aan de beginfase van zijn ontwikkeling. Ongetwijfeld zullen verder onderzoek en praktijkervaringen nog leiden tot verdere verbeteringen van het proces, maar in het huidige stadium van ontwikkeling kan dit proces al direct een bijdrage leveren.

In het bijzonder is onderzoek naar de rol van de wormen in het ontsluiten van het slib en naar de processen die zich afspelen in de anaerobe stap gewenst. Een afbraak van meer dan 50% van de drogestof bij lage temperaturen is tot nu toe nooit beschreven en komt dan ook tegen-intuïtief over, evenals de nauwelijks wijzigende verhouding organische/anorganische fractie van het slib bij deze hoge afbraakpercentages. Een beter begrip van deze processen kan wellicht de weg openen naar een nieuw perspectief op slibverwerking.

De anorganische fractie nam slechts beperkt toe maar minder dan zou worden verwacht. Dit komt waarschijnlijk doordat een deel van de anorganische fractie is omgezet en via de waterfase is afgevoerd; dit is nog een belangrijk onderzoekspunt.

REFERENTIES

1. CBS, webmagazine, 22 mei 2006
2. Stowa rapport 2002-17 "Slibpredatie door inzet van oligochaete wormen"
3. Intern TNO-rapport R2004/193: Reductie zuiveringslib door borstelwormen: Fase 2 kweekmethoden en slibafbraak door R.T. van Houten in opdracht van Waterstromen bv en Elsdon bv; mei 2004.
4. Elissen, T. L. G. Hendrickx, H. Temmink et al., *Water Research* 40 (20), 3713 (2006).
5. Müller (1773) *Vermium terrestrium et fluviatilium*
6. P. Lowe and S. Williamson, *Water Pollution Control* 82 (4), 457 (1983).
7. Wiegant, W. M., M. Wurdemann, H. E. Kamphuis, J. van de Marel & W. F. Koopmans (2005). Slibketenstudie. Onderzoek naar de energie- en kostenaspecten in de water- en slibketen. STOWA, the Netherlands. Rapport 2005-26; Hfd 5.

APPENDICES

APPENDIX 1

MEET- EN BEMONSTERSHEMA

| Type | Meetpunt * | Meetfrequentie (/week) | | Betrouwbaarheidsinterval** |
|--|-------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| | | Wolvega 125 m ³ | Pilot 5 m ³ | |
| Drogestofconcentratie | 0, 1 | online*** (2) | IBUK**** | 10% |
| Volume debiet | 0, 0b, 1 | online (1) | 5 | 5% |
| Export debiet | 3 | 0,05-1 | nvt | 5% |
| Export concentratie | 3 | 0,05-1 | nvt | 10% |
| Temperatuur | WR, ST | online (nvt) | 5 | 1% |
| Opgeloste zuurstof | WR | online (nvt) | 5 | 5% |
| Ammonium | WR, 0, 1, 2 | 1 | 1 | 10% |
| Nitriet | WR, 0, 1, 2 | 1 | 1 | 10% |
| Nitraat | WR, 0, 1, 2 | 1 | 1 | 10% |
| Fosfaat | WR, 0, 1, 2 | 1 | 1 | 10% |
| Aangehechte massa per m ² (kg ds/m ²) | WR | 2 | 2 | 20% |
| %wormen op drager (op massa droogewicht basis) | WR | - | 2 | 20% |
| Wormen in waterfase (levende) | WR | 5 | 5 | 10% |
| Wormen in waterfase (dode) | WR | 5 | 5 | 10% |

* Zie schema paragraaf 3.1: (WR= wormenreactor, ST= sedimentatietank, 0 = instroom WR, 1 = uitstroom WR, 2 = waterstroom ST, 3= slibstroom ST)

** Maximale 95% betrouwbaarheidsinterval van de metingen/ijkingen

*** elke 2 sec (aantal ijkingen per week staat tussen haakjes)

**** IBUK = automatische bemonstering elk half uur

APPENDIX 2

MASSABALANS SLIBAFBRAAK

WORMENREACTOR

$$\textit{Accumulatie} = \textit{Transport} - \textit{Conversie}$$

$$\textit{Transport}_{IN} = F_{IN} \cdot X_{IN}$$

$$\textit{Transport}_{UIT} = F_{UIT} \cdot X_{UIT}$$

$$\textit{Transport} = F_{IN} \cdot X_{IN} - F_{UIT} \cdot X_{UIT}$$

$$\textit{Accumulatie} = 0$$

$$\textit{Conversie} = F_{IN} \cdot X_{IN} - F_{UIT} \cdot X_{UIT}$$

| | | |
|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Accumulatie | Ophoping drogestof in reactor | (kg ds/d) |
| Transport | Netto transport drogestof | (kg ds/d) |
| Conversie | Slibafbraak | (kg ds/d) |
| Transport _{IN} | Massatransport influent | (kg ds/d) |
| Transport _{UIT} | Massatransport effluent | (kg ds/d) |
| F _{IN} | Influent debiet | (m ³ /d) |
| F _{UIT} | Effluent debiet | (m ³ /d) |
| X _{IN} | Concentratie drogestof influent | (kg ds/m ³) |
| X _{UIT} | Concentratie drogestof effluent | (kg ds/m ³) |

APPENDIX 3

SPECIFICATIES RWZI 'S

| | Wolvega | Nieuwegein | Vianen | Alkmaar | Westpoort | St Mdijk | |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Capaciteit | 35.000 | 140.000 | 53.000 | 100.000 | 400.000 | 41.000 | ie136 |
| Aandeel industrie | 20% | 0% | 0% | 0% | 33% | 30% | % |
| Type zuivering | Actief slib | Actief slib | Actief slib | Actief slib | Actief slib | Actief slib | - |
| Voorbezinking (Ja/Nee) | Nee | Ja | Nee | Ja | Ja | Nee | - |
| Type P verw. (Chem/Bio) | Chem | Chem | Bio | Chem | Bio | Bio | - |
| Chemicalie | FeSO4 | PAX* | - | FeSO4CL | FeSO4 | - | - |
| Me/P | 0,41 | 0,25 | - | 0,31 | 0,17 | - | mol/mol |
| N effluent | 6,2 | 16 | 4 | 13,8 | 5,1 | 5,0 | mg N/l |
| P effluent | 1,3 | 1,8 | 1,9 | 1,5 | 0,7 | 0,8 | mg P/l |
| BZV/N verhouding influent | 4,4 | 2,3 | 3,6 | 3,6 | 5,3 | 4,7 | - |
| BZV/P verhouding influent | 28 | 20 | 20 | 23,7 | 32 | 22,5 | - |
| Slibbelasting | 0,026 | 0,052 | 0,029 | 0,086 | 0,06 | 0,04 | kg BZV/kg ds.d |
| Slibleeftijd | 30 | 22 | 30 | 29 | 19 | 25 | d |
| Spuislibproductie | 1.600 | 3.400 | 1.404 | 1.350 | 11.833 | 950 | kg ds/d |
| Gloeirest actief slib | 30% | 36% | 26% | 31% | 24% | 40% | % |
| SVI | 109 | 100 | 138-200 | 119 | 96 | 110 | ml/g |

*tegenaan draadvormers

APPENDIX 4

FORMULES KENGETALLEN

$$r_S = \frac{F \cdot (X_{IN} - X_{UIT})}{V_R}$$

$$q_S = \frac{r_S}{X_{wn}}$$

$$\mu = \frac{1}{X_{wn}} \frac{dX_{wn}}{dt}$$

$$Y = \frac{q_S}{\mu}$$

r_S : Volume specifieke afbraak snelheid (kg ds slib/m³.d)

q_S : Biomassa specifieke afbraak snelheid (kg ds slib/kg ds wormen.d)

X_{wn} : Actieve wormbiomassa (kg ds wormen/m³)

μ : Biomassa specifieke groeisnelheid (/d)

Y : Groeiofbrengst van wormen op slib (kg ds wormen/kg ds slib)

F : Volume debiet (m³/d)

X_{IN} : Ingaande drogestof concentratie (kg/m³)

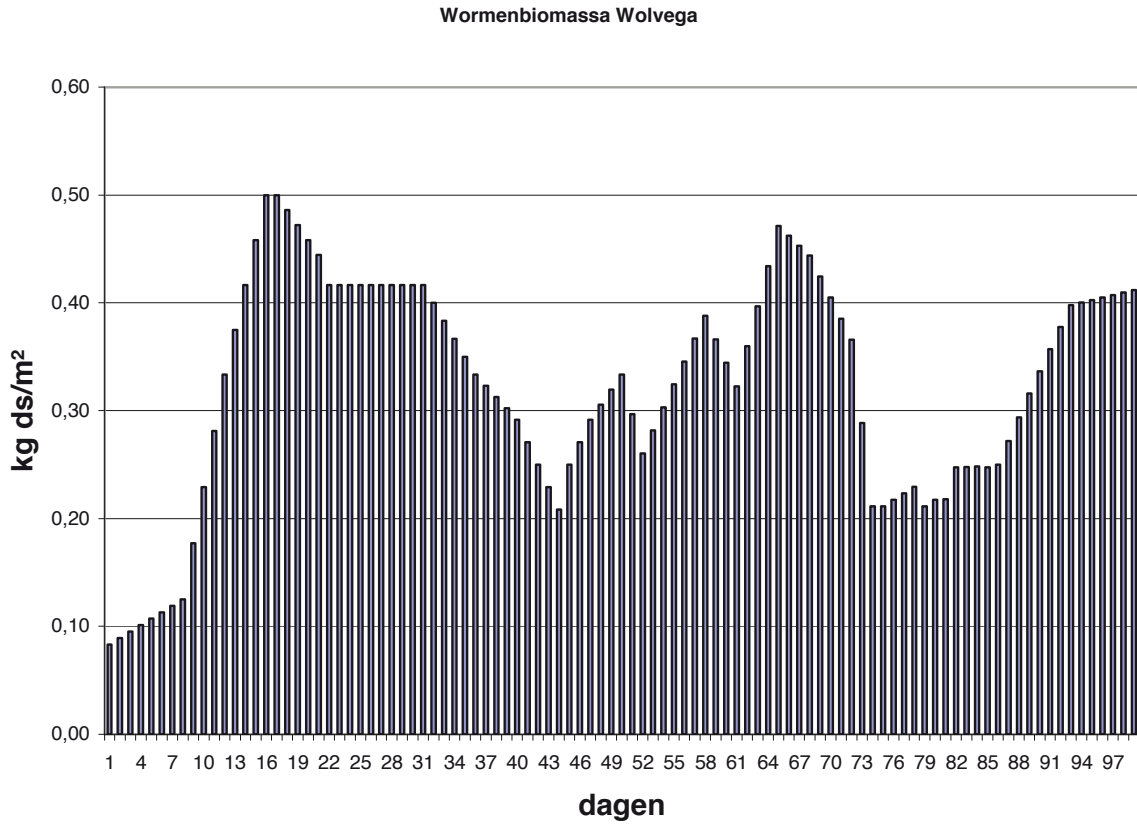
X_{UIT} : Uitgaande drogestof concentratie (kg/m³)

V_R : Reactorvolume (m³)

t : Tijd (d)

APPENDIX 5

VOORBEELD WORMENBIOMASSA DYNAMICA



APPENDIX 6

FORMULES

BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN

De betrouwbaarheids intervallen kunnen uitgerekend worden aan de hand van het onderstaande voorbeeld:

TABEL (TABEL 5 UIT PARAGRAAF 4.3): OVERZICHT VAN DE MATE VAN FLUCTUATIES VAN DE AFBRAAK IN DE VERSCHILLENDE PROCES STAPPEN VERGELEKEN MET DE FLUCTUATIES OVER HET TOTALE SYSTEEM (2-STAPS SYSTEEM). BEREKEND OVER DE PERIODE 2007-2008

| | Afbraak % | Betr. 95%* | Betr. 95% (t.o.v. van afbraak)** |
|------------------|-----------|------------|----------------------------------|
| Wormenractor | 26% | 9% | 34% |
| Sedimentatietank | 50% | 12% | 23% |
| 2-staps systeem | 62% | 8% | 13% |

$$* \frac{2 \cdot \text{stdev}(n_1 : n_x)}{\sqrt{x}}$$

$$** \frac{2 \cdot \text{stdev}(n_1 : n_x)}{\sqrt{x}} / \mu_{1..x}$$

waar $\mu_{1..x}$ het gemiddelde is van de waarnemingen n_1 tm n_x

APPENDIX 7

PCB CONCENTRATIES IN SECUNDAIR SLIB RWZI WOLVEGA



WETTERSKIP FRYSLÂN


ANALYSECERTIFICAAT

| | | | |
|----------|---------------|-----------------------------|------------------------------|
| Project | 2008wfwzP0004 | Slibbemonstering | Datum |
| Opdracht | 4 | Slibbemonstering 13-05-2008 | 17-07-2008 |
| | | | Pagina 2 van 2 |
| | | | Rapportcode 2008R00633 (001) |
| | | | Monstercode 0603164 |

| Omschrijving analysemethode | Resultaat | Eenheid | Opn. Voorschrift | Erk. | Nutstestad |
|---|-----------|---------------|------------------|------|------------|
| PCB en OCB | | | SPV A019 | Q | |
| PCB 52 | 2.6 | ug/kg ds | | | |
| PCB 101 | 1.7 | ug/kg ds | | | |
| PCB 118 | < | 2 ug/kg ds | | | |
| PCB 138 | < | 2 ug/kg ds | | | |
| PCB 153 | 1.8 | ug/kg ds | | | |
| PCB 180 | < | 1 ug/kg ds | | | |
| Polycyclische Aromatische Koolw. (PAK) | | | SPV A005 | Q | |
| Naftaleen | 0.61 | mg/kg ds | | | |
| Aceftaflueen | < | 0.5 mg/kg ds | | | |
| Aceftaflueen | < | 0.3 mg/kg ds | | | |
| Fluoreen | < | 0.1 mg/kg ds | | | |
| Fenantreen | < | 0.26 mg/kg ds | | | |
| Anthraceen | < | 0.05 mg/kg ds | | | |
| Fluorantheen | < | 0.05 mg/kg ds | | | |
| Pyreen | 0.45 | mg/kg ds | | | |
| Benzo(a)anthraceen | 0.26 | mg/kg ds | | | |
| Chrysoen | 0.28 | mg/kg ds | | | |
| Benzo(b)fluorantheen | 0.37 | mg/kg ds | | | |
| Benzo(k)fluorantheen | < | 0.1 mg/kg ds | | | |
| Benzo(a)pyreen | 0.34 | mg/kg ds | | | |
| Dibenzo(a,h)anthraceen | < | 0.05 mg/kg ds | | | |
| Benzo(g,h,i)peryleen | 0.11 | mg/kg ds | | | |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyreen | 0.24 | mg/kg ds | | | |
| Totaal geneten PAK's (10 van VROM) | 3.20 | mg/kg ds | | | |

Gebruikte afkortingen:
- * Uitgevoerd

Erk. (Erkenning):
- Q = door Raad voor Accreditatie geaccrediteerde methode



Hoofd laboratorium : Dr. Ir. R.A. van der Meer
Leeuwarden, 17-07-2008

b.a.



Ing. W. Sijkema
Teamcoördinator laboratorium

De vermelde analyseresultaten hebben uitsluitend betrekking op het onderzochte monster. Op aanvraag is het document 'Laboratoriumonderzoek Methoden en Tarieven' met specificaties van de toegepaste analyses en bemonsteringsmethoden verkrijgbaar. Zonder schriftelijke toestemming van het laboratorium mag dit rapport niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.



Laboratorium Wetterskip Fryslân
Harlingerstraatweg 113
Postbus 36, 8900 AA Leeuwarden

T: 058 - 292 21 32
F: 058 - 292 29 77

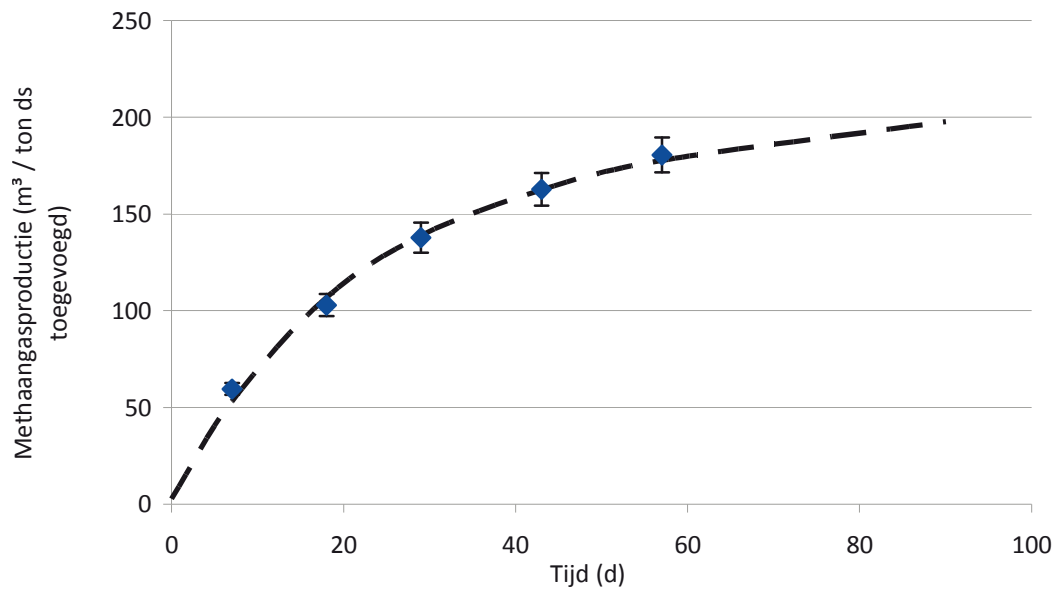
laboratorium@weterskipfryslan.nl
www.weterskipfryslan.nl

APPENDIX 8

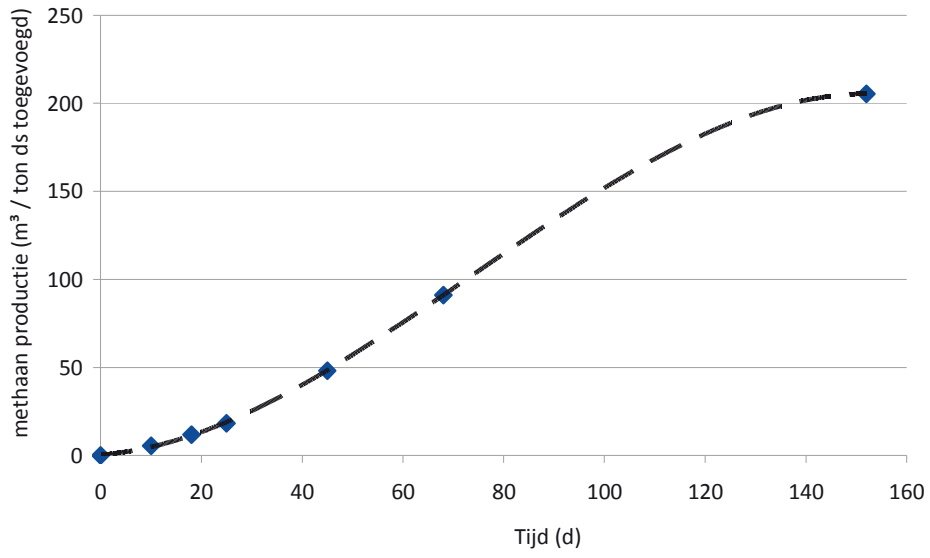
RESULTATEN BIOGAS PRODUCTIE UIT WORMENSLIB

In het laboratorium van de TU Delft zijn een groot aantal proeven gedaan met verschillende slibtypen om het effect van de wormen op het slib met betrekking tot de afbreekbaarheid en biogas productie van het slib in de sedimentatietank te onderzoeken. In totaal 20 series in triplo uitgevoerd met 100 ml batch reactoren bij verschillende temperaturen. De belangrijkste resultaten zijn de methaangasproductiecurves voor wormenslib bij 25 en 12 °C. Daarnaast is ook de methaangasproductie van het vergisten van wormenbiomassa gemeten.

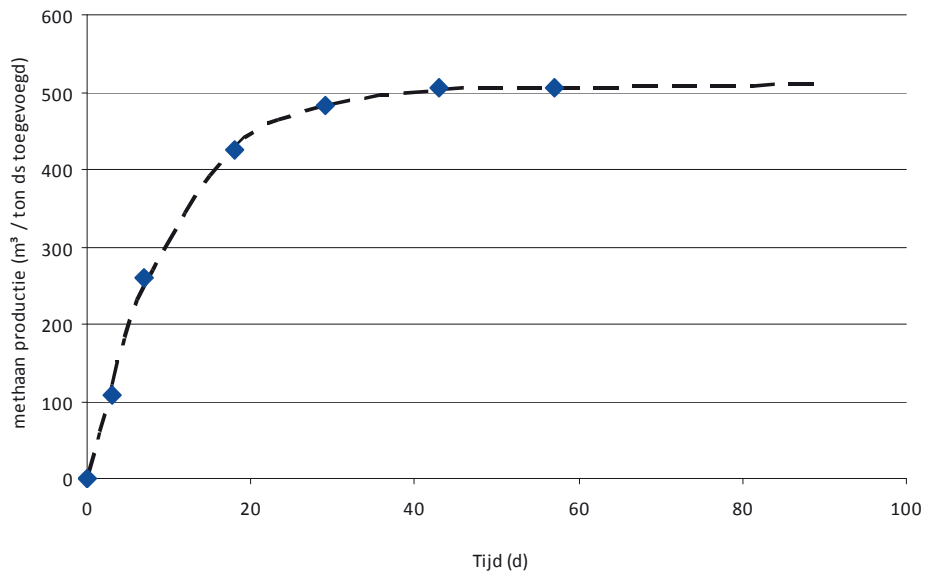
Vergisting wormenslib 25 °C



Vergisting wormenslib 12 °C



Vergisting wormenbiomassa 25 °C



APPENDIX 9

PROCESVOERING

LOCATIE EN SCHAALGROOTTE

De toepassing van dit proces kan zowel centraal als decentraal plaatsvinden. Eén van de voordelen van een decentrale werkwijze op de RWZI is minder slibafvoer. De beperkte footprint [850 m² voor 1.000 ton ds/jaar] maakt dat het proces op de meeste kleine, landelijke zuiveringen meestal wel kan worden ingepast. Een nadeel is echter dat het nuttig gebruik van het geproduceerde biogas in kleine hoeveelheden niet erg kosten effectief is.

In principe kan een reactor op iedere grootte worden ontworpen. De ontwerpkosten gaan dan echter sterk meetellen. Grote “economies of scale” kunnen worden gerealiseerd in zowel investeringen, onderhoud en bediening als met een gestandaardiseerd ontwerp wordt gewerkt. Oorspronkelijk is er uitgegaan van één ontwerp, namelijk voor 500 ton ds/jaar. Met een tweede ontwerp voor 1.000 ton ds/jaar kan het gehele scala tot 200.000 ie₁₃₆ worden gedekt. In bestaande grote RWZI's, waarbij al vergisters aanwezig zijn, kunnen deze eventueel in het ontwerp worden geïntegreerd waarmee de investeringen en de footprint beperkter worden. De lange verblijftijden van 80 dagen in de tweede stap maakt dat er een groot volume nodig is. Indikken om het volume te reduceren gaat ten koste van het afbraakproces. Wel is het mogelijk om de tweede stap in twee fasen te doen plaatsvinden. Dit kan het volume reduceren, maar hiervoor is nog onderzoek nodig.

INTEGRATIE EN AUTOMATISERING

Het proces heeft slib, water en stroom nodig. Proeven in Wolvega hebben aangetoond dat de reactor goed werkt met retourslib of slib uit de indikker. In dit laatste geval moet het slib niet te oud zijn [maximaal 2,5 dagen] en ligt het zuurstof verbruik wat hoger in verband met de aanwezige NH₄⁺. In het geval van spuislib wordt de installatie aan het eind van het zuiveringsproces ingezet als een extra stap voordat het slib de zuivering verlaat. Het kan ook in de retourslib-lijn worden geplaatst waarbij dan de spuislib-lijn komt te vervallen.

Bij het proces komt een continue stroom van “P” en “N” in een relatief lage concentratie <20 mg/l. Dit levert een extra belasting op van respectievelijk 5,5% en 7% voor de zuivering [zie paragraaf 5.1]. Dit zal voor de meeste zuiveringen geen probleem opleveren. De eventuele kosten hiervan zijn niet meegerekend in dit rapport.

Het proces is zo ontworpen dat het volledig op afstand kan worden bediend. Indien gewenst kan deze bediening aan bestaande SCADA systemen worden gekoppeld.

In de kostenberekeningen [hfd 9] is rekening gehouden met 0,25 FTE voor de bediening uitgaande van extern beheer. Qua kennis en type werkzaamheden is er geen reden waarom de beheerders van de RWZI deze taak niet zouden kunnen vervullen.

PROCES PARAMETERS EN GEVOELIGHEDEN

Oligochaeten zijn hogere organismen dan bacteriën. Dit stelt bepaalde eisen aan het proces en maakt dat het proces ook binnen rigoureuzere randvoorwaarden moet worden bedreven dan men bij een typische RWZI gewend is.

Belangrijk is dat het proces zo constant mogelijk wordt bedreven, met minimale fluctuaties anders zijn de wormen van slag en valt de afbraak terug.

De zuurstofspanning is een belangrijke factor in het proces en in de afbraak. Hogere zuur-

stofconcentraties zijn positief gecorreleerd met meer afbraak. Dit is een ontwerpcriterium waarbij de grootte van de reactor en het gewenste afbraakpercentage worden afgezet tegen de investeringen en operationele kosten.

In praktijk wordt met een zuurstofspanning van 4-5 mg/l gewerkt. Kortstondige dalingen van de zuurstofspanning onder de 0,5 mg/l resulteert in sterfte van de wormen [zie ook paragraaf 4.3].

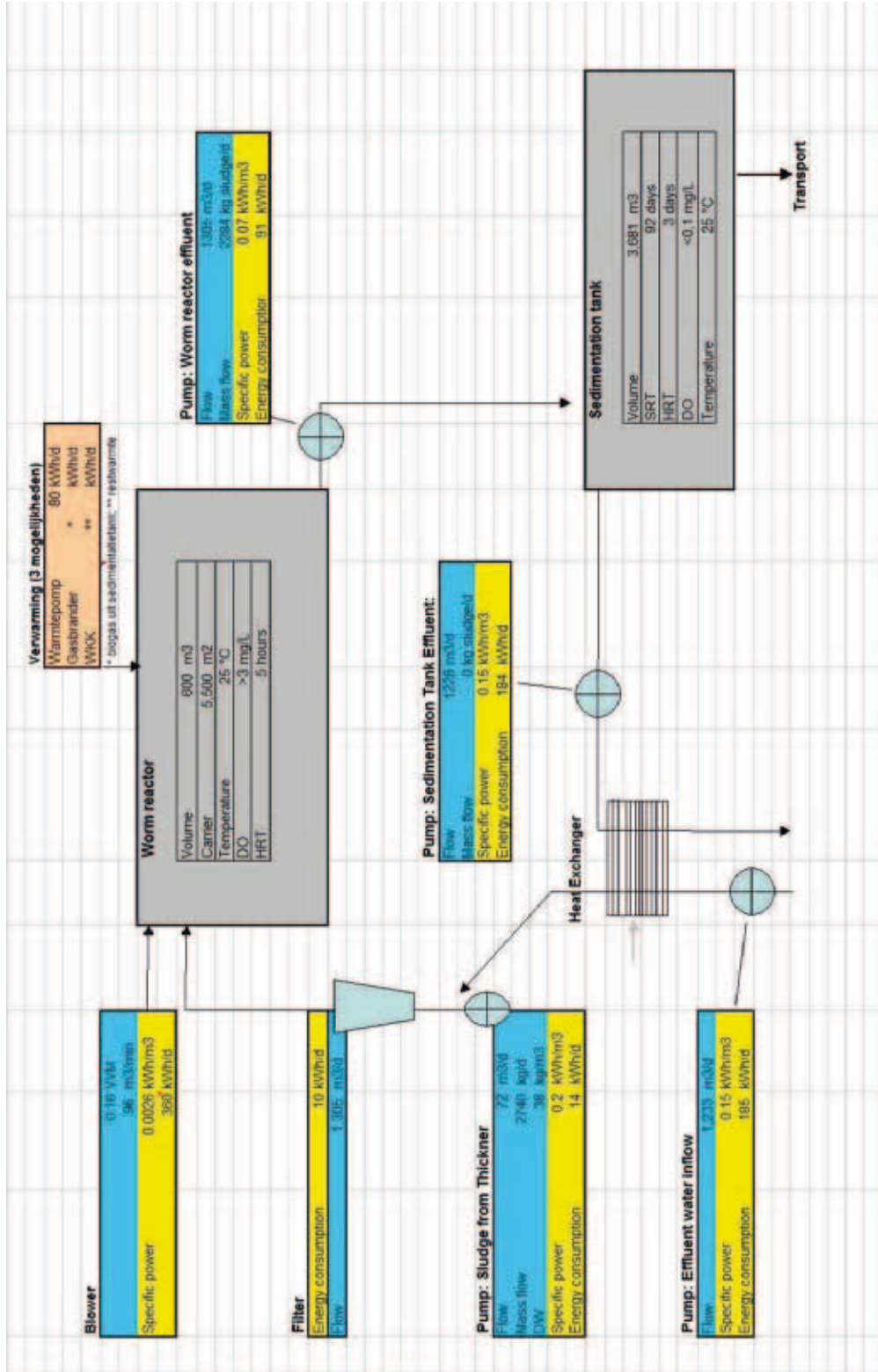
Er is een negatieve correlatie met ammonium. Hoge concentraties leiden tot verminderde groei en bij concentraties boven de 30 mg/l op termijn tot de dood van de wormen. In het algemeen zal dit geen probleem zijn. De procesomstandigheden in de wormenreactor zijn zodanig dat het ammonium grotendeels wordt genitrificeerd tot nitraat en nitriet.

Uit de proeven met de pilots is gebleken dat de wormen niet kunnen gedijen op slib met een hoge concentratie draadvormers. Het toevoegen van PAX in de beluchtingstank lost dit probleem op zonder nadelige gevolgen voor de wormen.

De wormen "leven" op secundair slib. Proeven op zuiveringen met een voorbezinker [Nieuwegein, Westpoort, Holten] hebben aangetoond dat dit geen invloed heeft op de afbraak en de groeisnelheid van de wormen.

APPENDIX 10

ENERGIEVERBUIK NIEUWE ONTWERP



APPENDIX 11

ENERGIEBALANS VAN DE GESELECTEERDE SCENARIOS

Bij de berekening van de energiebalans over het proces staat de aanwending van het geproduceerde gas centraal. Voor pompen en beluchting verbruikt het proces 320.000 kWh per jaar. Daarnaast moet het systeem op temperatuur gehouden worden. Bij de opstelling in Wolvega gebeurt dit met een warmtepomp. Een warmtepomp voor een 1.000 ton ds/jaar installatie verbruikt 90.000 kWh/jaar extra. De energie-inhoud uit het biogas is 1.800.000 kWh/jaar. Het restslib levert via conventionele verwerking (drogen, verbranden) nog 40.000 kWh/jaar aan thermische energie op. In totaal levert een positief energietoeslag op van 1.440.000 kWh/jaar of te wel 29 kWh/ie₁₃₆.

De energiewaarde die aan het biogas wordt toegerekend is echter sterk afhankelijk van het rendement van het proces waarin het biogas wordt aangewend. In de praktijk zal het biogas niet vaak met een efficiency van 100% in warmte omgezet worden*.

Het gas aangewend worden voor bijvoorbeeld opwerking tot aardgaskwaliteit, of omgezet worden in elektriciteit in een WKK of met behulp van een microturbine. De economische rentabiliteit van deze processen is laag. Zo laag dat als dit een aparte investeringsbeslissing zou zijn, deze negatief zou uitvallen. Echter in combinatie met de investering in de wormen-reactor is een dergelijke investering te overwegen. Weliswaar gaat dit ten koste van het rendement en de terugverdientijd, maar deze blijven ook met een additionele investering voor het opwekken van elektriciteit of het opwerken tot aardgaskwaliteit nog altijd aantrekkelijk. Zo gaat de terugverdientijd bij een extra investering in een microturbine naar ongeveer 4 jaar.

* Met een microturbine met een efficiëntie van 27% wordt het energietoeslag 193.000 kWh/j [4kWh/i.e./j] en bij het opwerken tot aardgas 1.310.000 kWh/jaar [26kWh/i.e./j]

