

stowa

INFLUENT FIJNZEVEN IN RWZI'S



RAPPORT

2010
19

stowa

INFLUENT FIJNZEVEN IN RWZI'S

STOWA

2010

19

ISBN 978.90.5773.477.9



stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE STOWA, Amersfoort

PROJECTUITVOERING

C. Ruiken, Waternet
E. Klaversma, Waternet
G. Breuer, Waternet
R. Neef, Witteveen + Bos (thans Brightwork)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

E. Rekswinkel, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
P. Simoes, Afval- en Energiebedrijf Amsterdam
S. Marijnissen, Waterschap Brabantse Delta
D. Koot, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
M. Baars, Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpernerwaard
M. van Loosdrecht, Technische Universiteit Delft
A. van Nieuwenhuijzen, Witteveen+Bos
P. Schyns, Waterschap Rijn & IJssel
C. Uijterlinde, STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2010-19
ISBN 978.90.5773.477.9

SAMENVATTING

INLEIDING

Toiletpapier wordt in de meeste westerse landen geloosd samen met het afvalwater naar een rioolwaterzuivering (rwzi). Een gemiddelde inwoner van West Europa verbruikt gemiddeld circa 10 – 14 kg per jaar, dit is in de orde grootte van 30% tot 50% van de zwevende bestanddelen van het influent. Desondanks is er geen onderzoek verricht naar de afbraakmechanismen van toiletpapier (cellulose) in het rioolstelsel en de rwzi. De techniek waarmee het afvalwater en slib worden verwerkt is om deze reden mogelijk niet optimaal. Toiletpapier (papiervezels) kan met behulp van fijnzeven met een maaswijdte < 0,5 mm uit het afvalwater verwijderd worden.

Het doel van deze studie is om de economische en praktische haalbaarheid van het proces fijnzeven te bepalen als alternatief voor het gangbaar toegepaste voorbezinken van afvalwater. Dit is onderzocht voor de rwzi's Blaricum zonder voorbezinktank, Uithoorn met voorbezinktank en nieuwbouwproject rwzi Weesp. Voor deze locaties is de benodigde investering voor een zeefinstallatie vastgesteld en de energiebalans voor de rwzi en de gehele slibverwerking opgesteld.

Voorafgaand hieraan is op rwzi Blaricum, in de periode september t/m december 2008, een pilot onderzoek uitgevoerd met twee verschillende zeven. Met dit onderzoek is de technische werking en het verwijderingsrendement van de zeven bepaald.

Ook zijn de afzetmogelijkheden geïnventariseerd in samenwerking met het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). Allerlaatst is de afbraak van cellulose in een rwzi onderzocht.

De hypothese is dat een zeefinstallatie bekostigd kan worden uit het verschil van de kosten voor de huidige slibverwerking en de goedkopere afzet van zeefgoed. Zeefgoed heeft na persen een drogestof gehalte van circa 50% en kan als bijkomend voordeel mogelijk energetisch effectiever verwerkt worden dan slib. Daarnaast kan toepassing van een fijnzeef ook operationele voordelen opleveren, bijvoorbeeld door minder spinselvorming (in elkaar draaien van haren en vezels). Tevens zal bij bestaande rwzi's zonder voorbezinktank er ook op beluchtingsenergie bespaard worden.

CONCLUSIES EN DISCUSSIE

Er is wereldwijd geen ervaring met de inzet van fijnzeven met een maaswijdte gelijk of minder dan 0,5 mm als voorzuivering van een biologische zuivering. Zeven worden wel als mechanische zuivering ingezet zonder navolgende biologische zuivering. In Noorwegen worden daarmee hoge rendementen op zwevendestof verwijdering gerapporteerd (50% - 80%, met een maaswijdte van 0,35 mm). De ervaring daar is dat er een relatie bestaat tussen rendement, maaswijdte, hydraulische zeefbelasting ($m^3/m^2 \cdot h$), en afvalwatersamenstelling. Het effect van hoge rendementen op de samenstelling van het zeefgoed en de invloed op de verwerkbaarheid is onbekend.

Tijdens het pilot onderzoek in Blaricum zijn rendementen voor zwevendestof gemeten van circa 50% (bij een maaswijdte $\leq 0,5$ mm). Deze zijn vergelijkbaar met een voorbezinktank. Bij maaswijdtes hoger dan 0,5 mm daalt het rendement voor zwevendestof aanzienlijk. Het rendement voor N en P verwijdering is bij een zeef, bij 50% rendement op zwevende stof, ongeveer 0% en daarmee lager dan bij een voorbezinktank.

Bij gebruik van een fijnzeef is de fractie cellulose veel hoger dan bij een voorbezinktank (zie Tabel 1). De verwijdering in de voorbezinktank is ongeveer 50% en de resterende cellulose wordt voor 30-70% afgebroken in een gangbaar biologisch zuiveringsproces bij een verblijftijd van 20 tot 30 dagen.

TABEL 1 FRACTIES VAN CELLULOSE VAN DROGESTOF GEHALTE BEPAALD IN ONDERZOEK VAN WATERNET

	Fractie cellulose/ds
Influent	0,3 - 0,5
Zeefgoed	0,8
Primair slib	maximaal 0,3
Actief slib	0,1 - 0,15
Uitgestit slib	Circa 0,2

Uit het onderzoek zijn aanwijzingen gekomen dat de verhouding inert en langzaam afbreekbaar CZV van gezeefd influent gelijk is aan dat van voorbezonden water. Daarbij moet de kanttekening gemaakt worden dat een beperkt aantal metingen zijn uitgevoerd en dat de resultaten alleen geldig zijn voor rwzi Blaricum (100% huishoudelijk afvalwater). De werking van de AT zal bij een zeef of voorbezinktank dan vergelijkbaar zijn. Er is nog wel nader onderzoek noodzakelijk.

Er zijn diverse opties voor de verwerking van zeefgoed. In zeefgoed zijn de gehalten zware metalen laag en voldoen nagenoeg aan het zogenaamde BOOM-besluit. Er zijn mogelijkheden voor hergebruik door zeefgoed te drogen en als brandstof in te zetten. Een alternatief kan zijn om zeefgoed te verzuren. Productie van papier uit zeefgoed is technisch mogelijk, maar kan moeilijkheden geven met maatschappelijke acceptatie. Bij verwerking als afval zijn de kosten voor transport en afzet relatief gering omdat het zeefgoed tot 50% geperst kan worden. De verwerkingskosten zijn in de orde van € 20 - 100 per ton product.

De maximale hoeveelheid zeefgoed die jaarlijks geproduceerd kan worden door Waternet is relatief laag ten opzichte van andere biomassa reststromen. Dit kan nuttig gebruik verhinderen, omdat het voor afnemers mogelijk niet interessant is om een kleine afvalstroom zeefgoed te verwerken. Daarnaast is op dit moment de juridische status van zeefgoed niet duidelijk. Er zal in overleg met Agentschap nl bepaald moeten worden wat de classificatie van zeefgoed is. Roostergoed is nu bijvoorbeeld gevaarlijk afval, maar het ligt voor de hand dat voor zeefgoed een andere classificatie mogelijk is. Deze classificatie is van invloed op de afzetkosten. Daarom is de afval-classificatie van zeefgoed nodig voordat de verwerkingsroute bepaald kan worden.

Voor de onderzochte locaties Blaricum zonder voorbezinktank en Uithoorn met voorbezinktank blijkt dat, wanneer ongeveer de droog weer aanvoer (DWA) wordt gezeefd, een fijnzeefinstallatie bij een realistisch gekozen scenario zich in circa 7 – 10 jaar terugverdient. Bij behandeling van het volledige aanvoerdebiet van de rwzi is de terugverdientijd meer dan 15 jaar. Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat vooral de hydraulische zeefbelasting ($m^3/m^2.h$) en de surplusslibproductie na de zeef bepalend zijn voor de terugverdientijd.

Het blijkt uit deze cases dat toepassing van een fijnzeef bij een rwzi zonder bestaande voorbezinktank een kortere terugverdientijd heeft dan bij een rwzi met bestaande voorbezinktank. Voor rwzi Weesp is een variantenstudie uitgevoerd voor volledige nieuwbouw, waarbij een voorbezinktank vergeleken is met een zeefinstallatie. Het blijkt hieruit dat de investering niet

onderscheidend is voor beide systemen. Investerings in de sliblijn (gisting en ontwatering) bij inzet van een voorbezinktank en voorzieningen voor het eventueel drogen van zeefgoed zijn hierbij buiten beschouwing gebleven. De jaarlijkse lasten zijn bij de rwzi met zeefinstallatie iets lager dan bij de rwzi met voorbezinktank door de lagere kosten van verwerking van zeefgoed.

Met het toepassen van een fijnzeef op een rwzi, verandert ook de energiebalans van de zuivering. Er is meer elektriciteit nodig voor een fijnzeef dan voor een voorbezinktank, maar afvangen van zeefgoed kan zorgen voor minder beluchting en bovendien kan zeefgoed beter worden ontwaterd dan slib, waardoor er minder transportbewegingen zijn en de calorische waarde hoger is. Met een energiebalans is voor rwzi Blaricum (zonder voorbezinktank), rwzi Uithoorn (met voorbezinktank) en nieuwbouw rwzi Weesp inzicht verkregen in deze veranderingen. In de energiebalans is energieverbruik op de rwzi zelf meegenomen en ook het transport en de verwerking van slib/zeefgoed. Uitgangspunt was dat zeefgoed mechanisch tot 50% ontwaterd wordt en vervolgens verbrand mag worden in een biomassacentrale.

Uit de energiebalans is gebleken dat bij alle drie de rwzi's er meer energie bespaard kan worden naarmate een groter gedeelte van het influent gezeefd wordt. Het lijkt erop - onder voorwaarde dat verbranden van zeefgoed met een elektrisch rendement hoger dan 33% mogelijk is - dat fijnzeven vanuit overwegingen van energie een alternatief vormen voor voorbezinktanks. De besparing (ten opzichte van de referentie zonder fijnzeven) is minstens 40% en in bepaalde gevallen (energiezuinige zuivering met hoge slib/zeefgoed productie) kan zelfs netto energie worden geproduceerd.

AANBEVELINGEN

De keuze van het type zeef is belangrijk. De ervaringen met zeven bij membraanbioreactoren (MBR's) zijn door daar toegepaste grotere maaswijdte > 0,8 mm niet bruikbaar. Bij een ontwerptraject moet dit nadrukkelijk aandacht krijgen.

Inzet van een zeef kan één van de mogelijke oplossingen zijn om aan de effluentkwaliteit te kunnen blijven voldoen voor rwzi's die te kleine zuiveringscapaciteit hebben door hydraulische of biologische beperkingen

Uit de doorgeredende cases blijkt dat met name bij rwzi's zonder voorbezinktank een zeefinstallatie zich terugverdient en energetisch tot grote voordelen leidt zelfs indien er geen energieopwekking uit zeefgoed is. Om de technische ontwikkeling van zeven te stimuleren zou in beeld gebracht kunnen worden wat het marktpotentieel is.

De mogelijke opwerking van zeefgoed kan verder onderzocht worden. Vanuit de cradle to cradle gedachte lijkt papierproductie uit zeefgoed een prima oplossing, zeefgoed bestaat immers voor circa 80% uit cellulose, maatschappelijke acceptatie ontbreekt echter hiervoor. Productie van vetzuren zou een goed alternatief kunnen zijn. Wellicht dat aangesloten kan worden bij initiatieven conform de bio-based economy gedachte.

Er is een relatie tussen zeven en de MJA3-energie afspraken. Door inzet van zeven wordt in de rekenvoorbeelden een besparing van minstens 40% gehaald op voorwaarde dat de energie-inhoud van zeefgoed benut kan worden. Extern opgewekte energie zou bij de MJA3-energie toegerekend moeten worden aan de rwzi. De voorspelde positieve effecten op de energiebalans zou in praktijkonderzoek bevestigd moeten worden.

Bestaande rwzi's waar een zeef geplaatst wordt, kunnen soms met een zeer lage slibbelasting bedreven worden. Het effect op de effluentkwaliteit en slibproductie wanneer specifiek de component cellulose verwijderd wordt, is nog deels onbekend. Doordat na een zeef papiervezels afwezig zijn, is het effect op de slibontwatering een aandachtspunt.

Op rwzi Blaricum zal in 2010 een zeefinstallatie voor de DWA capaciteit worden gerealiseerd. Er is behoefte aan meer praktijkonderzoek. Het zou waardevol zijn indien nog één of meerdere onderzoeken op andere rwzi's gestart worden, bij voorkeur op rwzi's met volledig gescheiden zuiveringsstraten.

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

SUMMARY

INTRODUCTION

In most Western countries toilet paper is disposed of together with wastewater to a wastewater treatment plant (WWTP). An average Western European resident uses approximately 10 kg to 14 kg per annum, which represents 30% to 50% of the suspended solids of the influent. In spite of this no research has been conducted into the decomposition mechanisms of toilet paper (cellulose) in the sewage system and the WWTPs. The technology that is used to treat wastewater and sludge may not optimal for this reason. Toilet paper (paper fibre) can be removed from wastewater using fine-mesh screens with a mesh size of less than 0.5 mm.

The purpose of this study is to determine the economic and practical feasibility of fine-mesh sieves as an alternative to the commonly used approach of wastewater sedimentation. This has been examined in relation to the WWTPs in Blaricum which does not have a sedimentation tank and Uithoorn which has a sedimentation tank, and the new WWTP construction project in Weesp. The investment required for a sieve installation has been determined in the case of those plants, along with the WWTP energy balance and the entire sludge treatment process. Prior to this a pilot study was conducted at the Blaricum WWTP during the period from September up to and including December 2008 using two different types of sieves. That study determined the technical operation and separation efficiency rate of the sieves. Extraction possibilities have also been surveyed together with the Energieonderzoek Centrum Nederland [Energy Research Centre of the Netherlands] (ECN). Finally, the decomposition of cellulose in an WWTP has been examined.

It is hypothesised that a sieve installation can be paid for from the difference between the cost of current sludge treatment and cheaper extraction of separated materials. After they are compressed, separated materials have a dry material content of approximately 50% and the added advantage that it is possible to treat them more energy efficiently than sludge. In addition, the use of a fine-mesh sieves may also yield operational benefits in the form of reduced thread formation (the intermeshing of hair and fibres), for example. In addition, existing WWTPs without a sedimentation tank may also save on aeration energy.

CONCLUSIONS AND DISCUSSION

Nowhere in the world is there any experience of the use of fine-mesh screens with a mesh size equal to or less than 0.5 mm in the pre-treatment stage of a biological treatment process. Nevertheless, screens are used for the purposes of mechanical treatment in the absence of any subsequent biological treatment. In Norway there are reports of significant efficiencies being achieved on the removal of suspended substances (50% to 80% using a mesh size of 0.35 mm). There experience shows that there is a relationship between efficiency, mesh size, the hydraulic loading of screen filters ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$) and the composition of wastewater. It is not known what impact high efficiencies have on the composition of the separated materials, nor the effect on their processability.

During the pilot study conducted in Blaricum yields of approximately 50% (based on a mesh size equal to or smaller than 0.5 mm) were measured in the case of suspended substances. They are similar to those of a sedimentation tank. Efficiency declines significantly in the case of suspended substances where mesh sizes are larger than 0.5 mm. In the case of the removal

of N and P, using a screen with 50% efficiencies in relation to floating substances, efficiencies are about zero and, as such, are less than in the case of a sedimentation tank.

Where a fine-mesh screen is used, the proportion of cellulose in the sieving product is much greater than in the case of a primary sludge from a sedimentation tank (see Table 1). Its removal occurs at a rate of about 50% in a sedimentation tank and 30% to 70% of the remaining cellulose is broken down in a normal biological treatment process when left for 20 to 30 days.

TABLE 1 CELLULOSE AS A PROPORTION OF DRY MATERIAL CONTENT FOUND IN RESEARCH CONDUCTED BY WATERNET

	Proportion Cellulose/ds
Influent	0.3 - 0.5
Separated materials	0.8
Primary sludge	No more than 0.3
Active sludge	0.1 - 0.15
Fermented sludge	Approx. 0.2

It was found in the course of research that the proportion of inert and gradually degradable COD in screened influent is equal to that of sedimented water. In this respect it should be noted that a limited number of measurements were undertaken and that the findings only apply to the Blaricum WWTP (confined to household wastewater). In such a situation the effect of the AT would be similar in the case of a sieve or sedimentation tank. However, further research is required.

Various options are available for the treatment of separated materials. The heavy metal contents of separated materials are low and more or less comply with the so-called BOOM [Quality and Use of Remaining Organic Fertilising Substances] decree. It is possible to reuse separated materials by drying them and using them as fuel. Acidifying separated materials may be an option. Technically it is possible to use separated materials to produce paper but difficulties may be encountered in relation to social acceptance. In the case of waste treatment the costs of transporting and selling separated materials are relatively limited, because they can be compressed by up to 50%. Treatment costs are in the order of EUR 20.00 to EUR 100.00 per product tonne.

The maximum amount of separated materials which Waternet is capable of producing each year is relatively small compared with other residual biomass streams. This may constitute an obstacle to their beneficial use, because buyers may not find it worthwhile to treat a small amount of separated waste materials. In addition, the legal status of separated materials is not clear at present. The classification of separated materials will need to be determined in consultation with Agentschap NL [NL Agency]. For example, screening materials are currently deemed to be dangerous waste but it is obvious that another form of classification may be possible in the case of separated sieve product. That classification may have an impact on the cost of processing. For this reason the waste classification of separated materials is required before a treatment path can be determined.

In the case of the WWTPs Blaricum (which does not have a sedimentation tank) and Uithoorn (which does have a sedimentation tank) plants, which have been studied, it appears that, when dry weather flow (DWF) is sieved, a fine-mesh sieve installation recoups its outlay in a realistically selected scenario within about 7 -10 years. Where the entire rain weather flow (RWF) to an WWTP is treated, break-even occurs after more than 15 years. A sensitivity analysis

reveals that the hydraulic loading of sieves ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$) and surplus sludge production following sieving are decisive for the purposes of breaking even.

Such cases reveal that the time required to break even where a fine-mesh sieve is used in an WWTP which does not have an existing sedimentation tank, is shorter than in the case of an STP which does have an existing sedimentation tank. A variant study was conducted in relation to the entire new construction project in the case of the Weesp WWTP and involved the comparison of a sedimentation tank with a sieve installation. It revealed that no distinction could be drawn between the investments in either system. Investments in a sludge treatment line (digestion and dewatering), where a sedimentation tank is used were disregarded for that purpose. Annual expenses were somewhat less in the case of an WWTP with a sieve installation than an WWTP with a sedimentation tank due to the lower costs involved in treating the separated sieve product.

The use of a fine-mesh sieve in an WWTP also changes the treatment energy balance. More electricity is required for a fine-mesh sieve than for a sedimentation tank, although the collection of the separated materials may cause less aeration. Moreover, separated materials can be dewatered more effectively than sludge, with the result that less transport is required and the caloric value is greater. An energy balance has made it possible to obtain clarity in respect of such changes in the case of the Blaricum WWTP (which does not have a sedimentation tank), the Uithoorn WWTP (which does have a sedimentation tank) and the newly constructed Weesp WWTP. The energy balance included the energy consumption in the WWTP itself, as well as the transport and treatment of sludge and separate sieve product. The underlying assumption is that separate sieve product could be dehydrated by up to 50%, and can be incinerated in a biomass plant.

The energy balance revealed that in the case of all three of the WWTPs the larger the part of the influent that it was possible to sieve, the more energy it was possible to save. It would appear that fine-mesh sieves represent an alternative to sedimentation tanks for energy-related considerations, subject to the proviso that it is possible to incinerate the separated materials with energy efficiencies in excess of 33%. Savings would amount to at least 40% (compared with the reference point without fine-mesh sieving) and may even produce energy on balance in certain cases (energy efficient treatment coupled with the production of large amounts of sludge and separated materials).

RECOMMENDATIONS

The type of sieve that is chosen is important. The findings derived from using sieves in the case of membrane bioreactors (MBRs) cannot be used, because a mesh size in excess of 0.8 mm was used. Attention will need to be given to this explicitly during the design process.

The use of a sieve may constitute one of the possible solutions to ensure the ongoing quality of effluent in the case of those WWTPs whose treatment capacity is too small due to hydraulic or biological limitations.

The cases that have been considered reveal that a sieve installation may recoup its investment and produce major energy benefits especially in the case of those STPs which do not have a sedimentation tank, even if the separated materials are not used to generate energy. The market potential could be clarified in order to encourage the technical development of sieves.

The potential processing of separated materials may be investigated further. Viewed in relation to the concept of 'cradle to cradle' the production of paper using separated materials appears to be a sound solution. After all, the sieving product constitutes about 80% of separated materials. Nevertheless, it is not socially accepted. The production of fatty acids could be a good alternative. It may be possible to tie this in with projects which accord with the bio-based economy concept.

There is a relationship between sieves and the MJA3 energy agreements. The use of sieves will yield savings of no less than 40% in the relevant examples on condition that it is possible to utilise the energy content of the separated materials. In the case of MJA3 energy externally generated must be attributed to the STP concerned. The positive impact on the energy balance that has been forecast would have to be confirmed in a practical study.

Existing WWTPs in which a sieve is installed may sometimes be operated with a very small sludge loading. The effect on the quality of effluent and the production of sludge where the cellulose component is specifically removed is still partly unknown. Because no paper fibres are present after screening, the impact on the dewatering of sludge is a point requiring attention.

A sieve installation will be installed for dry weather flow in the Blaricum WWTP in 2010. There is a need for more practical research. It would be useful if one or more studies were to be initiated in other WWTPs, preferably ones involving completely separate treatment lines.

DE STOWA IN BRIEF

The Foundation for Applied Water Research (in short, STOWA) is a research platform for Dutch water controllers. STOWA participants are all ground and surface water managers in rural and urban areas, managers of domestic wastewater treatment installations and dam inspectors.

The water controllers avail themselves of STOWA's facilities for the realisation of all kinds of applied technological, scientific, administrative legal and social scientific research activities that may be of communal importance. Research programmes are developed based on requirement reports generated by the institute's participants. Research suggestions proposed by third parties such as knowledge institutes and consultants, are more than welcome. After having received such suggestions STOWA then consults its participants in order to verify the need for such proposed research.

STOWA does not conduct any research itself, instead it commissions specialised bodies to do the required research. All the studies are supervised by supervisory boards composed of staff from the various participating organisations and, where necessary, experts are brought in.

The money required for research, development, information and other services is raised by the various participating parties. At the moment, this amounts to an annual budget of some 6,5 million euro.

For telephone contact number is: +31 (0)33 - 460 32 00.

The postal address is: STOWA, P.O. Box 2180, 3800 CD Amersfoort.

E-mail: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl.

INFLUENT FIJNZEVEN IN RWZI'S

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
	SUMMARY	
	STOWA IN BRIEF	
1	INLEIDING	1
	1.1 Aanleiding	1
	1.2 Achtergrond zeeftechnologie	3
2	PROJECTAANPAK	6
	2.1 Verantwoording onderzoek	6
	2.2 Doelstelling van het project	6
	2.3 Uitgevoerde deelstudies	6
3	FIJNZEEFONDERZOEK PROEFINSTALLATIE RWZI BLARICUM	8
	3.1 Inleiding	8
	3.2 Proefinstallatie	8
	3.3 Resultaten	10
	3.3.1 Operationele ervaring zeven	10
	3.3.2 Rendement zeven	10
	3.3.3 Verwerking zeefgoed	11
	3.4 Conclusie	12

4	CELLULOSE AFBRAAK IN RWZI	14
4.1	Inleiding	14
4.2	Resultaten en discussie	15
4.3	Conclusie	16
5	AFZET ZEEFGOED	18
5.1	Inleiding	18
5.2	Hoeveelheid zeefgoed	18
5.3	Kwaliteit zeefgoed	19
	5.3.1 Calorische waarde van het zeefgoed	19
	5.3.2 Vergelijking brandstofkwaliteit zeefgoed met andere biomassa soorten	19
5.4	Verwerkingsscenario's	21
	5.4.1 Meevergisten met slib	21
	5.4.2 Verbranding	21
	5.4.3 Vetzuur productie	22
	5.4.4 Papierproductie	23
	5.4.5 Separaat vergisten	23
	5.4.6 Hergebruik in de landbouw	24
5.5	Verwerkingsroutes van afvalstoffen van de papierindustrie	24
5.6	Conclusie	24
6	TOEPASSING BIJ BESTAANDE RWZI'S	25
6.1	Inleiding	25
6.2	Basisgegevens Rwzi's Blaricum en Uithoorn	25
6.3	Uitgangspunten berekeningen	27
6.4	Resultaten	31
6.5	Gevoeligheidsanalyse Blaricum voor één zeef	33
6.6	Conclusie	35
7	TOEPASSING BIJ NIEUWBOUW	36
7.1	Inleiding	36
7.2	Uitgangspunten	37
7.3	Resultaat	39
7.4	Conclusie	40
8	ENERGIEBALANS	41
8.1	Inleiding	41
8.2	Berekening	43
	8.2.1 In- en uitgaande producten	43
	8.2.2 Theoretische energie inhoud	43
	8.2.3 Primaire energie inhoud	44
8.3	Resultaten	45
	8.3.1 Uithoorn	45
	8.3.2 Blaricum	48
	8.3.3 Weesp	51
8.4	Gevoeligheidsanalyse	53
8.5	Conclusie	56

9	CONCLUSIES	58
9.1	Inleiding	58
9.2	Proefinstallatie Blaricum	58
9.3	Cellulose afbraak in rwzi	59
9.4	Afzet zeefgoed	59
9.5	Kosten bij toepassing fijnzeven	60
9.6	Energiebalans Blaricum, Uithoorn en Weesp	60
10	AANBEVELINGEN	62
10.1	Nader onderzoek	62
10.2	Praktijkinstallatie	64
	BIJLAGEN	
1	REFERENTIES	67
2	VEZELLENGTES EN SLIBBEELD MET VEZELS	69
3	PROGRAMMA VAN EISEN PRAKTIJKINSTALLATIE VOOR HET ZEVEN VAN AFVALWATER	71
4	INVESTERING BLARICUM EN UITHOORN	73
5	CELLULOSE METEN	75
6	TABELLEN UIT HOOFDSTUK 3	77
7	CELLULOSE AFBRAAK IN EEN RWZI	79

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Er zijn verschillende aanleidingen geweest waardoor Waternet in 2008 heeft besloten onderzoek te doen naar het zeven van influent. Hieronder worden dit toegelicht.

AANDEEL TOILETPAPIER IN AFVALWATER

Toiletpapier wordt in de meeste westerse landen geloosd samen met het afvalwater naar een rioolwaterzuivering (rwzi). Een gemiddelde inwoner in West Europa verbruikt circa 10 – 14 kg toiletpapier per jaar, dit is in de orde grootte van 30% tot 50% van de zwevende bestanddelen van het influent. Desondanks is er geen onderzoek verricht naar de afbraakmechanismen van toiletpapier (cellulose) in het rioolstelsel en de rwzi. De techniek waarmee het afvalwater en het slib wordt verwerkt is om deze reden mogelijk niet optimaal.

SCHAALGROOTTE VOOR TOEPASSING VOORBEZINKTANK

Bij rwzi's wordt vanaf een schaalgrootte van circa 100.000 vervuilingseenheden (ve) vaak een voorbezinking in het proces opgenomen. Dit vanuit overwegingen als duurzaamheid en kosten. Het bezonken (primaire) slib uit de voorbezinking wordt vergist, in de meeste gevallen samen met het surplusslib. Tot op heden wordt dit als stand der techniek beschouwd. Zeven worden als voorbehandelingstechniek bij membraanbioreactoren (MBR's) toegepast, maar zijn niet als serieus alternatief van voorbezinktanks overwogen (STOWA 2007-25). Het is denkbaar zeven in te zetten bij rwzi's waar vanwege een beperkte schaalgrootte of beschikbare ruimte de bouw van een voorbezinktank en slibgisting economisch niet aantrekkelijk is. Toepassing van een zeef is namelijk niet gerelateerd aan schaalgrootte.

SPINSELVORMING

Een belangrijke kostenpost voor het beheer van een rwzi wordt veroorzaakt door spinselvorming (in elkaar draaien van vezels en haren). Vezels en haren in het influent passeren voor een deel het grofveulrooster en veroorzaken in de water- of sliblijn problemen. Ook de doekjes problematiek is hieraan gerelateerd. In STOWA verband is voor de doekjesproblematiek uitgebreid aandacht geweest (STOWA 2007-25). Doekjes kunnen problemen geven bij het grofveulrooster, maar zullen zonder bypass het zuiveringsproces niet verder belasten. Toepassing van een fijnzeef kan mogelijk problemen met spinselvorming en doekjes voorkomen of verminderen.

ERVARINGEN MBR PILOT HILVERSUM MET EEN TROMMELZEEF

Op rwzi Hilversum is in de periode 2002 - 2007 een MBR-pilot met een trommelzeef in bedrijf geweest (STOWA 2006 -16). Er zijn een aantal interessante resultaten gevonden in dat onderzoek. Zo was onder andere de biologische slibproductie extreem laag (circa 0,20 kg ds/kgCZV). Dit is veel lager dan verwacht werd op basis van de afvalwater samenstelling na de zeef. Mogelijk dat de Huber trommelzeef met een maaswijdte van 0,5 mm relatief veel niet of slecht afbreekbare CZV tegenhield met als gevolg een lage slibproductie. Er werd een grote

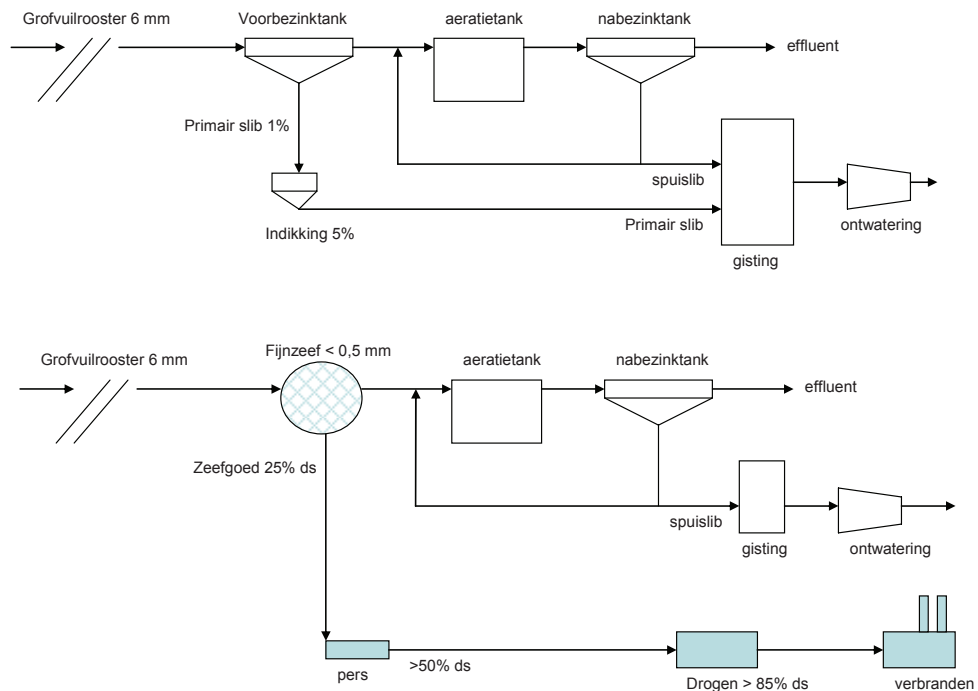
productie van zeefgoed vastgesteld, die vooral uit papier en haren bestond (een soort gewapend papier-maché). De hoeveelheden zeefgoed deden vermoeden dat toiletpapier volledig uit het influent werd afgescheiden met de toegepaste trommelzeef.

Uit onderzoek van Waternet in 2007 bleek dat toiletpapier bij alle rwzi's kan worden afgescheiden. Dit was onafhankelijk van het aanvoerstelsel. In het onderzoek is met tankauto's influent van drie rwzi's naar de Huber trommel zeef getransporteerd. Er werd overal dezelfde orde grootte aan zeefgoed per volume afvalwater afgevangen. Dit duidt erop dat toiletpapier niet afgebroken wordt in het aanvoerstelsel. Bij een kort aanvoerstelsel waren er in het influent visueel nog stukjes papier aanwezig, bij een lang persleidingstelsel niet. Het zeefgoed van de locaties zag er wel vergelijkbaar uit.

Samenvattend, het gebruik van fijnzeven kan potentie hebben. Er is echter weinig ervaring, omdat de toepassing van zeven in plaats van voorbezinking in de praktijk nog nooit eerder is uitgevoerd. De effecten op het biologisch zuiveringsproces zijn niet bekend. Ook zijn de voordelen en nadelen nog onvoldoende beschreven.

Dit rapport is een eerste aanzet voor het onderzoek naar de potentie van het gebruik van fijnzeven. Mogelijk kan dit rapport aanleiding zijn voor verder onderzoek en uiteindelijk kan leiden tot een toekomstige standaard toepassing van fijnzeven op rwzi's op grote schaal.

AFBEELDING 1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN RWZI MET EEN VOORBEZINKTANK (BOVEN) EN EEN FIJNZEEF (ONDER) MET EEN MOGELIJKE VERWERKINGSROUTE VOOR ONTWATERD ZEEFGOED EN SLIB



1.2 ACHTERGROND ZEEFTECHNOLOGIE

Wereldwijd wordt momenteel weinig onderzoek gedaan naar de inzet van zeven als mechanische voorbehandeling bij rwzi's. De gevonden relevante informatie uit de literatuur zal in deze paragraaf worden samengevat.

PRAKTIJK TOEPASSINGEN FIJNZEVEN

Bij MBR's worden fijnzeven toegepast van 0,8 – 3 mm. Deze fijnzeven hebben regelmatig veel operationele problemen, o.a. gerelateerd aan vet, zand en een verkeerde inschatting van de hoeveelheden zeefgoed (STOWA 2006 – 05). Een groot verschil is dat aan fijnzeven als voorbehandeling van een conventionele rwzi (geen MBR) geen eisen hoeven te worden gesteld zoals het volledig lek dicht zijn en ook een beperkte bypass kan eventueel worden geaccepteerd.

Zeven worden in Scandinavische landen veelvuldig toegepast als mechanische (voor)zuivering. Bij lozing in de fjorden van Noorwegen geldt een wettelijke eis 50% van zwevende stof verwijdering. Rwzi's worden bijna altijd zonder grofvuilrooster en zonder zand en/of vetvang bedreven. De reden hiervoor is dat separaat afvangen en afvoeren van roostergoed veel duurder is dan in één stap alles te verwijderen met een zeef. De zeven zijn robuust genoeg om dit aan te kunnen. Daarbij wordt er standaard op 0,35 mm gezeefd. Hiermee bestaat meer dan 10 jaar ervaring.

AFBEELDING 2

REFERENTIE SALSNES: SKUTVIKA WWTP GELEGEN IN AALESUND MUNICIPALITY



VERWIJDERINGSRENDEMENTEN FIJNZEVEN

Door Franz-Bernd Frechen et al 2008 en Wernfried Schier et al 2008 is een overzicht gemaakt van toegepaste zeven bij MBR's in Europa. Hieruit blijkt dat er verschillende typen geometrie (gaatjes, spleetjes of gaas) en doorlaat afmetingen voor de zeef gebruikt worden. Op basis van vezellengtes (zie bijlage 2) kan geconcludeerd worden dat spleetjes per definitie ongeschikt zijn om een hoog rendement te halen, aangezien de lengte richting enkele centimeters is. Ook gaatjes (geperforeerde plaat) zijn niet geschikt, omdat er bij < 0,5 mm te weinig hydraulische doorzet is. Het doorlatende oppervlakte is beperkend.

De doorlaat bij toepassing van gaas varieert van 0,75 tot 1,0 mm. Hiermee wordt 10% - 30% zwevende stof verwijdering bereikt. In het onderzoek op Varsseveld is een rendement van 20% voor zwevende stof gemeten. (STOWA 2006-05). Bij MBR's hebben zeven over het algemeen een te grote maaswijdte. Papiervezels worden hierdoor niet effectief afgevangen. In het geval dat een maaswijdte wordt toegepast van < 0,5 mm, zullen papiervezels hier een brug overheen gaan vormen. Op deze wijze zullen uiteindelijk ook kleinere deeltjes worden ingevangen. Als gevolg hiervan kan het rendement zeer hoog zijn. Dit is bewezen met onderzoek naar zeven toegepast op verschillende rwzi's in Noorwegen. In tabel 2 zijn de gemeten concentraties in het influent en de hydraulische zeefbelasting van de onderzochte rwzi's vermeld.

TABEL 2

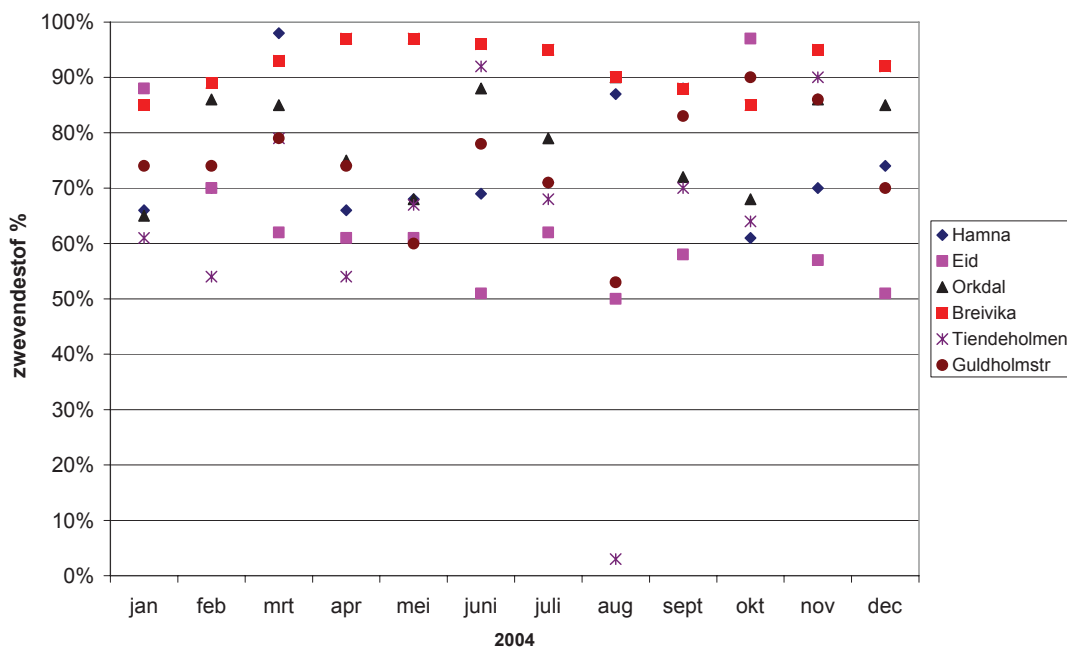
DATA VAN NOORSE RWZI'S (BRON: SALSNES INTERNE BEDRIJFSDOCUMENTATIE)

	hydraulische zeefbelasting [m ³ /m ² .h]	CZV influent gemiddeld [mg/l]	BZV influent gemiddeld [mg/l]	SS influent gemiddeld [mg/l]
Hamma	180	N/A	430	348
Eid	288	N/A	364	365
Orkdal	98	705	367	436
Breivika	168	1461	356	784
Tiendeholmen	98	558	278	369
Guldholmstr	252	N/A	328	330

De concentraties in het influent zijn vergelijkbaar met Nederlandse concentraties, maar de samenstelling van het afvalwater kan verschillen van de Nederlandse situatie. Het betreft gemengde stelsels. De verblijftijden in de stelsels zijn veelal korter dan in Nederland.

AFBEELDING 3

RENDEMENTEN ZWEVENDE STOF RWZI'S IN NOORWEGEN (BRON: SALSNES INTERNE BEDRIJFSDOCUMENTATIE)



Het behaalde rendement is gerelateerd aan procescondities en de techniek van zeven. Vooral de hydraulische zeefbelasting (turbulentie op het zeefoppervlak), maaswijdte en draaisnelheid van een bandzeef (koekopbouw) spelen een rol. Een hoge hydraulische zeefbelasting geeft een significant lager rendement. De verklaring zou kunnen zijn dat de vezels deels door het filter gedrukt worden. De optimale procesconditie en daarmee het rendement heeft een relatie met het aantal deeltjes groter dan de maaswijdte en de verhouding totaal en opgeloste CZV (B. Rusten et al. 2006).

Om met een zeef met een maaswijdte van 0,35 mm een rendement > 50% voor zwevende stof te halen, moet minimaal 20% van de SS in het afvalwater een deeltjesgrootte van > 0,35 mm hebben en de verhouding opgelost en totaal CZV moet < 0,4 zijn. Het heeft dan geen zin om een maaswijdte nog kleiner dan 0,35 mm te kiezen. Het rendement wordt niet groter met een kleinere zeefdiameter. Dosering van kation polymeer is mogelijk om het verwijderingsrendement bij een bandzeef te verhogen (B. Rusten et al. 2006).

FRACTIEVERDELING AFVALWATER EN DE RELATIE MET FIJNZEVEN

Er is een relatie tussen de samenstelling van het influent, rendement van de zeven en consequentie voor het biologische zuiveringsproces. Dit heeft nooit de aandacht gehad aangezien er bijna geen rwzi's zijn waar een fijnzeef en biologische zuivering gecombineerd zijn. Ook onderzoek naar verschillen tussen primair slib en zeefgoed is nooit uitgevoerd. Echter, uit ervaringen met zeven in de MBR pilot op rwzi Hilversum blijkt dat zeefgoed veel papiervezels bevat. In primair slib lijkt dit niet zo te zijn.

Er is literatuur beschikbaar over deeltjes grootte in influent. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen bezinkbaar ($>100\mu\text{m}$), supracolloïdaal ($1 - 100\mu\text{m}$), colloïdaal ($0,08 - 1\mu\text{m}$) en oplosbaar ($0,08\mu\text{m}$) materiaal. De relatie tussen fractieverdeling en influent compositie is niet goed uitgezocht. Cellulose vezels bijvoorbeeld, onderdeel van de fractie bezinkbaar, worden nooit als zodanig onderscheiden. Voor een rwzi zijn de eigenschappen van deeltjes relevant, aangezien de hydrolyse snelheid bij grotere deeltjes de snelheidsbeperkende stap voor de afbraak is en daarmee impact heeft op stikstof- en fosfaatverwijdering en de slibproductie.

In tabel 3 is een overzicht opgenomen (C. Sophonsiri, E. Morgenroth et al. 2004), (D. Marani, V. Renzi et al 2004) waarin de fractie bezinkbaar organisch materiaal in influent vermeld is. Er wordt niet altijd dezelfde bepalingmethode gebruikt hetgeen onderlinge vergelijking wat lastig maakt.

TABEL 3 FRACTIONERING VAN ORGANISCH MATERIAAL IN INFLUENT ALS PERCENTAGE VAN CZV

referentie	bezinkbare organische fractie
Balmat 1957	15%
Heukelekian and Balmat 1959	17%
Rickert and Hunter 1971	29%
Much et al 1980	43%
Orphon et al 1997	27%
Guellil et al (2001b)	45%
D Marani et al 2004	34 % - 49%
gemiddeld *	~35%

Geconcludeerd kan worden dat er weinig aandacht besteed wordt aan de samenstelling van influent en voorbezonden afvalwater. Dit is verassend gezien de enorme hoeveelheid literatuur over actiefslibmodellen. De consequentie is dat het effect van een zeef op de werking van de rwzi niet op voorhand geschat kan worden.

VERWERKING ZEEFGOED

Zeefgoed wordt in Noorwegen, meestal naar een stortplaats afgevoerd en een klein deel wordt gecomposteerd (informatie B. Rusten en Svein Solvi).

In de rwzi Varsseveld wordt zeefgoed opgemengd met surplusslib, ingedikd en na buffering afgevoerd naar de rwzi Lichtenvoorde voor ontwatering en vervolgens afgevoerd naar de compostering van GMB Slibverwerking. Het gedroogde materiaal wordt als secundaire brandstof in een electriciteitscentrale verbrand.

In Duitsland en Engeland gaat zeefgoed afkomstig van MBR's meestal naar de stort. De Duitse rwzi Nordkanal heeft een eigen slibontwatering en daar wordt gestabiliseerd surplusslib gemengd met zeefgoed. Dit wordt ontwaterd tot meer dan 30% drogestof en vervolgens naar een verbranding afgevoerd.

2

PROJECTAANPAK

2.1 VERANTWOORDING ONDERZOEK

Deze rapportage beschrijft een onderzoeksproject van Waternet waar STOWA in participeert. Het project maakt tevens onderdeel uit van een promotietraject van TU-Delft (vakgroep Environmental Biotechnology). In het project is samengewerkt met Smurfit Kappa, kenniscentrum papier en karton (KCPK) en ECN. Er is informatie aangeleverd door Wernfried Schier, B. Rusten en de firma Salsnes. Tevens is gebruik gemaakt van beschikbare literatuur en inzichten afkomstig van het nieuwbouw project rwzi Weesp (Waternet).

2.2 DOELSTELLING VAN HET PROJECT

Het doel van deze studie is om te beoordelen of fijnzeven een goed alternatief zijn voor het voorbezinken van afvalwater. Dit is bekeken voor drie rwzi's van Waternet, namelijk rwzi Blaricum carousel zonder voorbezinktank, rwzi Uithoorn met voorbezinktank en het nieuwbouwproject rwzi Weesp.

2.3 UITGEVOERDE DEELSTUDIES

LITERATUUR- EN ERVARINGSONDERZOEK (HOOFDSTUK 1)

Om te bepalen wat wereldwijd de ervaringen zijn met het toepassen van fijnzeven is literatuur onderzoek gedaan. Hierbij is vooral informatie gevonden over de toepassing van fijnzeven als voorbehandelingsstap voor MBR's. Daarnaast is er contact geweest met de firma Salsnes in Noorwegen. Deze firma levert (vooral in Noorwegen) bandzeven die gebruikt worden als mechanische zuivering. Deze bandzeven worden niet gevolgd door een biologische zuivering.

PILOT ONDERZOEK RWZI BLARICUM (HOOFDSTUK 3)

Op rwzi Blaricum is in 2008 gedurende vijf maanden pilot onderzoek gedaan met twee verschillende zeven. Het doel van deze pilot was ervaring op te doen met de technische werking van de zeven, het verwijderingsrendement te bepalen en de samenstelling van zeefgoed te kunnen vaststellen.

CELLULOSE BALANS ZUIVERING (HOOFDSTUK 4)

In theorie leidt een reductie van het aantal cellulosevezels tot een reductie van slibvracht en dus tot reductie van de verwerkingskosten van slib. Inzicht in het afbraakproces en dus de mate van afbraak van cellulose in de zuivering is nodig om meer inzicht in de bijdrage van cellulose aan de slibvracht te krijgen. De cellulose balans is voor een aantal rwzi's voor de water- en sliblijn, in beeld gebracht. Waar blijven de cellulosevezels? Wat is de afbraakkinetiek van cellulose in een rwzi aeroob en anaeroob? Deze vragen worden beantwoord in hoofdstuk 4.

AFZET VAN ZEEFGOED (HOOFDSTUK 5)

Verwerkingskosten voor zeefgoed en eventuele opties voor hergebruik zijn van belang voor de bepaling van de terugverdientijd en worden nader uitgewerkt.

TERUGVERDIEN TERMIJN FULL-SCALE INSTALLATIE (HOOFDSTUKKEN 6 EN 7)

Om een terugverdientermin voor fijnzeven op full-scale te berekenen, is de benodigde investering berekend en de opbrengsten zijn geschat. Een economische evaluatie van de inzet van zeven voor de rwzi's Blaricum en Uithoorn wordt gegeven, waarin de investeringskosten, de slibverwerking en energieverbruik in beeld zijn gebracht.

De kosten voor nieuwbouw van een zeefinstallatie in vergelijking met een voorbezinktank bij de rwzi Weesp en het verschil in exploitatielasten zijn onderzocht.

ENERGIEBALANS BIJ INZET ZEVEN (HOOFDSTUK 8)

Om de duurzaamheid en energieaspecten van fijnzeven te bepalen wordt een energiebalans over de zuivering bepaald. Bij de energiebalans van de rwzi inclusief slibbehandeling wordt de verwerkingsoptie van zeefgoed als brandstof genomen. ECN onderzocht daarvoor methodes van droging en verbranding van het zeefgoed. Ook is de calorische verbrandingswaarde van zeefgoed bepaald.

De energiebalans van de rwzi's Blaricum (zonder voorbezinking) en Uithoorn (met voorbezinking) en de rwzi Weesp (variantenstudie nieuwbouw), inclusief de slibverwerking bij de inzet van zeven zijn onderzocht.

3

FIJNZEEFONDERZOEK PROEFINSTALLATIE RWZI BLARICUM

3.1 INLEIDING

Op de rwzi Blaricum zijn een tweetal zeven in bedrijf geweest. Een trommelzeef (Huber) heeft gedraaid van juni t/m oktober 2008. Deze zeef is ook gebruikt in de eerder door Waternet uitgevoerde MBR pilot op rwzi Hilversum. Van september t/m december 2008 is gedraaid met een bandzeef (Salsnes). Voor selectie van de bandzeef is in Noorwegen een bezoek gebracht aan de fabriek en zijn twee referenties bezocht. Beide referentielocaties zijn vanaf 1999 in bedrijf en functioneren goed.

AFBEELDING 4 REFERENTIE BEZOEK IN NOORWEGEN, ZEVEN ZIJN VANAF 1999 IN BEDRIJF



De doelstelling van het pilot onderzoek was om de werking en resultaten van een zeefinstallatie te bepalen. Dit was nodig voordat de exploitatielasten en de energiebalans bepaald konden worden.

Tijdens de pilot testen lag de nadruk op de volgende onderzoeksvragen:

- 1 operationele aspecten van de zeven
- 2 verwijderingsrendement van de zeven, in relatie tot het type zeef en de maaswijdte
- 3 samenstelling en verwerkingsmogelijkheden van zeefgoed

3.2 PROEFINSTALLATIE

Influent is na de roosterhark (6 mm), maar voor de zandvanger naar de zeven gepompt. De zeven stonden op een frame, zodat ze op de hoogte van de zandvanger stonden. Onder de zeven waren containers van 3 m³ geplaatst om het zeefgoed in op te vangen. De bandzeef container had een continue gewichtsmeting. De zeven waren voorzien van een pers (trommelzeef) of veerklep (bandzeef) voor het zeefgoed. De zeven -werden in de periode dat ze gelijk

tijdig in bedrijf waren, bedreven met een debiet van 40 – 50 m³/h. In de periode dat alleen de bandzeef in bedrijf was, bedroeg de gemiddelde toevoer 70-100 m³/h. Dit ongeacht de hydraulische aanvoer naar de rwzi. Dit betekent dat de zeef bij regen weer aanvoer (RWA) en droogweeraanvoer (DWA) constant hydraulische belast werd. De verdeling tussen de zeven werd geregeld met handbediende kleppen en gemeten met twee debietmeters. De bandzeef heeft standaard een bypass in het geval van storing of hydraulische overbelasting. De trommelzeef schakelde op hoog niveau de toevoerpomp uit.

De trommel- en bandzeven zijn bedreven op de maximale hydraulische belasting. Bij de trommelzeef was dit het debiet waarbij er verstopping optrad. Voor de bandzeef betekende dit dat de bypass regelmatig in werking trad. Er is onderzocht wat het rendement van de zeven was bij maximale belasting. Het rendement onder DWA belasting is mogelijk anders.

De bestaande debietproportionele influent bemonstering van de rwzi is gebruikt. De uitgaande waterstroom van de zeven is tijdproportioneel bemonsterd. Het gezeefde water werd teruggevoerd naar de zandvanger. De hoeveelheid bypass is niet gemeten.

In influent, gezeefd water en zeefgoed zijn analyses uitgevoerd. De geproduceerde hoeveelheid zeefgoed van de bandzeef is vanaf 7 november t/m december 2008 gemeten met een gewichtsmeting onder de container. Van de trommelzeef zijn geen gewichtsmetingen beschikbaar.

De toegepaste zeven

De roterende trommelzeef van Huber was voorzien van 0,5 mm roestvrij staal gaas, zie afbeelding 5. De bandzeef van Salsnes, type SF 2000, bevatte een kunststof band (gaas), zie afbeelding 5. Het ondergedompelde zeefband oppervlak was 0,5 m². Dit geeft een hydraulische belasting van 140 – 200 m³/m²/h voor de situatie van Blaricum. Er zijn een vijftal banden met een maaswijdte van 0,35 mm, 0,5 mm, 0,84 mm, 1,6 mm en 4 mm onderzocht. Er zijn alleen rendementmetingen van de 0,35 en 0,5 mm maaswijdte beschikbaar.

AFBEELDING 5

DETAILS TROMMELZEEF (L) EN BANDZEEF (R) RWZI BLARICUM



3.3 RESULTATEN

3.3.1 OPERATIONELE ERVARING ZEVEN

De trommelzeef is vijf maanden in bedrijf geweest. Opvallend was het hoge spoelwaterverbruik om verstopping van de zeef tegen te gaan. Kanttekening daarbij is dat de zeef continu maximaal hydraulisch belast was. Er zijn geen problemen geweest met het technisch functioneren.

Er is 3 maanden ervaring opgedaan met de bandzeef. De zeef heeft probleemloos gedraaid. Verwisseling van de zeefbanden is 2 uur werk. Een geringe luchtafzuiging zal in de praktijk nodig zijn, maar veel minder dan bij een voorbezinktank. Er is uitsluitend zeefgoed gelost bij standaarddruk. Ook lossen met water onder druk is mogelijk, maar was hier niet nodig.

3.3.2 RENDEMENT ZEVEN

Het verwijderingsrendement van zwevende stof (ZWS) door een bandzeef met een maaswijdte van 0,84 mm was maximaal 25%. Dit is bepaald op basis van de gewichtsmetingen en gemiddelde influent waarden. Er zijn namelijk geen rendementsmetingen tijdens de proefneming met een maaswijdte van 0,84 mm. Deze waarde past bij gangbare rendementen bij MBR installaties van 10 tot 30% SS verwijdering. Met een grotere maaswijdte van 4 mm en 1,6 mm wordt bijna geen zwevendestof afgevangen. Dit is ook logisch aangezien papiervezels een lengte hebben van ongeveer 0,1 – 1 mm.

Van bandzeefproeven met een maaswijdte van 0,5 mm en 0,35 mm en de trommelzeef met 0,5 mm zijn wel rendementsmetingen beschikbaar. Metingen aan de maaswijdtes van de bandzeef op 0,5 mm en 0,35 mm zijn samen genomen omdat er geen verschil kon worden waargenomen. In onderstaande tabel worden de gemiddelden van de verwijderingsrendementen over de gehele proefperiode getoond (tabel 3). Het betreft 24-uurs verzamelmonsters.

TABEL 4 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN ZWEVENDESTOF, CZV EN BZV (N = AANTAL METINGEN)

	zwevendestof (n)	CZV (n)	CZVmf * (n)	BZV (n)
Trommelzeef (0,5 mm)	50% (11)	34% (11)	17% (12)	26% (5)
Bandzeef (0,35 – 0,5 mm)	40% (25)	27% (24)	13% (13)	17% (13)

Mf = micro filtratie, rendement bepaald op basis van influent en gezeefd water

Op basis van deze tabel lijkt de trommelzeef een hoger rendement te halen dan de bandzeef. De verwachting is echter dat de rendementen in de praktijk vergelijkbaar zullen zijn. Tijdens de proeven met de bandzeef zijn problemen opgetreden, waardoor de rendementen beïnvloed zijn. Met dezelfde zeven zijn bovendien in Noorwegen wel hoge rendementen behaald (zie hoofdstuk 1).

Er zijn stikstof (N) en fosfaat (P) concentraties van het zeefgoed gemeten. De afzonderlijke metingen zijn opgenomen als bijlage 6. Gemiddeld wordt het volgende gevonden:

TABEL 5 STIKSTOF- EN FOSFAAT GEHALTE IN HET ZEEFGOED

	gN/kgds	gP/kgds
Trommelzeef	7,8	1,9
Bandzeef	13,1	3,1

Het omrekenen van de gehalten in zeefgoed naar concentraties in het influent en het gezeefde water geeft het de volgende verwijderingsrendementen:

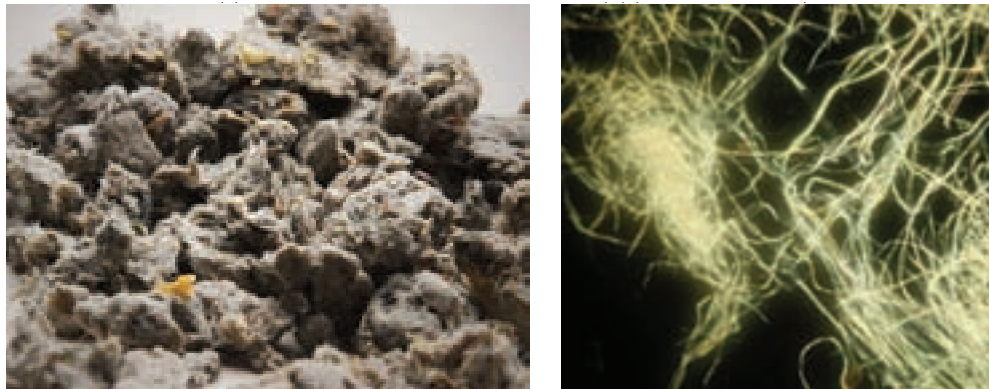
TABEL 6 VERWIJDERINGSRENDEMENT N EN P

	Stikstof	Fosfaat
Trommelzeef	< 1%	< 1%
Bandzeef	circa 1,5 %	< 1 %

3.3.3 VERWERKING ZEEFGOED

Zeefgoed ziet er visueel uit als papier-maché met haren en zaadjes. Onder de microscoop zijn duidelijk de papiervezels te zien.

AFBEELDING 6 ZEEFGOED BANDZEEF (L) EN DETAIL ZEEFGOED TROMMELZEEF (R) (VERGROTING 40X)



De gemiddelden van de analyse resultaten van het zeefgoed zijn getoond in tabel 6. De afzonderlijke metingen zijn als bijlage 6 opgenomen. In de tabel is ook een vergelijking met slib opgenomen.

TABEL 7 ANALYSE RESULTATEN ZEEFGOED EN SLIB

	Bandzeef	Trommelzeef	BOOM besluit	Slib Blaricum	Primair slib Huizen	Primair Horstermeer	
Aantal monsters	18	10		6	1	1	
Indamprest (IR)	%	25,2	27,5				
Gloeirest *	% vd IR	7,8	4,3	24		20	
Soortelijke massa	g/l	604	554				
CZV	g/kg ds	1351	1230				
KjN	g/kg ds	13,1	7,8	65			
P-totaal	g/kg ds	3,1	1,9	35			
Hg	mg/kgds	0,21	0,15	0,75	0,8	0,7	1,2
Zn	mg/kgds	413	233	300	1529	360	640
As	mg/kgds	0,47	0,62	15		<2	2
Cd	mg/kgds	0,17	0,07	1,25	2,0	<1,2	0,5
Cr	mg/kgds	5,70	4,8	78	22,0	23	10
Cu	mg/kgds	80	47	75	487	200	170
Ni	mg/kgds	4,1	2,8	30	20,1	13	13
Pb	mg/kgds	61	29	100	157	72	70

* Voor primair slib zijn ook de volgende waarden bekend: Indamprest (IR) Amsterdam West 15%, Uithoorn 19% en Amsterdam Westpoort 37%

De pers van de trommelzeef om het zeefgoed te ontwateren is iets krachtiger dan die van de bandzeef. Bij de laatstgenoemde is namelijk alleen veerdruk aanwezig. Hierdoor is het drogestof gehalte bij trommelzeef wat hoger (zie tabel 7, indamprest). De ervaring leert dat bij beide typen zeefgoed met de hand er water uit te “knijpen” is. Er zal waarschijnlijk een hoger drogestof gehalte bereikt kunnen worden met een krachtige pers. De soortelijke massa van zeefgoed is minder dan 1 kg/l aangezien het materiaal veel lucht bevat.

De gemeten concentraties zware metalen zijn bij de bandzeef gemiddeld hoger dan bij de trommelzeef. Opvallend is ook het verschil in gloeirest en KjN en P-totaal gehalte. Blijkbaar is de opbouw van zeefgoed op de band of in de trommel anders en worden er bij de bandzeef kleinere of (ook) andere deeltjes ingevangen. Deeltjes zijn mogelijk (deels) uitwasbaar door ronddraaien van de trommel en spoelwater van de trommelzeef. Bij inzet van een fijnzeef als alternatief voor een voorbezinktank, moet er rekening mee worden gehouden dat het zware metalen gehalte van het surplusslib iets kan stijgen.

De concentraties zware metalen in zeefgoed zijn lager dan in primair- en surplusslib. Toetsing aan het BOOM besluit van de gemeten concentraties zware metalen geeft aan dat afzet naar de landbouw op basis van BOOM eisen niet onmogelijk is (zie tabel 6). Koper en Zink blijven wel kritisch.

Hoewel er geen geurmetingen zijn uitgevoerd, is duidelijk dat zeefgoed in een container een beperkte geuremissie heeft. Het ruikt enigszins als nat papier. Waarschijnlijk hangt dit samen met de aerobe conditie waarin het zeefgoed zich bevindt en de samenstelling van het materiaal. Het betreft vooral cellulose en er is weinig rotbaar materiaal aanwezig.

3.4 CONCLUSIE

OPERATIONELE ERVARING

Er is 4 maanden ervaring opgedaan met de trommelzeef en de bandzeef. Gedurende deze periode zijn er geen problemen geweest met het technisch functioneren.

RENDEMENTEN

De volgende rendementen zijn gemeten.

TABEL 8

GEMIDDELDE RENDEMENTEN FIJNZEVEN

rendement	Trommelzeef	Bandzeef
Zwevendestof %	50	40
CZV %	34	25
BZV %	17	17
KjN %	< 1,5	< 1,5
P-tot %	< 1,0	< 1,0

Het gemeten rendement van de bandzeef is met 40% voor zwevende stof mogelijk aan de lage kant. In een evaluatie geeft de firma Salsnes aan dat de hoge hydraulisch belasting hieraan debet is. De eventuele foutmarge in de gemeten rendementen, door beperkingen van de proefinstallatie, is niet duidelijk. Het is overigens niet voor de hand liggend dat de trommelzeef een hoger gemiddeld rendement heeft dan de bandzeef. Aangezien in Noorwegen rendementen voor zwevendestof veel hoger dan 50% worden vermeld, is niet onmogelijk dat een rendement van 50% of hoger voor zwevendestof haalbaar is in de praktijk.

De gemeten rendementen zijn vergelijkbaar met een voorbezinktank. Desondanks zien zeefgoed en primair slib er totaal verschillend uit. Mogelijk heeft gezeefd water een andere samenstelling dan voorbezonken water.

VERWERKING ZEEFGOED

Het bandzeef zeefgoed kan op basis van de analyseresultaten niet in de landbouw verwerkt worden, het zeefgoed afkomstig van de trommelzeef kan dit wel (zie tabel 7). Dit zeefgoed kan als grondverbeteraar in de landbouw afgezet worden, eventueel na hygienisering in een gisting en/of compostering. Medicijnresten en andere verontreinigingen in het zeefgoed zijn niet geanalyseerd en verder onderzoek hiernaar is nodig voordat de afzetmogelijkheid voor de landbouw bepaald kan worden.

De gehalten zware metalen in primair slib zijn hoger dan in zeefgoed. Dit kan verklaard worden door het verschil in afscheidingsmechanisme, namelijk bezinken in plaats van scheiden op deeltjes grootte.

4

CELLULOSE AFBRAAK IN RWZI

4.1 INLEIDING

De invloed op de stikstof- en fosfaatverwijdering en de biologische slibproductie van fijnzeven is nog onbekend. Vooral de vergelijking met een voorbezinktank is van belang. Indien zeefgoed bijvoorbeeld minder goed afbreekbaar is dan primair slib, is de consequentie van de inzet van fijnzeven dat de biologische slibproductie daalt ten opzichte van een voorbezinktank zonder dat de effluent kwaliteit nadelig beïnvloed wordt. Om hierover duidelijkheid te krijgen is onderzocht in welke mate zeefgoed in een actiefslib systeem wordt afgebroken. Dit deelonderzoek is als bijlage 7 opgenomen. Onderstaand wordt het onderzoek en het resultaat beknopt weergegeven.

De afbraakkinetiek van cellulose in rwzi's is in beeld gebracht door middel van zowel *in situ* als *batch* experimenten. Via modellen, in combinatie met de afbraakkinetiek, wordt de afbraak in rwzi's gemodelleerd. Ook zijn concentraties cellulose in slib bepaald en is door middel van massabalansen de afbraak berekend. Met denitrificatie experimenten is het verschil tussen voorbezonden en gezeefd influent op de denitrificatie onderzocht. De hierbij verkregen parameters zijn gebruikt om voorspellingen te kunnen doen voor de afbraak in actief slib systemen bij verschillende slibleeftijden.

IN SITU CELLULOSE AFBRAAK

De *in situ* afbraak van cellulosevezels en stukken papier is gevolgd volgens de methode van Hofsten & Edberg (1972) met kleine aanpassingen. Rechthoekige nylon zakjes met een gemiddelde maaswijdte van 10 µm werden gevuld met 1,5 g papervezels of stukken papier met vrijwel 100% cellulosevezel. De nylon zakjes werden vervolgens dichtgeknoopt en aan een kunststoflijn bevestigd in het beluchte deel van de aeratietank van rwzi Blaricum¹ gehangen op ongeveer 20-30 cm diepte. Periodiek werd een nylon zakje uit de aeratietank gehaald en werd, na afspoelen van het zakje met kraanwater, het drooggewicht van de inhoud bepaald. De *in situ* proef werd beëindigd als er geen gewichtafname van de inhoud van het zakje meer was. Microscopisch is gecontroleerd of het alle cellulosevezels afgebroken waren.

BATCH CELLULOSE AFBRAAK

De anaerobe afbraakkinetiek van cellulose is onderzocht in 5 liter batch experimenten. Actiefslib uit rwzi Blaricum is gebruikt als ent (0,5 g/l). De pH is gedurende de experimenten handmatig op pH 6-6,8 gehouden.

DENITRIFICATIE

De denitrificatiesnelheid van gezeefd en voorbezonden water is onderzocht in opstellingen gelijk aan die van de batch cellulose afbraak experimenten.

¹ geen voorbezinktank; Carrousel; slibleeftijd van 26 dagen

4.2 RESULTATEN EN DISCUSSIE

CELLULOSE HOEVEELHEDEN

Gemeten is dat circa 80% van de organische fractie van zeefgoed uit cellulose bestaat. Als aangenomen wordt dat al het cellulose in het influent verwijderd wordt door de zeef, betekent dit dat circa 32% van de vaste stoffen in het influent uit cellulose vezels bestaat. Het primair slib van respectievelijk rwzi de Ronde Venen en rwzi Horstermeer bestaat voor circa 25% - 32% uit cellulose. Het aandeel cellulose in primair slib is daarmee lager dan in het zeefgoed. Aangezien het rendement op vaste stoffen tussen voorbezinktanks en fijnzeven ongeveer vergelijkbaar is, betekent dit dat het voorbezonden water meer cellulose bevat dan het water dat behandeld is met een fijnzeef.

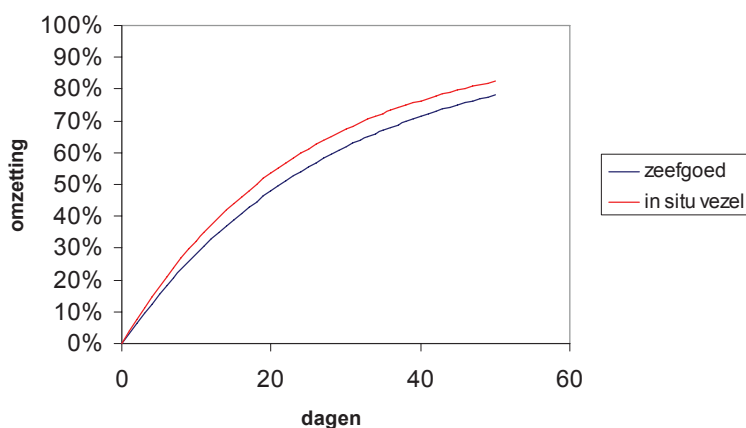
DENITRIFICATIE

Om het effect op de denitrificatie te onderzoeken, is de denitrificatie snelheid gemeten van voorbezonden en gezeefd influent van rwzi Hilversum, met daarin toegevoegd nitraat, met actief slib van rwzi Blaricum als ent. Er is geen verschil gevonden tussen de denitrificatie snelheid van voorbezonden en gezeefd water.

KINETIEK CELLULOSE AFBRAAK

De kinetische parameters gevonden voor de *in situ* proeven en de gevonden parameters voor de anaerobe batch proeven kunnen gebruikt worden om de afbraak in een actief slib tank te beschrijven, zie afbeelding 7, waarin eerste orde kinetiek aangenomen wordt.

AFBEELDING 7 GEMETEN AFBRAAK VAN CELLULOSE ALS FUNCTIE VAN DE VERBLIJFTIJD IN SITU AEROOB EN ZEEFGOED ANAEROOB



Voor rwzi Blaricum betekent dit dat bij de verblijftijd in de aëratietank van circa 25 dagen er ongeveer 50% van de cellulose wordt afgebroken bij 20 °C. Hierbij dient te worden opgemerkt dat er beperkt experimenten gedaan zijn. Een eventuele aanwezige spreiding in afbraakpercentages is onbekend. In de berekeningen van de afbraak is de lag-tijd die nodig is voor de biomassa om zich te hechten aan de vezels, zoals waargenomen is, niet meegenomen. Door een lag-tijd wordt de effectieve verblijftijd korter. Een lag-tijd zal dus zorgen voor een lagere afbraak. Dit effect zal bij kortere verblijftijden groter zijn dan bij langere verblijftijden. Indien vergeleken wordt met waarden in de literatuur dan wordt een afbraak bij gebruikelijke sibleeftijden van 30% tot 70% voorspeld (zie bijlage 7).

NB: na de rapportage periode is het onderzoek voortgezet. De mate waarin cellulose in een rwzi wordt afgebroken is ondermeer gerelateerd aan de temperatuur. De resultaten van dit onderzoek zullen in late stadium gepubliceerd worden.

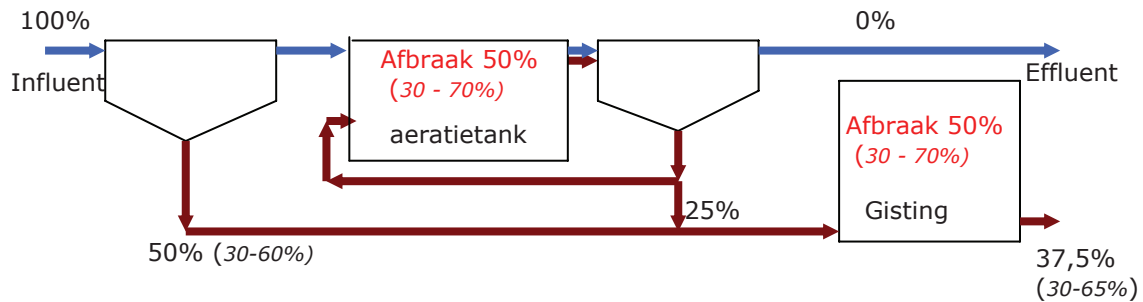
CONCENTRATIES CELLULOSE IN SLIB

Van het slib (primair, actief en uitgest) van verschillende rwzi's is in augustus en september de fractie cellulose bepaald (zie tabel 9). Voor influent bleek de methode hiervoor om nog onbekende redenen niet geschikt. In de berekeningen is een fractie cellulose van 35% van de onopgeloste bestanddelen gebruikt. Met deze concentraties zijn massabalansen (zie afbeelding 8) opgesteld. In bijlage 7 zijn meer specifieke meetresultaten opgenomen.

TABEL 9 FRACTIES VAN CELLULOSE VAN TOTAAL DROGE STOF GEHALTE

	Fractie cellulose/ds
Influent	0,3 - 0,5
Zeefgoed	0,8
Primair slib	maximaal 0,3
Actief slib	0,1 - 0,15
Uitgest slib	0,15 - 0,23

AFBEELDING 8 SCHEMATISCHE WEERGAVEN VAN DE IN EN UITGAANDE STROMEN IN HET ZUIVERINGSPROCES
CELLULOSE BALANS RWZI ALS PERCENTAGE VAN DE MASSA IN INFLUENT. TUSSEN HAAKJES IS DE GEMETEN SPREIDING GETOOND



Uit afbeelding 8 is te zien dat voorbezinktanks maar een gedeelte van de cellulose verwijderen (met een grote spreiding in het verwijderingsrendement). Dit betekent dat een deel van de cellulose doorgaat naar het actief slib systeem. Cellulose wordt gedeeltelijk afgebroken in het actief slib systeem en in de gisting. Dit betekent dat circa 20% van de drogestof massa van uitgest slib uit cellulose bestaat.

4.3 CONCLUSIE

Een fijnzeef blijkt heel geschikt om specifiek cellulose te verwijderen uit influent. In dit onderzoek is gevonden dat zeefgoed voor circa 80% uit cellulose bestaat. Dit is waarschijnlijk wel afhankelijk van het zeefrendement, wat bij de experimenten in Blaricum 40% - 50% was. Het aandeel cellulose in primair slib is minder dan 30%. Als fijnzeven alle cellulose uit het influent verwijderen, zou dit betekenen dat het aandeel cellulose in het influent van rwzi Blaricum 32% is van de zwevendestof in het influent.

Voorbezonden water bevat nog veel cellulosevezels. Door de concentratie cellulose in slib te meten, is gevonden dat ook actief slib cellulosevezels bevat. Met batch experimenten, *in situ* experimenten en massabalansen is gevonden dat cellulose voor 30% - 70% afgebroken wordt in het zuiveringsproces. In Blaricum is bij een verblijftijd van 25 dagen bij 20°C ongeveer 50% afbraak van cellulose gemeten. Uitgest slib blijkt voor circa 20% uit cellulose te bestaan. Met lab-experimenten zijn verschillen in denitrificatiesnelheid tussen voorbezonden en gezeefd water niet waargenomen.

Bovenstaande conclusies moeten wel met enige voorzichtigheid gebruikt worden, omdat de pilot op één locatie gedraaid heeft en de zeefgoedsamenstelling op een andere locatie of onder andere procescondities mogelijk anders is. Ook is de samenstelling van het zeefgoed waarschijnlijk afhankelijk van het zwevende stofverwijderingsrendement en van de influentsamenstelling. Tevens kan de afbraak van cellulose per rwzi verschillen en is er een relatie met ondermeer de watertemperatuur. Het onderzoek naar de afbraakkinetiek wordt door Waternet / TU-Delft voortgezet.

5

AFZET ZEEFGOED

5.1 INLEIDING

Met een fijnzeef ontstaat zeefgoed. Dit laat zich met veerdruk ontwateren tot 25% - 30% drogestof. Met persen is circa 50% drogestof haalbaar. Op labschaal is zelfs 64% drogestof gehaald. Nut en noodzaak van een hoog drogestof percentage wordt bepaald door de verwerkingsroute. Bij het bepalen van verwerkingsroutes is het van belang mee te nemen dat de omvang van de stroom zeefgoed relatief bescheiden is ten opzichte van andere biomassa reststromen. Bij toepassing op alle rwzi's van Waternet gaat het maximaal om circa 37 ton ds per dag, zie hieronder tabel 10. Het is echter geen realistisch scenario om bij alle rwzi's een zeefinstallatie te plaatsen.

Door ECN is de mogelijkheid zeefgoed te drogen en vervolgens te verbranden in beeld gebracht. Daartoe is ook de samenstelling van zeefgoed onderzocht en vergeleken met vergelijkbare stromen.

In dit hoofdstuk worden de mogelijke verwerkingsroutes in beeld gebracht. Tevens wordt een indicatie gegeven van de afzetkosten.

5.2 HOEVEELHEID ZEEFGOED

Er is per rwzi geschat welke hoeveelheid zeefgoed Waternet kan produceren uitgaande van 50% verwijdering van zwevende stof in het influent.

TABEL 10

ZEEFGOED PRODUCTIE

rwzi	Droge stof kg/d	Nat product * ton/d	Nat product ton/j
Amstelveen	4.400	8,8	3.212
Amsterdam West	15.500	31	11.315
Blaricum	700	1,4	511
Hilversum	1.400	2,8	1.022
Horstermeer	3.100	6,2	2.263
Huizen	1.440	28,8	10.512
Loenen	215	4,3	1.570
Maarsse	370	7,4	2.701
Ronde Venen	1.050	2,1	767
Uithoorn	1.350	2,7	986
Weesp	1.600	3,2	1.168
Amsterdam Westpoort	7.700	15,4	5.621
Totaal AGV (Waternet)	37.225	74,5	27.193

* Nat product met 50% ds

Uit tabel 10 is te zien dat voor Waternet de maximale hoeveelheid die theoretisch geproduceerd zou kunnen worden circa 27.000 ton nat zeefgoed met 50% drogestof per jaar (13.500 ton ds) is. Ter vergelijking, Waternet produceert jaarlijks circa 80.000 ton ontwaterd slib met 23% ds (18.000 ton ds).

5.3 KWALITEIT ZEEFGOED

5.3.1 CALORISCHE WAARDE VAN HET ZEEFGOED

De calorische waarde van zeefgoed bedraagt 17-18 MJ/kg ds (HHV²). Deze waarde komt overeen met de op basis van een elementen analyse (C, H, O, N, S) berekende waarde van 17,4 MJ/kg ds (HHV). Dergelijke calorische waarden zijn gangbaar voor houtachtige soorten biomassa. De calorische waarde van het materiaal inclusief vocht (30% ds) bedraagt 3,4 MJ/kg (LHV³).

Een belangrijke eigenschap van gemengde biomassa brandstoffen is het aandeel biogene biomassa (geen kunststof aanwezig). Zeefgoed is 100% biogeen van aard.

5.3.2 VERGELIJKING BRANDSTOFKWALITEIT ZEEFGOED MET ANDERE BIOMASSA SOORTEN

Zeefgoed is vergeleken met de samenstelling en calorische waarde van een aantal andere soorten biomassa: hout, rwzi-slib en papierslib. De gegevens hiervan zijn afkomstig uit de ECN database Phyllis.

Om een vergelijking van zeefgoed met andere soorten biomassa voor brandstoftoepassing mogelijk te maken zijn de verontreinigingen, gemeten in hoeveelheid per massa-eenheid, uitgedrukt als hoeveelheid per energie eenheid. Hierdoor kan direct het effect van het vervangen van de ene soort brandstof door een andere op de totale hoeveelheid van verontreinigingen worden vastgesteld. In tabel 11 zijn de samenstellingen van de verschillende brandstoffen samengevat. Voor papierslib en rwzi-slib zijn een tweetal uitgebreide analyses geselecteerd; voor hout is het gemiddelde van een grote groep houtanalyses geselecteerd. Alle waarden zijn betrokken op de calorische waarde en uitgedrukt in g/GJ (droog en asvrij, LHV).

VERGELIJKING ZEEFGOED MET HOUT

De vergelijking van de verontreinigingen in de verschillende brandstoffen geeft aan dat zeefgoed ten opzichte van hout een hoger stikstof- en zwavelgehalte heeft, terwijl de gehalten aan chloor en fluoride vergelijkbaar zijn, zie tabel 11. De hoeveelheid as per energie-eenheid van zeefgoed is beduidend hoger. Hogere N en S gehalte hebben gevolgen voor de emissie van NO_x en SO₂ via de rookgassen. Het hogere asgehalte is ongunstig omdat de kosten van asafvoer bij biomassa gestookte installaties een belangrijke kostenpost is.

De gehalte zware metalen van zeefgoed zijn veelal in dezelfde orde grootte of lager (Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni en V). Gehaltes (Al, Fe, Ti en Zn) zijn hoger in vergelijking met hout. Vooral het Fe gehalte is beduidend hoger (factor 10).

2 Higher Heating Value: bovenwaarde, incl. condensatie warmte waterdamp

3 Lower Heating Value (onderwaarde, stookwaarde, excl. condensatie warmte waterdamp)

TABEL 11

CONCENTRATIE VERONTREINIGINGEN EN AS IN ZEEFGOED VD BANDZEEF 0,35 MM MAASWIJDTE (ECN ANALYSE),
PAPIERSLIB, RWZI-SLIB EN HOUT (< D.L. = BENEDEN DE DETECTIELIMIET; N.A. = NIET GEANALYSEERD).

		zeefgoed	papierslib	Rwzi-slib	hout
N	g/GJ	576	515	3.420	186
S	g/GJ	108	293	977	32
Cl	g/GJ	36	190	143	29
F	g/GJ	2	13	14	2
As	g/GJ	4.010	13.054	19.396	1.172
Drogestof	%	30,8			
As	% vd ds	7,1			
Calorische waarde	MJ/kgds HHV	17,85			
	MJ/kgds LHV	16,5			
	MJ/kgzeefgoed LHV	3,4			
Aluminium	g/GJ	97	1.659	897	20
Antimoon	g/GJ	< d.l.	0,1	0,4	0,1
Arseen	g/GJ	< d.l.	0,1	0,6	0,1
Barium	g/GJ	2,4	19,3	22,2	-
Cadmium	g/GJ	< d.l.	0,1	0,2	0,04
Calcium	g/GJ	448	5.305	3.593	592
Chroom	g/GJ	0,7	1,3	103,2	1,1
Kobalt	g/GJ	0,2	0,3	0,6	0,1
Koper	g/GJ	3,3	4,6	62,3	1,1
IJzer	g/GJ	156	105	1.557	14
Lood	g/GJ	1,7	3,2	15,3	1,5
Magnesium	g/GJ	52	172	252	37
Mangaan	g/GJ	2,5	4,3	26,1	8,9
Kwik	g/GJ	n.a.	0,02	0,1	0,01
Molybdeen	g/GJ	< d.l.	0,3	0,5	-
Nikkel	g/GJ	0,9	1,1	24,2	1,4
Fosfaat	g/GJ	140	106	1.329	12
Kalium	g/GJ	46	99	222	90
Silicium	g/GJ	294	2.754	2.389	126
Natrium	g/GJ	25	103	147	19
Titanium	g/GJ	5,7	84	105	1,7
Wolfraan	g/GJ	1,5	-	-	-
Vanadium	g/GJ	0,1	0,5	1,2	0,2
Zink	g/GJ	16	20	137	3

VERGELIJKING ZEEFGOED MET PAPIERSLIB EN RWZI-SLIB

Voor alle geanalyseerde componenten geldt dat zeefgoed lagere concentraties heeft in vergelijking met rwzi-slib, zie tabel 11. Tevens betekent dit dat de toepassing van zeefgoed als brandstof wat betreft brandstofkwaliteit in principe mogelijk is voor alle brandstof toepassingen van rwzi-slib en papierslib. Ten opzichte van papierslib is zeefgoed in grote lijnen vergelijkbaar of zelfs minder vervuild. Zeefgoed heeft lagere concentraties (Al, Ca, Mg, K, Ti en Si). Voor zowel papierslib als RWZI-slib geldt dat het as-gehalte van zeefgoed beduidend lager is.

5.4 VERWERKINGSSCENARIO'S

De volgende scenario's voor verwerking zullen hieronder beschreven worden:

- 1 Meevergisten met slib (of composteren)
- 2 Verbrandingsroute
- 3 Vetzuur productie
- 4 Papierproductie
- 5 Separaat vergisten
- 6 Hergebruik in de landbouw

5.4.1 MEEVERGISTEN MET SLIB

Een mogelijkheid zou zijn om het zeefgoed mee te vergisten met surplusslib en eventueel primair slib. Deze optie is niet aan te bevelen, omdat zeefgoed na persen al een drogestof percentage heeft van circa 50%. Tevens wordt een voordeel van een zeef teniet gedaan, namelijk dat ook haren en vezels worden verwijderd. Door vergisting komen deze weer vrij in het proces. Composteren is eventueel een mogelijkheid. Dit is niet nader onderzocht.

5.4.2 VERBRANDING

Door ECN is een studie verricht naar de mogelijkheden om zeefgoed te verbranden. Hieronder wordt een samenvatting van deze studie gegeven.

KWALITEIT VAN HET ZEEFGOED

De hogere gehalten aan zwavel en stikstof en het hogere asgehalte is een nadeel voor de toepassing van het materiaal als brandstof in houtgestookte installaties. In het algemeen zijn biomassa gestookte installaties niet voorzien van SO₂ emissie reductie maatregelen, vanwege het lage zwavelgehalte van houtachtige biomassa. Bijmengen van zeefgoed kan leiden tot de noodzaak deze maatregelen wel te treffen.

Het is nog onduidelijk in hoeverre zeefgoed pathogene organismen bevat en of een droogproces als hygiënisatiestap voldoende is. Dit kan een knelpunt zijn bij toepassing van het materiaal als brandstof.

JURIDISCHE STATUS

Gedroogd zeefgoed valt niet onder de witte lijst brandstoffen en moet mogelijk worden beschouwd als afvalstof. Dit zou de toepassingsmogelijkheden beperken. Vooral nog is het onwaarschijnlijk dat houtgestookte ("schoon" snoei- en resthout e.d.) installaties zeefgoed kunnen en willen accepteren. De kans dat B-hout gestookte installaties zeefgoed kunnen accepteren is groter. Het bijmengen van zeefgoed aan de brandstofinput van cementovens en/of kolencentrales lijkt mogelijk.

TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN

De geproduceerde hoeveelheid zeefgoed is beperkt, ook indien bij alle zuiveringsinstallaties van Waternet het inkomende water wordt gezeefd. Dit betekent dat de afzet van zeefgoed als brandstof bemoeilijkt wordt doordat exploitanten voor kleine brandstofvolumes geen aanpassingen aan de installatie zullen doorvoeren. Het inpassen van gedroogd zeefgoed aan een bestaande brandstofstroom is dan aantrekkelijker.

De afvoertarieven zijn niet bekend maar zullen waarschijnlijk lager zijn dan afvoer van roostergoed. Bij het AEB (Afvalenergiebedrijf) in Amsterdam wordt het roostergoed momenteel voor circa € 100,- per ton product verwerkt. Ontwaterd slib (met 23% drogestof) wordt momenteel voor € 82,- per ton product verwerkt.

Indien extern afzetten niet mogelijk is, kan gedroogd zeefgoed eventueel benut worden als

brandstof voor een thermische stand-alone drooginstallatie op één van de Waternet locaties. De energieopbrengst van het gedroogde zeefgoed is voldoende voor deze toepassing. De hoeveelheid is voor een WKK installatie niet voldoende.

DROOGKASSEN

Om de verbrandingswaarde van zeefgoed te verhogen en het volume van het zeefgoed te verlagen, kan het zeefgoed in droogkassen verder gedroogd worden tot 80 – 90% droge stof. Verwacht wordt dat zeefgoed zich uitstekend in kassen laat drogen en dat de droogsnelheid hoger is dan van zuiveringsslib. Indicatieve proeven zijn uitgevoerd in een geventileerde ruimte zonder zonlicht. Deze proeven laten zien dat met een laagdikte van 5 cm en enkele malen per week omzetten het zeefgoed (25% ds, van een zeef van 0,5 mm) aan de lucht 33% sneller droogt dan ontwaterd slib (23% ds).

CO₂ EMISSIE REDUCTIE

Het uitzeven, ontwateren, drogen en toepassen van het zeefgoed als brandstof levert een bijdrage aan het verminderen van de CO₂ emissie op. Het inzetten van gedroogd zeefgoed (op basis van 40 ton ds per dag uitgangsmateriaal) als brandstof kan maximaal een CO₂ reductie opleveren van ongeveer 10.200 tot 15.500 ton per jaar.

5.4.3 VETZUUR PRODUCTIE

In Nederland zijn een aantal initiatieven gestart om van biomassa reststromen nieuwe producten te maken. Zeefgoed is daar in potentie geschikt voor. Er werd in de anaerobe batchproeven (hoofdstuk 4) bij het verzuren van zeefgoed vooral azijnzuur en propionzuur geproduceerd, in ongeveer gelijke verhouding (Msc Thesis G. Breuer). Het zal door het type substraat en de aanwezige gemengde cultures, waarschijnlijk niet mogelijk zijn om de productie van vetzuren naar één type vetzuur te verschuiven.

De vetzuren zijn mogelijk winbaar en commercieel handelbaar, of kunnen in een rwzi benut worden voor denitrificatie in zandfilters of voor het biologische defosfateren. Er bestaan momenteel geen technieken waarmee op commerciële schaal vetzuren kunnen worden geproduceerd uit reststromen. Er zal een ontwikkeltraject noodzakelijk zijn.

Terugwinnen en concentreren van de vetzuren is wellicht mogelijk door gebruik te maken van de vluchtigheid van de vetzuren. Door gedeeltelijk vacuüm en temperatuursverhoging kunnen vetzuren in principe gestript worden. Voor commerciële verhandeling is concentreren noodzakelijk. Ook een eventuele combinatie van verzuring en PHA (polyhydroxyalkanoaten, bioplastic) productie is theoretisch mogelijk, maar geen bestaand proces. De waarde van azijnzuur is circa € 500 per ton.

De technische uitvoering zal nog problemen kennen vanwege de noodzaak de zuurgraad te controleren. Dit kan wellicht gebeuren door de reactor door te spoelen met gezeefd influent of door centraat te benutten. Zeefgoed laat zich redelijk goed doorspoelen. Het waswater kan weer over een zeef worden gestuurd om eventuele uitgespoelde cellulose af te vangen. Dosing van chemicaliën zal vanuit kostenoverwegingen geen optie zijn. Het uitschakelen van de methaangasproductie zal niet eenvoudig zijn in verband met de benodigde verblijftijd. Wellicht zal methaangasvorming beheersbaar zijn door een suboptimaal pH gebied voor verzuring te kiezen in combinatie met een lage temperatuur.

Eventueel zijn er voor een rwzi effectieve combinaties met een anaerobe tank denkbaar, waarbij de verblijftijd van zeefgoed wordt losgekoppeld van de hydraulische verblijftijd in de anaerobe tank.

5.4.4 PAPIERPRODUCTIE

Uit testen met het produceren van papier in een papierfabriek blijkt dat het technisch mogelijk is om uit zeefgoed papier te produceren (zie afbeelding 9). Het vezelgehalte en de vezelkwaliteit zijn daarvoor geschikt. Niet alleen op laboratoriumschaal is het mogelijk om papier te produceren. In de papierfabriek (museum) de Middelste Molen in Loenen (vlak bij Apeldoorn) is van zeefgoed een hoeveelheid papier geproduceerd (zie afbeelding 10).

AFBEELDING 9 PAPIER UIT ZEEFGOED (MET DANK AAN SMURFIT KAPPA)



AFBEELDING 10 PAPIERPRODUCTIE MIDDELSTE MOLEN



Echter, uit contacten met Smurfit Kappa, SGA en het kenniscentrum papier en karton blijkt dat toepassing als papier niet mogelijk zal zijn. De reden hiervoor is dat er geen acceptatie zal zijn van zeefgoed als grondstof, om hygiënische redenen en imago aspecten.

5.4.5 SEPARAAT VERGISTEN

Het is goed mogelijk om zeefgoed separaat te vergisten. De omzetting naar biogas is bijna volledig indien er een verblijftijd van 40 – 50 dagen wordt aangehouden.

Feitelijk worden dan slib en zeefgoed apart van elkaar vergist wat optimalisatie voor beide stromen mogelijk maakt. De conversie van cellulose is in traditionele vergisters op rwzi's voor primair slib vanwege een te korte verblijftijd maximaal 50%. Nagenoeg volledige omzetting in een cellulose vergister heeft voor de kosten van de slibverwerking en biogasproductie grote voordelen. Er ontstaat anaeroob slib met een yield van circa 0,2 g CZV/g CZV (Msc G, Breuer). Dit slib moet ontwaterd en afgevoerd worden naar een eindverwerker. Zeefgoed heeft een hoog drogestofgehalte en kan eventueel droog vergist worden net zoals GFT afval. Er kan overwogen worden om zeefgoed thermofiel te vergisten. Het hoge drogestofgehalte van zeefgoed zorgt dat eventueel transport naar een centrale vergistingsinstallatie beperkt is.

Ook bij commerciële afvalverwerkers is er interesse voor de vergisting van deze stroom. Een mogelijkheid kan zijn om zeefgoed in mestvergisters te verwerken. Juridische aspecten hiervan zijn niet nader onderzocht.

5.4.6 HERGEBRUIK IN DE LANDBOUW

De samenstelling van zeefgoed is zodanig dat toepassing in de landbouw niet uitgesloten is. Met composteren, eventueel na gedeeltelijke vergisting, kan wellicht de benodigde kiemdoeding worden gerealiseerd. De problemen ten aanzien van het juridisch kader en mogelijk de publieke perceptie zullen overwonnen moeten worden. In principe kan dit een waardevolle en kansrijke optie voor hergebruik van cellulosevezels zijn. De kosten voor hergebruik van zeefgoed in de landbouw ligt in de orde van € 60,= per ton product.

5.5 VERWERKINGSROUTES VAN AFVALSTOFFEN VAN DE PAPIERINDUSTRIE

In 2008 is door DHV onderzocht hoe de reststromen afkomstig van de papierindustrie verwerkt worden. In onderstaande tabel zijn van deze routes de verwerkingstarieven gegeven.

TABEL 12 INVENTARISATIE SLIBAFZET IN DE PAPIERINDUSTRIE (2008)

Verwerker	Soort	Euro per ton product
SCA		22
CDEM	Papierverwerker	25
Baksteenfabriek	Papierverwerker	20
RWE	Bruinkoolcentrale	40
Stora Enso	Papierfabriek	35

Het blijkt dat de afzetkosten van de papierindustrie in de orde zijn van € 20 - 40 per ton product.

5.6 CONCLUSIE

Hergebruik van zeefgoed is mogelijk en er zijn verschillende verwerkingsmogelijkheden als afval. Bij verwerking van zeefgoed als afval zijn de kosten voor transport en afzet relatief laag, omdat het zeefgoed tot circa 50% geperst kan worden. De verwerkingskosten zullen in de orde van € 20 - 100 per ton product zijn. Op de locatie Blaricum bijvoorbeeld wordt er 0,7 ton ds/dag zeefgoed of 1,4 ton zeefgoed (50%) geproduceerd. De afzetkosten zullen beter in beeld gebracht moeten worden om de haalbaarheid van een eventueel hergebruik vast te kunnen stellen.

Op dit moment zijn de juridische status en acceptatie eisen van zeefgoed niet duidelijk. Er zal in overleg met het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu (VROM) bepaald moeten worden wat de classificatie van zeefgoed is. Roostergoed is nu bijvoorbeeld gevaarlijk afval. Dit zal helder moeten zijn voordat de verwerkingsroute bepaald kan worden en het prijspeil voor verwerking vastgesteld kan worden.

6

TOEPASSING BIJ BESTAANDE RWZI'S

6.1 INLEIDING

Voor de rwzi's Blaricum en Uithoorn is een raming opgesteld voor de benodigde investering om influentzeven toe te passen. Hiermee is een inschatting gemaakt van de kostenbesparing door inzet van een fijnzeef. Rwnzi Blaricum heeft geen voorbezinktank in tegenstelling tot rwnzi Uithoorn met voorbezinktank. Voor de berekening van Uithoorn wordt de bestaande voorbezinktank vervangen door een zeefinstallatie. In de praktijk is in serie plaatsen van zeef en voorbezinktank wellicht meer voor de hand liggend, maar voor de berekening niet als uitgangspunt gekozen. De berekening is voor beide locaties uitgevoerd met één bandzeef (circa DWA) en voor Blaricum drie bandzeven (RWA) en voor Uithoorn vier bandzeven (RWA). Voor de berekening is uitgegaan van Salsnes bandzeven SF 6000.

Voor de rwnzi Blaricum is de gevoeligheid voor de capaciteit van de zeef bepaald. De doorzet van een zeef zal bepaald worden door de lokale afvalwatersamenstelling en RWA/DWA verhouding. Ook de mate waarin sprake is van "first flush" is van belang.

Door Salsnes wordt een capaciteit gehanteerd variërend van 100 – 250 m³/m².h voor de Noorse situatie. In de pilot van Blaricum was de bovendcapaciteit beperkt door de pompcapaciteit. Als reële waarde op basis van deze proef is 200 m³/m².h aangenomen. Er blijft behoefte aan Nederlandse praktijkervaring.

Het doel van de kostenberekening is vast te stellen of de inzet van een fijnzeef op een bestaande rwnzi leidt tot lagere kosten voor het zuiveren van afvalwater. Daarbij wordt de rwnzi inclusief de gehele slibeindverwerking meegenomen. In hoofdstuk 7 is voor de rwnzi Weesp voor een nieuwbouw situatie een kostenvergelijking tussen een zeefinstallatie en een voorbezinking opgesteld. Slibverwerking op een rwnzi is een kostbaar onderdeel voor het zuiveren van afvalwater. Als door maatregelen zoals zeven de slibproductie verminderd kan worden, is dat een groot voordeel. De kosten voor ontwateren en verwerking van ontwaterd slib is circa € 450,- per ton ds slib. Verwerking van het zeefgoed is circa € 20 - € 100 per ton zeefgoed (40% - 50% ds) en aanmerkelijk goedkoper (zie hoofdstuk 5). Uit dit verschil kan, afhankelijk van de lokale situatie, een fijnzeefinstallatie bekostigd worden.

6.2 BASISGEGEVENS RWZI'S BLARICUM EN UITHOORN

RWZI BLARICUM

Deze rwnzi heeft geen voorbezinktank. Eén zeef kan hydraulisch zonder extra pompinstallatie na het grofvuilrooster en voor de zandvanger geplaatst worden. De opstelling met drie zeven voor het gehele debiet wordt in de lay-out met een gemaal na de zandvanger geplaatst.

AFBEELDING 11 RWZI BLARICUM



TABEL 13

GEGEVENS RWZI BLARICUM

Rwzi Blaricum

Ontwerpcapaciteit:	33.000 i.e. (136 g)
Max hydraulische belasting:	1.600 m ³ /h
Ontwerp BZV-belasting:	0,05 kg BZV/(kg ds.d)
Type:	Actiefslib, carroussel; puntbeluchting
Ontvangend oppervlaktewater	Gooiergracht
Bouwjaar	1997
Aangesloten kernen	Blaricum, Eemnes, Laren
2008	
Belasting 2008:	27.735 i.e. (136g)
Verwijdering i.e.	Rendement: 93 %
Verwijdering N	Rendement: 91 %
Verwijdering P: chemisch	Rendement: 89 %

RWZI UITHOORN

Uithoorn heeft twee voorbezinktanks. Slechts één voorbezinktank is in bedrijf. De zeefinstallatie vervangt deze voorbezinktank. De zeefinstallaties worden in een voorbezinktank geplaatst. De zeefinstallatie voor RWA capaciteit (waarbij vier zeven nodig zijn), past royaal in één voorbezinktank. De andere voorbezinktank blijft stand by.

AFBEELDING 12 RWZI UITHOORN



TABEL 14 GEGEVENS RWZI UITHOORN

Rwzi Uithoorn	
Ontwerpcapaciteit:	70.000 i.e. (136 g)
Max hydraulische belasting:	2.250 m ³ /h
Ontwerp BZV-belasting:	0,07 kg BZV/(kg ds.d)
Type:	Actiefslib, propstromer; belenbeluchting + denitrificerend zandfilter
Ontvangend oppervlaktewater	Amstel
Bouwjaar	2006
Aangesloten kernen	Uithoorn, De Kwakel
2008	
Belasting 2008:	55.314 i.e. (136g)
Verwijdering i.e.	Rendement: 93 %
Verwijdering N	Rendement: 84 %
Verwijdering P: chemisch	Rendement: 91 %

6.3 UITGANGSPUNTEN BEREKENINGEN

In tabel 15 worden de uitgangspunten voor de kostenberekening weergegeven. Vervolgens zullen ze nader worden toegelicht. Opgemerkt dient te worden dat met name kosten voor ontwatering lastig te bepalen zijn. De operationele kosten (met name polymeer) zijn in de orde van € 100,= per ton ds ontwaterd slib. De investering is eveneens circa € 100,= per ton ds. Het resultaat van de berekening van de terugverdientijd wordt zowel met en zonder investering vermeld.

TABEL 15

UITGANGSPUNTEN BASISVARIANT

Omschrijving	Eenheid	Waarde
Specifieke slibproductie	kgds/kgCZV	0,30 /0,37 *
Rendement zeef	%SS	50/54 *
	%CZV	35/35
Gisting		
- omzetting secundair slib	%	20
- omzetting primair slib	%	45
- specifieke gasproductie	m ³ gas/kgds _{verw}	1,0
- opbrengst gas	euro/m ³	0,047
Zeefgoed		
- drogestof	ds %	50
- afzet zeefgoed naar AEB incl transport	euro per ton nat	86,50
Slibverwerkingskosten**		
- transport Blaricum naar West	euro/m ³	6,28
- transport Uithoorn naar West	euro/m ³	5,57
- ontwatering	euro/tonds	100 / 200
- afzet bij AEB	euro/tonds	365
- afzet AEB met 23% ds	euro/ton product	82
Electra	euro/kWh	0,12
Bedrijfsvoering		
- beheer zeefinstallatie	uur per jaar	100
- minder storingen rwzi	uur per jaar	-25
Behandeld jaardebiet met 1 zeef		
- Blaricum	%	90
- Uithoorn	%	61

* Blaricum/Uithoorn, huidige voorbezinktank (VBT) Uithoorn heeft een surplusslibproductie van 0,37 [kgds/kgCZV] en een rendement op SS van 54%

** kosten incl BTW

SPECIFIEKE SLIBPRODUCTIE ALS KG DS/KGCZV_{VERWIJDERD}

Voor Uithoorn wordt met de huidige surplusslibproductie van circa 0,37 kg ds/kgCZV gerekend. Bij Blaricum zal de slibbelasting dalen naar een ultra lage waarde van circa 0,022 kgBZV/kgds/d. Daarbij zal de cellulose, die ongeveer voor 50% afgebroken wordt, afwezig zijn in het slib. Dit zal mogelijk leiden tot een lage slibproductie. Een specifieke slibproductie van 0,30 kg ds/kgCZV voor Blaricum lijkt daardoor realistisch. Ter vergelijking zijn onderstaand slibproducties van andere rwzi's vermeld.

TABEL 16

SPECIFIEKE SLIBPRODUCTIE RWZI'S MET VOORBEZINKTANK

Rwzi 2008	Voorbezink tank	Slibbelasting	Slibbelasting	Specifieke slibproductie	Slib as-gehalte
		kgCZV/kgds/d	kgBZV/kgds/d	kgds/kgCZV	gds%
Amstelveen	ja	0,21	0,08	0,30	34
Blaricum	nee	0,09	0,034	0,49	24
Horstermeer	ja	0,12	0,05	0,43	32
Loenen	nee	0,08	0,03	0,41	25
Maarssen	ja	0,09	0,04	0,30	30
Ronde Venen	ja	0,09	0,04	0,52	27
Uithoorn	ja	0,17	0,07	0,37	32
gemiddeld				0,40 *	

* verschillen tussen rwzi's worden onder andere veroorzaakt door dosering van coagulanten.

Indien zeefgoed slechter afbreekbaar is dan primair slib, dan zal door verwijdering van cellulose met een zeef, de surplusslibproductie bij een zeefinstallatie mogelijk lager zijn dan bij een voorbezinktank. Op dit moment is dit nog onvoldoende aangetoond en kan hiermee geen rekening worden gehouden.

RENDEMENT ZEEF

Op basis van de gevonden rendementen in de fijnzeef pilot proeven (zie hoofdstuk 3) en literatuur, wordt een zwevendestof verwijderingsrendement 50% aangenomen. Dit is vergelijkbaar met een voorbezinktank. De huidige voorbezinktank op rwzi Uithoorn haalt echter 54% SS rendement. Het rendement van de fijnzeven wordt hieraan gelijk gesteld. Voor het CZV verwijderingsrendement van de fijnzeven wordt 35% gekozen.

GISTING

De omzetting van secundair slib in de gisting is afhankelijk van de mate van aerobe mineralisatie van dat slib. In Blaricum zal de slibbelasting heel sterk dalen ten opzichte van de huidige situatie. Voor Uithoorn en Blaricum wordt ervoor gekozen om met een omzetting van 20% op drogestof voor spuislib te rekenen. Voor omzetting van primair slib (Uithoorn) zal met een waarde van 45% op drogestof gerekend worden.

Er wordt met influent zeven minder slib in de gisting gebracht. De verblijftijd neemt dan toe. Er is de keuze gemaakt om de specifieke biogasproductie in de kostenberekeningen gelijk te houden op $1 \text{ m}^3/\text{kgds}_{\text{verwijderd}}$. Biogas heeft in de huidige situatie van de rwzi West een opbrengst van $0,047 \text{ /m}^3$.

ZEEFGOED

Ten behoeve van dit onderzoek zijn op labschaal proeven gedaan met het persen en ontwateren van zeefgoed.

Ervaringen met de zeven die op pilotschaal onderzocht zijn in de rwzi Blaricum geven aan dat met een lichte persdruk 25% - 30% gehaald wordt. Met persproeven (labschaal) is 50% - 63% drogestof bereikt. Op basis van de informatie van firma Salsnes blijkt dat op praktijkschaal tot 65% drogestof haalbaar is. In Noorwegen (wwtp Tromso) wordt omwille van slijtage aan de persen gekozen voor gemiddeld 45% drogestof. Onderstaand een voorbeeld van een geperste koek van zeefgoed met een drogestof van 63%.

AFBEELDING 13 GEPERST ZEEFGOED TROMMELZEEF EN PERSWATER VAN ZEEFGOED



Het perswater heeft een CZV waarde in de orde van 12 – 16 g CZV/l. Voor de rwzi Blaricum komt er ongeveer 0,5 m³ perswater retour naar de rwzi, dit betekent dat de CZV-retourvracht minder dan 1% van de influentvracht is.

Voor de berekeningen zal 50% drogestof aangehouden worden.

De afzet van zeefgoed hetzij als brandstof – eventueel na drogen – of als afval heeft consequenties voor de verwerkingskosten. Voor kleine locaties zoals de rwzi's Blaricum en Uithoorn is produceren van een brandstof vanwege de relatief geringe hoeveelheid geproduceerd zeefgoed mogelijk niet aan de orde. Zeefgoed zal in eerste instantie als afval verwerkt worden. De afzetkosten zullen wel lager zijn dan van roostergoed dat nu € 100 per ton product kost. Verwerking van zeefgoed – indien mogelijk – door een composteerder kost waarschijnlijk € 70 per ton product inclusief BTW. Er zijn echter ook afzetmogelijkheden waarbij de kosten lager zijn. Aangenomen wordt voor de berekening dat de verwerkingskosten inclusief transport € 86,50 zullen zijn. Daarbij wordt het zeefgoed naar een verbranding afgevoerd. Voor de situatie van Blaricum is een gevoeligheidsanalyse gemaakt voor de afzetkosten. In deze analyse zullen aannames tussen € 86,50 en € 36,50 per ton product incl BTW aangehouden worden.

SLIBVERWERKINGSKOSTEN

Voor de berekeningen is uitgegaan van afvoer van het slib naar de rwzi Amsterdam West. Transportkosten zijn per ton over de weegbrug gemeten gewicht. Voor het transport gelden de volgende tarieven voor 2009.

TABEL 17

TRANSPORTKOSTEN SLIB 2009

Traject	Transportkosten € / ton slib (incl BTW)
Blaricum - Amsterdam	6,28
Uithoorn - Amsterdam	5,57

Op rwzi Amsterdam West wordt het slib eerst vergist, vervolgens ontwaterd en afgevoerd naar het AEB voor verbranding. De totale ontwateringskosten (investering en operationele kosten) worden geschat op 200 euro per ton drogestof. De afzet naar het AEB kost € 82,= per ton product. Met een drogestof gehalte van 23% komt dat neer op 365 euro per ton drogestof.

ENERGIE

Energieverbruik voor de beluchting is gerelateerd aan de afname van de CZV in het influent door inzet van een fijnzeef. De huidige beluchtingsenergie voor Blaricum is 456 MWh per jaar. Modelmatig geeft de inzet van een fijnzeef een afname van de beluchtingsenergie van ongeveer 20%. Voor Uithoorn wordt verondersteld dat er geen verschil is, immers de zeef krijgt in de berekeningen een rendement gelijk aan de voorbezinktanks.

Een zeefinstallatie verbruikt ook energie. Berekend zijn de energie voor de zeef en de benodigde pers. Het volgende is aangenomen: energieverbruik zeef 5,5 kW/draaiuur en pers 1 kW/draaiuur. Gerekend wordt met een energieprijis van € 0,12 per kWh.

BEDRIJFSVOERING

Er zullen minder spinsels en andere verontreinigingen in het actiefslib proces komen, wat betekent dat er minder aandacht van bedrijfsvoering nodig is voor pompen, mengers, meters ed. Aan de andere kant zijn er extra kosten voor onderhoud van de zeefinstallatie. De verandering van de kosten voor de slibverwerking zijn gegeven in tabel 18.

TABEL 18

TIJDSBESTEDING BEDRIJFSVOERING BIJ GEBRUIK FIJNZEEF BASISVARIANT

Bedrijfsvoering	Extra kosten (uur/jaar)
Rwzi beheer zeefinstallatie	+ 100
Minder storingen rwzi	- 25

BEHANDELD JAARDEBIET

Een zeefinstallatie kan op DWA en/of RWA ontworpen worden. Bij DWA wordt een deel van het aanvoerdebiet gezeefd en een deel passeert de zeef zonder behandeling. Voor Uithoorn en Blaricum is gerekend met een hydraulische zeefbelasting van 250 m³/m²/h wat overeenkomt met een toevoer naar de zeef van 550 m³/h. Gerekend is met 16 uur aanvoeren per dag van de zeef. Voor Blaricum is dit meer dan het DWA debiet, namelijk 85% van het totale jaardebiet en voor Uithoorn ongeveer het DWA debiet, namelijk 61% van het totale jaardebiet. Voor Blaricum is de gevoeligheid van deze aanname onderzocht.

Op rwzi Blaricum kan met drie zeven het volledige jaardebiet behandeld worden. Op rwzi Uithoorn zijn hier vier zeven voor nodig.

6.4 RESULTATEN

Voor de berekeningen zijn vier situaties doorgerekend:

- 1 Rwzi Blaricum 1 zeef
- 2 Rwzi Blaricum 3 zeven
- 3 Rwzi Uithoorn 1 zeef
- 4 Rwzi Uithoorn 4 zeven

Gerekend is met een capaciteit van 550 m³/h voor één SF 6000 zeef van Salsnes. In bijlage 4 is de berekening voor de stichtingskosten opgenomen. In tabel 19 worden de stichtingskosten weergegeven.

TABEL 19

STICHTINGSKOSTEN (EURO) ZEEFINSTALLATIE VOOR DE VERSCHILLENDE SITUATIES

Rwzi	Aantal zeven	Bedrag
Blaricum	1	803.000
	3	2.270.000
Uithoorn	1	541.000
	4	1.445.000

Gerekend is met 20% onvoorzien.

De investering is voor Blaricum hoger dan voor Uithoorn door de lokale situatie.

Bij bovenstaande uitgangspunten is bij rwzi Blaricum de zeefinstallatie na circa 7 jaar terugverdiend indien de totale ontwateringskosten worden meeberekend. Indien alleen de operationele slibontwateringskosten genomen worden dan is de terugverdientijd 9 jaar. Voor Blaricum heeft een fijnzeef installatie voor het volledige debiet altijd een terugverdientijd > 15 jaar.

In de situatie van rwzi Uithoorn is de terugverdientijd voor één zeef 10 jaar indien de totale ontwateringskosten worden meeberekend of 17 jaar bij alleen meenemen van de operationele slibontwateringskosten. In Uithoorn wordt bij het volledige debiet de terugverdientijd van meer dan 15 jaar verwacht. De reden is dat de investeringen te hoog worden ten opzichte van de besparingen op slibverwerkingskosten.

Door Waternet wordt een terugverdientijd van 10 jaar als acceptabel beschouwd.

Voor Blaricum is voor 1 zeef in tabel 20 het resultaat van de exploitatieberekeningen vermeld. Er wordt een permanente besparing verwacht van circa € 128.000 per jaar. Daar staat een investering van € 803.000 tegenover.

TABEL 20

JAARLIJKSE KOSTEN EN OPBRENGSTEN BLARICUM ÉÉN ZEEF TEN OPZICHT VAN GEEN ZEEF

Omschrijving	opbrengsten	kosten
Lagere opbrengst biogas		2.530
Afzet zeefgoed		37.571
Totaal onderhoud zeef		12.790
Beheer zeefinstallatie		7.000
Energieverbruik zeef		6.817
Besparing beluchttingsenergie	11.160	
Minder transport secundair slib	62.602	
Besparing ontwatering	43.064	
Lagere afvoer naar AEB (slibeindverwerker)	76.713	
Minder storingen rwzi a.g.v. "spinsels"	1.750	
Totalen	195.289	66.707
saldo	128.582	

6.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE BLARICUM VOOR ÉÉN ZEEF

Er is voor de rwzi Blaricum voor de situatie met één zeef berekend wat voor 6 scenario's de terugverdientijd wordt. Bij alle scenario's geldt dat een deel van het influent gezeefd wordt. Dit is in de tabel te zien als percentage van het jaardebiet (zie tabel 21).

Er is een grote afhankelijkheid van vooral de toelaatbare hydraulische belasting (behandelde debiet) en de surplusslibproductie na de zeef. In mindere mate van, het rendement van de zeef, afzetkosten van zeefgoed en drogestof percentage zeefgoed. Zonder praktijkinformatie is vooralsnog het basis scenario het meest waarschijnlijk en is er een heel acceptabele terugverdientijd berekend.

De maximale hydraulische belasting zou bij voorkeur vooraf met een pilot vastgesteld kunnen worden. In hoofdstuk 1 is te zien dat gangbare hydraulische zeefbelastingen in Noorwegen variëren tussen 100 en 250 m³/m².h (onder water) bandoppervlakte. De voor deze studie gebruikte Salsnes zeef SF6000 heeft een effectief bandoppervlak van 2,2 m².

De te verwachten surplusslibproductie na een zeef kan alleen na voldoende praktijkervaring met redelijke zekerheid geschat worden. De kostendragers hebben het huidige kostenpeil en zijn in de berekening niet geïndexeerd.

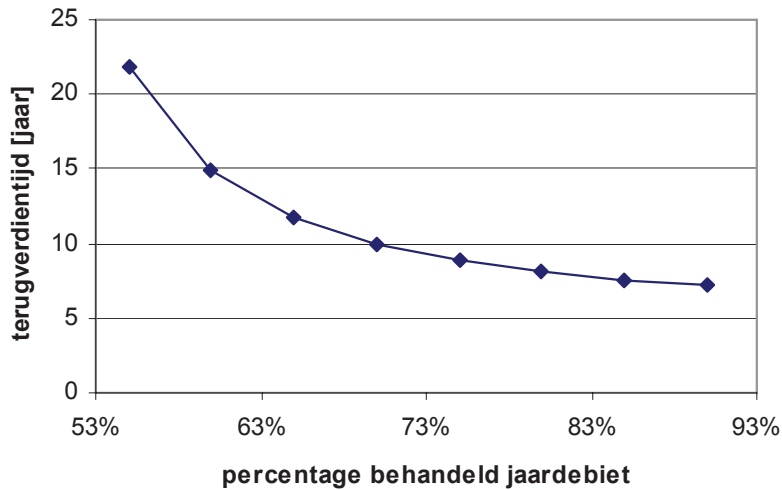
TABEL 21 BEREKENING SCENARIO'S VOOR EEN FIJNZEEF OP DE RWZI BLARICUM (WIJZIGING TEN OPZICHTE VAN SCENARIO BASIS IS VET GEDRUKT)

Omschrijving	Eenheid	basis	S1	S 2	S3	S4	S5	S5
Specifieke slibproductie (spui)	kgds/kgCZV	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40
Percentage jaardebiet	%	90	90	54	54	90	90	90
Hydraulische belasting zeef	m ³ /m ² /h	250	250	100	100	250	250	250
Rendement zeef	%SS	50	40	60	60	60	50	50
	%CZV	35	28	42	42	42	35	35
Zeefgoed								
- drogestof	ds%	50	50	50	50	50	50	50
- afzet zeefgoed	euro per ton nat	86,50	86,50	36,50	66,50	66,50	66,50	86,50
Gisting, elektra en slibverwerkingskosten		Uitgangswaarden blijven gelijk aan basis, zie tabel 15						
Terugverdientijd	jaar	7,2	7,7	11,4	13,3	9,1	10,9	12,4

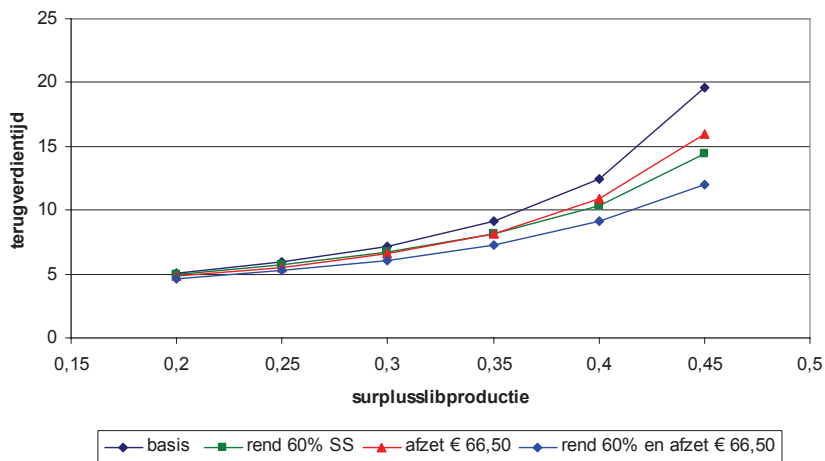
Stichtingskosten Blaricum één zeef € 803.000,=, rentevoet 5%.

Vanwege de zeer lage biologische slibbelasting in Blaricum na installatie van een zeefinstallatie lijkt vooralsnog een slibproductie van 0,30 kgds/kgCZV het meest realistisch. Duidelijk is wel dat bij een hogere slibproductie van bijvoorbeeld 0,40 kgds/kgCZV, voor een terugverdientijd van 10 jaar, de zeef of een hoger rendement moet hebben of zeefgoed goedkoper afgezet moet worden. Indien de hydraulische belastbaarheid van de zeef tegenvalt dan zal het iets lastiger, maar niet onmogelijk zijn om bovenstaande terugverdientijd te realiseren. In onderstaande afbeelding 14 is de gevoeligheid van de terugverdientijd in relatie tot de hydraulische belastbaarheid te zien. Uitgangspunt zijn de uitgangspunten van de basisvariant (zie tabel 15). Het blijkt dat voor een terugverdientijd van 10 jaar minimaal 70% van het jaardebiet behandeld moet worden. Dit is 290 m³/h of een hydraulische zeefbelasting van 132 m³/m².h. Dit is op rwzi Blaricum waarschijnlijk zonder probleem realiseerbaar aangezien tijdens de pilot veel hogere hydraulische zeefbelastingen gehaald zijn (140 – 200 m³/m².h).

AFBEELDING 14 TERUGVERDIENTIJT IN RELATIE TOT HET PERCENTAGE BEHANDELD JAARDEBIET VOOR RWZI BLARICUM



Interessant is de relatie tussen de surplusslibproductie en de terugverdiëntijd. In onderstaande afbeelding 15 is de basisvariant (zie tabel 15) opgenomen en tevens het effect op de terugverdiëntijd indien het rendement van de zeef stijgt naar 60% zwevendestof ipv 50% zwevendestof of de afzetprijs van zeefgoed daalt naar € 66,50 ipv € 86,50. Ook het gecombineerde effect is zichtbaar gemaakt. Een surplusslib productie in kg ds/kg CZV_{verwijderd} van 0,45 is overigens heel onwaarschijnlijk aangezien de huidige slibproductie zonder voorbezinktank 0,49 is.

AFBEELDING 15 TERUGVERDIENTIJT IN RELATIE TOT DE SURPLUSSLIBPRODUCTIE IN KG DS/KG CZV_{VERWIJDERD}

6.6 CONCLUSIE

Bovenstaande berekeningen laten zien dat er een acceptabele terugverdiertijd is voor de twee beschouwde rwzi's bij DWA behandeling. De terugverdiertijd heeft een sterke relatie met de biologische surplusslibproductie en de maximale hydraulische belasting van de zeef.

Het blijkt dat in deze cases een rwzi zonder voorbezinktank een kortere terugverdiertijd heeft dan een rwzi met voorbezinktank.

De mogelijkheid dat er een acceptabele terugverdiertijd is, geldt vermoedelijk voor veel meer rwzi's met of zonder bestaande voorbezinktank. Voorwaarde is wel dat er geen dure lokale kosten zijn en de zeef hydraulisch inpasbaar is zonder dat er een extra opvoergemaal ten behoeve van de zeef nodig is.

7

TOEPASSING BIJ NIEUWBOUW

In hoofdstuk 6 is de economische evaluatie van toepassing van een zeefinstallatie bij bestaande rwzi's beschreven. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het resultaat bij een nieuwbouw situatie. Een zeefinstallatie wordt vergeleken met een voorbezinktank.

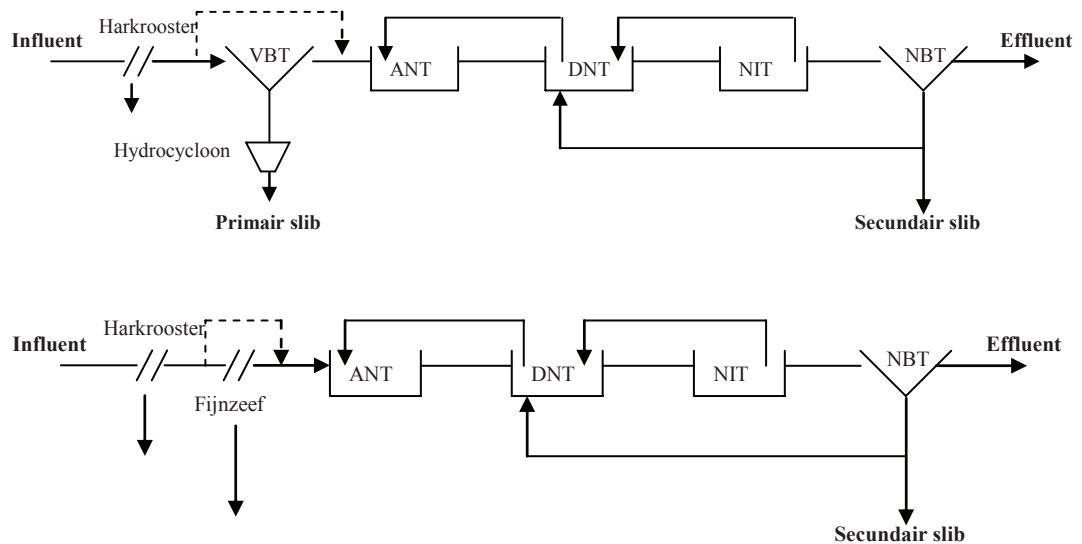
7.1 INLEIDING

Voor de geheel nieuw te bouwen rwzi Weesp is een varianten studie uitgevoerd. Voor deze STOWA rapportage is het resultaat van berekening opgenomen. De investeringskosten en exploitatielasten zijn voor twee varianten vergeleken, zie tabel 22.

TABEL 22 VARIANTEN

1	Voorbezinking, actief slib proces mUCT, nabezinking
2	Fijnzeven, mUCT, nabezinking

AFBEELDING 16 PROCESSHEMA'S VAN VARIANT 1 (BOVEN) EN VARIANT 2 (ONDER)



7.2 UITGANGSPUNTEN

De volgende uitgangspunten zijn in de berekening gebruikt.

TABEL 23 TOEKOMSTIGE VUILVRACHTEN EN DEBIETEN

Parameter	Eenheid	Ontwerp Toekomst 2030
Vuillast (à 136 g CZV)	-	60.000
Gemiddeld dagdebiet	m ³ /d	14.872
DWA debiet	m ³ /h	800
Minimaal debiet	m ³ /h	200
RWA debiet	m ³ /h	2.200
CZV vracht	kg/d	5.706
BZV vracht	kg/d	2.287
Zwevende stof vracht	kg/d	3.192
N-kjeldahl vracht	kg/d	537
P-totaal vracht	kg/d	87
BZV/N	-	4,3
BZV/P	-	26

In onderstaande tabel zijn de gebruikte verwijderingrendementen van de voorbezinktank (variant 1) en de fijnzeefinstallatie (variant 2) opgenomen. Op basis van de resultaten in Blaricum (zie hoofdstuk 3) is het rendement bij zeven voor BZV, KjN en P-totaal wat lager gekozen dan bij de voorbezinktank.

TABEL 24 VERWIJDERINGRENDEMENTEN VOORBEZINKTANK EN FIJNZEEFINSTALLATIE

Parameter	Eenheid	Variant 1	Variant 2
		Verwijderingrendement voorbezinktank	Verwijderingrendement fijnzeefinstallatie
CZV	%	35	35
BZV	%	30	25
Zwevende stof	%	50	50
N-kjeldahl	%	5	0
P-totaal	%	5	0

Het effluent wordt geloosd op het Amsterdam-Rijnkanaal. Het Amsterdam-Rijnkanaal valt onder de categorie groot ontvangend oppervlakte water. De toekomstige effluenteisen van rwzi Weesp zijn in tabel 25 opgenomen.

TABEL 25 TOEKOMSTIGE EFFLUENTEISEN

Parameter	Eenheid	Hoeveelheid	Toetsing
CZV	mg/l	<125	Grenswaarde (<7 maal 100% overschrijding)
BZV	mg/l	<20	Grenswaarde (<7 maal 100% overschrijding)
Zwevende stof	mg/l	<30	Grenswaarde (<7 maal 150% overschrijding)
N-totaal	mg/l	<10	Jaargemiddelde
P-totaal	mg/l	<2	Voortschrijdend gemiddelde 10 metingen

UITGANGSPUNTEN FIJNZEEFINSTALLATIE

- Aantal zeven: 4
- Capaciteit elk: 550 m³/h
- Leverancier: Salsnes (Noorwegen)
- Type: SF 6000
- Maaswijdte: 0,35 mm
- Afmetingen: l = 2,6m, b = 2,7 m, h = 1,6 m
- Rendementen: zie tabel 24
- Zeefgoed: 4 persen; ds gehalte \geq 35 %; wassen niet nodig; container(s) afgedekt met afzuigaansluiting (hoeft niet binnen), op vloeistofdichte vloer. De pers is geïntegreerd met de zeef en wordt als één apparaat gekocht.
- Zeefgoedcontainer: aantal 2, inhoud ieder circa 30 m³; er wordt gemiddeld circa 1.600 kg ds (zeefgoed) per dag geproduceerd, 35 % ds met een soortelijk gewicht van 0,5 ton/m³. Dit is circa 9 m³ zeefgoed /dag
- By-pass voor de volledige RWA is noodzakelijk, bij ontwerp van de biologie is rekening gehouden dat bij RWA in geval van storing aan een van de zeven een debiet hoger dan 1.650 m³/h gebypassed wordt. In de dimensionering van de actiefslibtanks is rekening gehouden met verwerking van maximaal 550 m³/uur ruw influent.
- Verwerkingskosten zeefgoed, op basis van de inzichten tijdens berekenen variantenstudie, EUR 60,= per ton ds
- Opstelling fijnzeven: De Salsnes zeven worden in een afgesloten ruimte geplaatst, waar bij voldoende aandacht aan de luchtafzuiging wordt gegeven (gerichte afzuiging van de omkasting van de zeven). Voor de overkapping wordt voorlopig uitgaan van een staalconstructie met dak- en gevelbeplating en hijsvoorzieningen.

TABEL 26

UITGANGSPUNTEN KOSTENBEREKENING, INCLUSIEF BTW

Omschrijving	Eenheid	Waarde
Toeslagfactor (van bouwkosten naar stichtingskosten)	-	1,7
Onnauwkeurigheidsmarge	%	ca 30
Afschrijvingen		
- <i>Werktuigbouwkundig</i>	jaar	15
- <i>Civiel</i>	jaar	30
- <i>Bouwrente</i>	%	5,0
- <i>Annuïteit civiel</i>	-	0,0651
- <i>Annuïteit W/E</i>	-	0,0963
Exploitatiekosten		
- <i>Onderhoudskosten civiele onderdelen</i>	% *	0,5
- <i>Onderhoudskosten W&E onderdelen</i>	% *	3,0
- <i>Energie</i>	€/kWh	0,10
- <i>IJzerzout</i>	€/kg Fe	1,00
- <i>Vloeibaar polymeer</i>	€/kg actief PE	5,50
- <i>Externe slibverwerking</i>	€/ton ds	450
- <i>Verwerking zeefgoed</i>	€/ton ds	60

* van de stichtingskosten (minus ontwerpkosten)

OPMERKINGEN

De bovenstaande uitgangspunten zijn opgesteld met de inzichten bij aanvang van de studie. Op basis van de huidige inzichten is bekend dat vier zeven waarschijnlijk vijf zeven moeten zijn en dat de te halen drogestof percentages voor zeefgoed > 50% zijn. De actuele zeefgoed verwerkingskosten zijn niet bekend.

Er zijn in de berekening geen kosten voor de vergistinstallatie opgenomen. Feitelijk zou een extra verschil ontstaan omdat de vergister bij een zeefvariant de helft kleiner zou zijn inclusief alle bijbehorende procesonderdelen zoals gashouder, Warmte Kracht Koppeling (WKK), uitgegistlibbuffer en ontwateringsapparatuur. Uitgangspunt voor deze studie was dat het slib op de rwzi Amsterdam West vergist wordt, waar al deze investeringen al gedaan zijn.

7.3 RESULTAAT

Met bovenstaande uitgangspunten zijn de stichtingskosten en jaarlijkse lasten berekend.

TABEL 27 STICHTINGSKOSTEN VAN DE TWEE VARIANTEN (+/- 30 % NAUWKEURIG)

Omschrijving	Variant 1	Variant 2
	Voorbezinktank	Fijnzeef
Civiele bouwkosten	€ 7.334.000	€ 7.191.000
Werktuigbouwkundige bouwkosten	€ 3.372.000	€ 3.677.000
Elektrotechnische bouwkosten	€ 1.517.000	€ 1.655.000
Totale bouwkosten	€ 12.223.000	€ 12.523.000
Investerings toeslag (70%)	€ 8.556.000	€ 8.766.000
Totale stichtingskosten	€ 20.779.000	€ 21.289.000

Voor beide varianten geldt dat de stichtingskosten per i.e. circa 345-355 euro bedragen. Dat is een gebruikelijk bedrag. De stichtingskosten van de twee varianten liggen dicht bij elkaar. De civiele kosten van de voorbezinktank waarop bij variant 2 wordt bespaard, komen terug via de werktuigbouwkundige kosten van de fijnzeven. Variant 2 met de fijnzeven is uiteindelijk € 510.000,= duurder, dat is ten opzichte van variant 1 circa 2,5 %. Dat is verwaarloosbaar gezien de geldende onnauwkeurigheid.

TABEL 28 OVERZICHT VAN DE JAARLIJKSE KOSTEN (EURO/JAAR)

Omschrijving	Variant 1	Variant 2
Afschrijving (op basis van stichtingskosten)		
- <i>Civiel (30 jaar)</i>	€ 811.000	€ 795.000
- <i>Werktuigbouw/elektra (15 jaar)</i>	€ 800.000	€ 873.000
Onderhoud (op basis van stichtingskosten)		
- <i>Civiele onderdelen (0,5 %)</i>	€ 62.000	€ 61.000
- <i>Werktuigbouw/elektra (3 %)</i>	€ 249.000	€ 272.000
Afzetkosten		
- <i>primair slib</i>	€ 262.000	-
- <i>secundair slib</i>	€ 254.000	€ 262.000
- <i>zeefgoed</i>	-	€ 35.000
Dosering PE op secundair slib (3 g PE/kg ds)	€ 9.000	€ 10.000
Dosering ijzerchloride (Me/P = 0,15)	€ 8.000	€ 9.000
Energie	€ 97.000	€ 107.000
Totaal (exclusief personeel)	€ 2.552.000	€ 2.424.000

In tabel 28 is te zien dat de variant met de fijnzeefinstallatie (variant 2) de laagste exploitatiekosten heeft. Het verschil bedraagt 128.000 euro (5,3 %). Dat wordt veroorzaakt door de fors lagere verwerkingskosten van het zeefgoed ten opzichte van het primaire slib. Indien voor het zeefgoed hetzelfde tarief wordt gehanteerd als voor het overige slib, worden de jaarlijkse kosten van variant twee 227.000 euro duurder. Dan is de variant met fijnzeven 99.000 euro duurder (3,7 %). Bij de afweging moet nog in de beschouwing worden meegenomen dat het slib van variant 1 op rwzi Amsterdam West extra biogas oplevert.

7.4 CONCLUSIE

Uit bovenstaande studie blijkt dat in een groene weide variant de kosten voor een rwzi met voorbezinktank of een voorbehandeling met behulp van een zeefinstallatie ongeveer gelijk zijn. Met de gehanteerde onvolledigheidstoeslag zijn de gevonden verschillen niet significant. Echter, er is geen rekening gehouden met de effecten op de sliblijn of drogen van zeefgoed.

Of een fijnzeef voordelen heeft ten opzichte van een voorbezinktank zal mede bepaald worden door de energiebalans en andere duurzaamheidsoverwegingen. Zeefgoed kan verbrand worden. Dit zal gewogen moeten worden ten opzichte van biogas productie. In hoofdstuk 8 wordt de energiebalans voor rwzi Weesp doorgerekend.

8

ENERGIEBALANS

8.1 INLEIDING

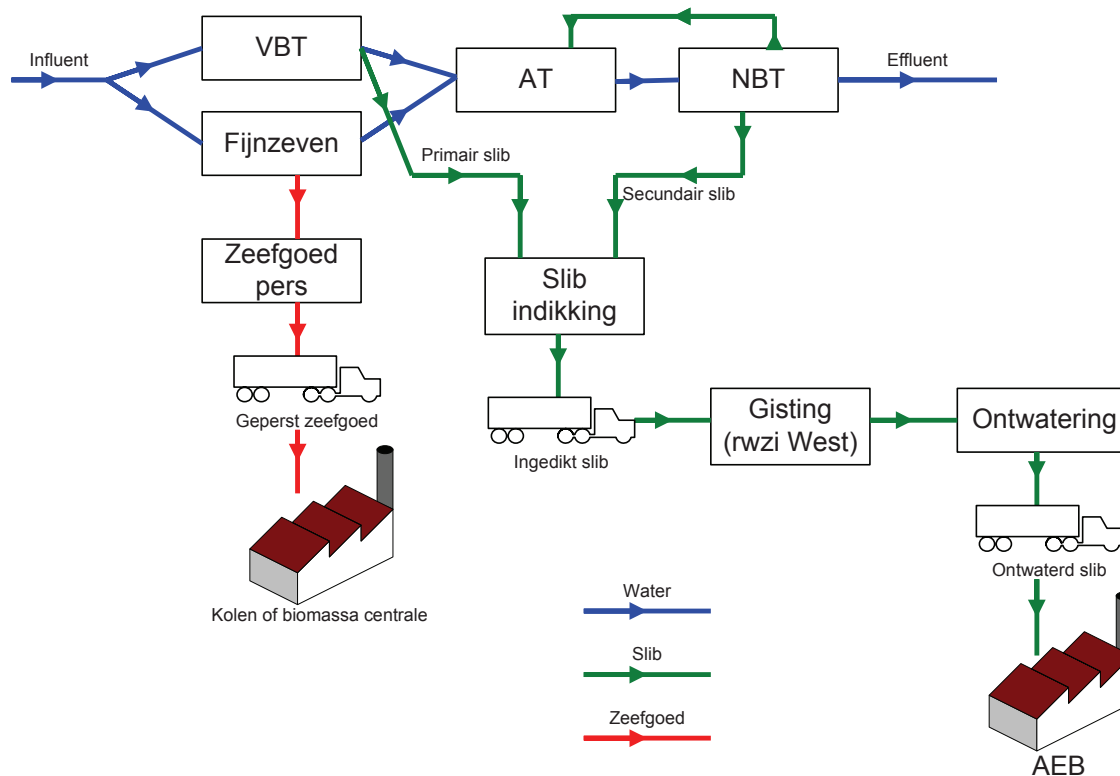
Met het toepassen van een fijnzeef op een rwzi, verandert ook de energiebalans van de zuivering. Zo is er bijvoorbeeld meer elektriciteit nodig voor een fijnzeef dan voor een voorbezinktank. Echter, afvangen van zeefgoed kan zorgen voor minder beluchting (als er geen voorbezinktank aanwezig was). Verder kan zeefgoed beter worden ontwaterd dan slib, waardoor er minder transportbewegingen zijn en de calorische waarde hoger dan slib is. In dit hoofdstuk worden al deze verschillen meegenomen in een energiebalans. Dit wordt gedaan voor drie verschillende zuiveringen. Op rwzi Blaricum is al een tijd getest met een fijnzeef. Blaricum heeft echter geen voorbezinktank die vervangen wordt door de fijnzeef, vandaar dat de berekening ook is gedaan voor rwzi Uithoorn. Hier zouden fijnzeven namelijk wel de voorbezinktanks vervangen. Als laatste is rwzi Weesp meegenomen in de berekening. Hier wordt een totaal nieuwe zuivering gebouwd en dus is dit de groene weide vergelijking (toepassing bij nieuwbouw, zie hoofdstuk 7). In totaal levert dit 8 verschillende situaties op voor de energiebalans, zie tabel 29:

TABEL 29 SITUATIES ENERGIEBALANS

nr	Plaats rwzi	Aantal zeven	Beschrijving
1	Uithoorn	0	Referentie, met voorbezinking (zoals huidig)
2	Uithoorn	1	De zeef kan 61% van het influent verwerken. Het overige influent gaat over de overgebleven voorbezinktank.
3	Uithoorn	4	Met de zeven wordt al het influent verwerkt en wordt voorbezinking overbodig
4	Blaricum	0	Referentie, zonder voorbezinking (zoals huidig)
5	Blaricum	1	De zeef kan 85% van het influent verwerken. Het overige influent gaat nog steeds rechtstreeks naar de actiefslibtanks (AT's).
6	Blaricum	3	Met de zeven wordt al het influent verwerkt.
7	Weesp	0	Referentie, met voorbezinking
8	Weesp	4	De zeven verwerken al het influent

In het processchema worden de verschillende situaties grafisch toegelicht.

AFBEELDING 17 PROCESSHEMA GEBRUIKT VOOR DE ENERGIEBALANS



In de energiebalans zijn de volgende aspecten meegenomen (zie ook het processchema):

- energie benodigd voor:
 - alle verbruikers op de rwzi, inclusief influent- en effluent gemalen, luchtbehandeling en gebouwen⁴
 - de sliblijn vanaf het afscheiden van slib tot en met de indikking
 - de mechanische ontwatering van slib (op rwzi Amsterdam West)
 - verwarming gisting (met restwarmte WKK's)
- transport van:
 - ingedikt slib naar de centrale gisting en ontwatering (op rwzi Amsterdam West)
 - ontwaterd slib naar de slibverbranding (het AEB)
 - mechanisch ontwaterd zeefgoed naar de verbrandingslocatie
- energie opwekking met:
 - verbranding van het biogas uit de slibgisting op rwzi Amsterdam West
 - de verbranding van ontwaterd (uitgegist) slib
 - de verbranding van geperst zeefgoed

De hoeveelheden slib en zeefgoed waarmee gewerkt wordt in de energiebalans worden weergegeven in tabel 30. Deze hoeveelheden zijn gelijk aan de hoeveelheden in de kostenberekening (hoofdstuk 6 en 7).

⁴ De Slibketenstudie (Stowa 2005-26) neemt alleen de verbruikers van de waterlijn mee en geen influent- en effluentgemalen, luchtbehandeling en gebouwen.

TABEL 30 DE HOEVEELHEDEN SLIB EN ZEEFGOED GEBRUIKT IN DE ENERGIEBALANS

Hoeveelheden		Uithoorn			Blaricum			Weesp	
		Referentie	1 zeef	4 zeven	Referentie	1 zeef	3 zeven	Referentie	4 zeven
Slibproductie	m ³ /dag	23	9	0	0	0	0	35	0
primair	% ds	6,1	6,1	0	0	0	0	4,5	0
	kg ds/dag	1.429	557	0	0	0	0	1.596	0
Slibproductie	m ³ /dag	24	22	22	50	23	19	28	28
secundair	% ds	5,6	5,6	5,6	2,7	2,7	2,7	5,5	5,5
	kg ds/dag	1.328	1.236	1.236	1.350	613	521	1.546	1.556
Slibproductie	m ³ /dag	47	31	22	50	23	19	64	28
totaal	% ds	5,9	5,7	5,6	2,7	2,7	2,7	4,9	5,5
	kg ds/dag	2757	1.793	1.236	1.350	613	521	3.142	1.556
Slibproductie	% ds	23	23	23	23	23	23	23	23
ontwaterd	m ³ /dag	7,8	5,5	4,2	4,4	2,0	1,7	8,9	5,3
(uitgegist)	kg ds/dag	1.797	1.261	962	1.015	465	397	2.056	1.211
Zeefgoed	kg/dag nat	0	1.744	2.858	0	1.190	1.400	0	3.192
productie	% ds	0	50%	50%	0	50%	50%	0	50%
	kg ds/dag	0	872	1.429	0	595	700	0	1.596

8.2 BEREKENING

8.2.1 IN- EN UITGAANDE PRODUCTEN

In de energiebalans is het totale proces allereerst bekeken als een black box waar producten in gaan en producten uitkomen. Dit is te zien in afbeelding 18.

AFBEELDING 18 BLACK BOX MET PRODUCTEN IN EN UIT



In de berekening is geen energiewaarde toegekend aan het influent en effluent. Deze stromen komen daarom niet terug in de energiebalans.

8.2.2 THEORETISCHE ENERGIE INHOUD

De producten genoemd in afbeelding 18 zijn wel tastbaar, maar het is nog niet mogelijk een vergelijking te maken tussen de verschillende situaties. Daarom zijn de in- en uitgaande producten omgerekend naar een theoretische energie inhoud. Dit wordt weergegeven in MJ per jaar. Het gaat dan om de calorische waarde van de producten.

De calorische waarden die gelden voor de producten zijn als volgt:

TABEL 31 CALORISCHE WAARDEN VAN DE IN- EN UITGAANDE PRODUCTEN

	Calorische waarde
Elektriciteit	3,6 MJ/kWh (= 9 MJ _{primaire} /kWh*)
Aardgas	31,65 MJ/Nm ³
Warmte (voor gisting)	4,18 MJ/m ³ slib/°C verschil
Dieselolie	34,61 MJ/liter
Biogas	23,30 MJ/Nm ³ **
Ontwaterd slib	0,77 MJ/kg slib ***
Gedroogd zeefgoed	13,8 MJ/kg zeefgoed****

* Bij 40% elektrisch rendement (gemiddelde in Nederland)

** Bron: SenterNovem Cijfers en tabellen 2007

*** De calorische waarde van slib is 21,662 MJ/kg org. stof. Het organische stof gehalte van uitgestist slib is 65%. Er is echter ook nog energie benodigd voor de verdamping van het aanhangende water. Hiervoor geldt de factor 3,2 MJ/kg water.

**** ECN heeft bepaald dat de HHV calorische waarde van zeefgoed 16,7 MJ/kg ds is. Dit kan worden omgerekend naar een actuele waarde (passend bij het droge stof gehalte) met de volgende vergelijking: Calorische waarde gedroogd zeefgoed = HHV*gehalte ds - 2,442*gehalte water

8.2.3 PRIMAIRE ENERGIE INHOUD

De theoretische energie inhoud van een product is in het geval van biogas, ontwaterd slib en gedroogd zeefgoed niet gelijk aan de werkelijke energie inhoud. Dit komt doordat er energieverlies plaats vindt tijdens de verbranding. Slechts een gedeelte van de theoretische energie inhoud wordt omgezet in bruikbare energie (elektriciteit), het grootste gedeelte wordt omgezet in niet bruikbare warmte. Deze warmte is wel nodig voor de gisting, maar aangezien er een overschot wordt geproduceerd bij de verbranding van biogas, wordt in de primaire energie berekening warmte buiten beschouwing gelaten. Er hoeven namelijk geen extra primaire brandstoffen, zoals aardgas, worden ingezet om deze warmte te produceren.

Voor de energiebalans wordt uitgerekend hoeveel elektriciteit er opgewekt kan worden met de uitgaande producten biogas, ontwaterd slib en zeefgoed. Het produceren van elektriciteit gebeurt op de volgende manieren:

TABEL 32 ELEKTRISCHE RENDEMENTEN VAN DE VERBRANDING VAN DE UITGAANDE PRODUCTEN

	Beschrijving proces	Elektrisch rendement
Biogas	Verbranding in WKK's van het AEB	37% [Energiefabriek]
Ontwaterd slib	Meeverbranding met huisvuil bij het AEB	24% [AEB]
Zeefgoed	Meeverbranding in kolen- of biomassacentrale *	40% [Energiefabriek]

* De afzetroute van het zeefgoed is nog onbekend, maar in deze berekening wordt aangenomen dat het zeefgoed meeverbrand kan worden in een biomassacentrale of een kolencentrale. Dit is een best case scenario, waarmee de maximale potentie van het zeefgoed wordt aangegeven. Met een gevoeligheidsanalyse zal worden bepaald of deze aanname terecht is.

Bij een omrekening naar primaire energie wordt meegenomen hoeveel primaire (fossiele) brandstoffen er nodig zijn. Voor brandstoffen is er een rechtstreekse omrekening van de calorische waarde naar de primaire energie waarde. Voor de productie van elektriciteit wordt een gemiddeld rendement van 40% aangenomen. De primaire energiewaarde voor elektriciteit wordt daarmee $3,6/0,40 = 9$ MJ/kWh.

8.3 RESULTATEN

8.3.1 UITHOORN

In onderstaande tabel worden de in- en uitgaande producten voor rwzi Uithoorn weergegeven.

TABEL 33 DE IN- EN UITGAANDE PRODUCTEN VOOR RWZI UITHOORN

Producten in		Referentie	1 zeef	4 zeven	
<u>Elektriciteit</u>					
VBT	MWh/jr	4	2	0	
Fijnzeven	MWh/jr	0	48	53	
Slibpompen	MWh/jr	23	18	12	
Indikking	MWh/jr	56	53	50	
Overige verbruikers	MWh/jr	1.170	1.170	1.170	
Slibontwatering	MWh/jr	81	52	36	80 kWh/ton ds [Energiefabriek werkrapport]
Zeefgoed ontwatering	MWh/jr	0	9	14	
Totaal	MWh/jr	1.334	1.352	1.336	
<u>Aardgas</u>					
Gebouwen	m ³ /jr	8.911	8.911	8.911	[Waternet, 2007]
<u>Warmte *</u>					
Gisting	GJ/jaar	1.283	857	606	4,18 MJ/m ³ /°C à van 15 naar 33 °C
<u>Diesel</u>					
Nat slib naar rwzi West	liter/jaar	11.367	7.593	5.371	30 km
Ontwaterd slib naar AEB	liter/jaar	63	44	34	1 km
Nat zeefgoed naar verbranding	liter/jaar	0	424	695	30 km
Droog zeefgoed naar verbranding	liter/jaar	0	0	0	30 km
Totaal	liter/jaar	11.431	8.061	6.100	
Producten uit					
<u>Biogas</u>					
Gisting slib	m ³ /jaar	315.296	166.414	75.370	Berekend volgens Chen&Hashimoto, zie ook Energiefabriek werkrapport
<u>Brandstoffen</u>					
Ontwaterd slib	ton/jaar	2.852	2.001	1.527	23% ds
Geperst zeefgoed	ton/jaar	0	637	1.043	50% ds

* Warmte wordt nu nog meegenomen, maar in de primaire energiebalans niet meer, aangezien er voldoende warmte wordt geproduceerd bij de verbranding van biogas en er dus geen extra primaire energiebron voor hoeft te worden ingezet.

Deze in- en uitgaande producten zijn vervolgens omgerekend naar een theoretische energie inhoud. Hiermee wordt het mogelijk een voorlopige vergelijking te maken tussen de drie verschillende situaties.

TABEL 34

DE THEORETISCHE ENERGIE INHOUD VOOR RWZI UITHOORN

	Eenheid	Referentie	1 zeef	4 zeven	Bron/opmerking
GJ in					
Elektriciteit	GJ/jr	4.801	4.867	4.810	
Aardgas	GJ/jr	282	282	282	
Warmte	GJ/jr	1.283	857	606	
Diesel	GJ/jr	396	279	211	
Totaal	GJ/jr	6.761	6.285	5.909	
GJ uit					
Biogas	GJ/jr	-7.346	-3.877	-1.756	
Ontwaterd slib	GJ/jr	-2.209	-1.550	-1.182	
Droog zeefgoed	GJ/jr	0	-4.538	-7.437	
Totaal	GJ/jr	-9.556	-9.965	-10.375	
GJ balans	GJ/jr	-2.794	-3.680	-4.466	Opwekking

In bovenstaande tabel is te zien dat er meer energie uit het proces komt dan er in gaat. Er kan dus theoretisch energie worden opgewekt. Dit komt voornamelijk doordat de uitgaande producten biogas, ontwaterd slib en zeefgoed een grote theoretische energie inhoud hebben. Helaas gaat een groot deel van deze theoretische energie verloren als de uitgaande producten worden omgezet in bruikbare energie (elektriciteit in dit geval). De hoeveelheid elektriciteit die kan worden opgewekt wordt weergegeven in tabel 35. Hierbij zijn de rendementen gebruikt die genoemd zijn in tabel 32.

TABEL 35

DE OPGEWEEKTE ELEKTRICITEIT MET DE UITGAANDE PRODUCTEN VAN RWZI UITHOORN

Elektriciteit uit		Referentie	1 zeef	4 zeven
Biogas	MWh/jr	-755	-399	-180
Ontwaterd slib	MWh/jr	-147	-103	-79
Droog zeefgoed	MWh/jr	0	-504	-826
Totaal	MWh/jr	-902	-1.006	-1.086

Met de opgewekte hoeveelheid elektriciteit van de uitgaande producten, kan een energiebalans worden opgesteld in primaire energie. Het resultaat hiervan is weergegeven in tabel 36.

TABEL 36

DE PRIMAIRE ENERGIEBALANS VOOR RWZI UITHOORN

Primaire energie in		Referentie	1 zeef	4 zeven	Bron/opmerking
Elektriciteit	GJ prim/jr	12.002	12.168	12.025	
Aardgas	GJ prim/jr	282	282	282	
Diesel	GJ prim/jr	396	279	211	
Totaal	GJ prim/jr	12.679	12.729	12.518	
Primaire energie uit (via E)					
Biogas	GJ prim/jr	-6.795	-3.587	-1.624	
Ontwaterd slib	GJ prim/jr	-1.325	-930	-709	
Droog zeefgoed	GJ prim/jr	0	-4.538	-7.437	
Totaal	GJ prim/jr	-8.121	-9.054	-9.771	
Prim. energie balans	GJ prim/jr	4.558	3.674	2.747	Energie verlies
Per ve verwijderd (136czv)	MJ prim/ve	80	64	48	57.209 ve

In de primaire energiebalans voor rwzi Uithoorn is te zien dat er bij alle drie de situaties meer primaire energie benodigd is voor het proces dan er kan worden opgewekt uit de uitgaande producten. Dit heeft meerdere oorzaken. Zo is de ingaande primaire energie hoger dan de ingaande theoretische energie, aangezien er bij de productie van elektriciteit uit een primaire energiebron slechts een rendement van 40% is (zie Inleiding energiebalans). Bovendien is er een sterk rendementsverlies bij het opwekken van elektriciteit uit de uitgaande producten. Hierdoor produceren zij minder primaire energie dan hun theoretische energie inhoud.

Uit een onderlinge vergelijking van de drie situaties blijkt dat er het minste energieverlies is bij het gebruik van vier zeven. Bij het gebruik van een voorbezinktank (referentie) treedt het meeste energieverlies op.

8.3.2 BLARICUM

In onderstaande tabel worden de in- en uitgaande producten voor rwzi Blaricum weergegeven.

TABEL 37 DE IN- EN UITGAANDE PRODUCTEN VOOR RWZI BLARICUM

Producten in		Referentie	1 zeef	3 zeven	Bron/opmerking
<u>Elektriciteit</u>					
VBT	MWh/jr	0	0	0	
Fijnzeven	MWh/jr	0	48	53	
Beluchting	MWh/jr	604	423	423	
Overige verbruikers	MWh/jr	450	450	450	
Slib ontwatering	MWh/jr	39	18	15	80 kWh/ton ds [Energiefabriek werkrapport]
Zeefgoed ontwatering	MWh/jr	0	9	12	
Totaal	MWh/jr	1.094	948	954	
<u>Aardgas</u>					
Gebouwen	m ³ /jr	1.239	1.239	1.239	[Waternet, 2007]
<u>Warmte</u>					
Gisting	GJ/jaar	1.373	624	530	4,18 MJ/m ³ /°C à van 15 naar 33 °C
<u>Diesel</u>					
Nat slib naar rwzi West	liter/jaar	17.844	8.103	6.887	44 km
Ontwaterd slib naar AEB	liter/jaar	36	16	14	1 km
Geperst zeefgoed naar verbranding	liter/jaar	0	425	500	44 km
Totaal	liter/jaar	17.880	8.544	7.400	
Producten uit					
<u>Biogas</u>					
Gisting slib	m ³ /jaar	92.151	40.727	34.141	Berekend volgens Chen&Hashimoto, zie ook Energiefabriek werkrapport
<u>Brandstoffen</u>					
Ontwaterd slib	ton/jaar	1.611	738	630	23% ds
Geperst zeefgoed	ton/jaar	0	434	511	50% ds

Deze in- en uitgaande producten zijn vervolgens omgerekend naar een theoretische energie inhoud. Hiermee wordt het mogelijk een voorlopige vergelijking te maken tussen de drie verschillende situaties.

TABEL 38

DE THEORETISCHE ENERGIE INHOUD VOOR RWZI BLARICUM

	Eenheid	Referentie	1 zeef	3 zeven	Bron/opmerking
GJ in					
Elektriciteit	GJ/jr	3.938	3.412	3.434	
Aardgas	GJ/jr	39	39	39	
Warmte	GJ/jr	1.373	624	530	
Diesel	GJ/jr	619	296	256	
Totaal	GJ/jr	5.969	4.370	4.259	
GJ uit					
Biogas	GJ/jr	-2.147	-949	-795	
Ontwaterd slib	GJ/jr	-1.248	-571	-488	
Droog zeefgoed	GJ/jr	0	-3.096	-3.643	
Totaal	GJ/jr	-3.395	-4.617	-4.926	
GJ balans	GJ/jr	2.574	-247	-667	Verlies/Opwekking

In bovenstaande tabel is te zien dat er bij de referentie meer energie het proces in gaat dan er uit komt. Bij de zeef alternatieven is dit andersom, hiermee kan dus theoretisch energie worden opgewekt. Bij de referentie situatie kan niet theoretisch energie worden opgewekt aangezien hier geen voorbezinktank wordt toegepast en er daarom relatief veel energie nodig is voor beluchting en er relatief weinig energie kan worden opgewekt met het vergisten van slib. Deze theoretische energiebalans is niet realistisch, aangezien niet de volledige energie inhoud van de uitgaande producten kan worden omgezet in bruikbare energie. In onderstaande tabel wordt de geproduceerde elektriciteit uit de uitgaande producten weergegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de elektrische rendementen vermeld in tabel 32.

TABEL 39

DE OPGEWekte ELEKTRICITEIT MET DE UITGAANDE PRODUCTEN VAN RWZI BLARICUM

Elektriciteit uit		Referentie	1 zeef	3 zeven
Biogas	MWh/jr	-221	-98	-82
Ontwaterd slib	MWh/jr	-83	-38	-33
Droog zeefgoed	MWh/jr	0	-344	-405
Totaal	MWh/jr	-304	-480	-519

Met de opgewekte hoeveelheid elektriciteit van de uitgaande producten, kan een energiebalans worden opgesteld in primaire energie. Het resultaat hiervan is weergegeven in tabel 40.

TABEL 40 DE PRIMAIRE ENERGIEBALANS VOOR RWZI BLARICUM

	Eenheid	Referentie	1 zeef	3 zeven	Bron/opmerking
Primaire energie in					
Elektriciteit	GJ prim/jr	9.844	8.530	8.585	
Aardgas	GJ prim/jr	39	39	39	
Diesel	GJ prim/jr	619	296	256	
Totaal	GJ prim/jr	10.502	8.865	8.880	
Primaire energie uit (via E)					
Biogas	GJ prim/jr	-1.986	-878	-736	
Ontwaterd slib	GJ prim/jr	-749	-343	-293	
Droog zeefgoed	GJ prim/jr	0	-3.096	-3.643	
Totaal	GJ prim/jr	-2.735	-4.317	-4.671	
Prim. energie balans	GJ prim/jr	7.767	4.547	4.209	Energieverlies
Per ve verwijderd	MJ prim/ve	288	169	156	26.959 ve (2008)

In de primaire energiebalans voor rwzi Blaricum is te zien dat er bij alle drie de situaties meer primaire energie benodigd is voor het proces dan er kan worden opgewekt uit de uitgaande producten. Dit wordt net als bij rwzi Uithoorn veroorzaakt doordat er bij de productie van elektriciteit uit primaire bronnen energie verloren gaat (er is immers maar een rendement van 40%). Ditzelfde geldt voor de opwekking van elektriciteit uit de uitgaande producten.

Uit een onderlinge vergelijking van de drie situaties valt op dat er een groot verschil is tussen de referentie en het gebruik van één zeef. Dit kan worden verklaard uit het feit dat bij de referentie geen voorbezinktank aanwezig is. Er kan dan dus geen energie worden opgewekt uit primair slib en bovendien is er meer energie nodig voor de beluchting. Met één zeef wordt 85% van het influent gezeefd, waardoor veel meer zwevende stoffen worden afgevangen. Hieruit kan energie worden opgewekt en er is minder beluchtingsenergie nodig. Het verschil met drie zeven is niet zo groot meer, aangezien hiermee maar 15% meer influent wordt behandeld.

8.3.3 WEESP

In onderstaande tabel worden de in- en uitgaande producten voor rwzi Weesp weergegeven.

TABEL 41 DE IN- EN UITGAANDE PRODUCTEN VOOR RWZI WEESP

Onderdeel	Eenheid	Referentie	4 zeven	Bron/opmerking
Producten in				
<u>Elektriciteit</u>				
Zandvanger + zandwasser	MWh/jr	13	0	
Voorbezinktank	MWh/jr	21	0	
Fijnzeven	MWh/jr	0	82	
Beluchting	MWh/jr	437	479	
Overige verbruikers	MWh/jr	497	497	
Slib ontwatering	MWh/jr	92	45	
Zeefgoed ontwatering	MWh/jr	0	15	
Zeefgoed droging	MWh/jr	0	0	
Totaal	MWh/jr	1.060	1.118	
<u>Aardgas</u>				
Gebouwen	m ³ /jr	4.000	4.000	
<u>Warmte</u>				
Gisting	GJ/jaar	1.746	777	4,18 MJ/m ³ /°C à van 15 naar 33 °C
<u>Diesel</u>				
Nat slib naar rwzi West	liter/jaar	17.017	7.573	33 km
Ontwaterd slib naar AEB	liter/jaar	72	43	1 km
Nat zeefgoed naar verbranding	liter/jaar	0	854	33 km
Totaal	liter/jaar	17.090	8.470	
Producten uit				
<u>Biogas</u>				
Gisting slib	m ³ /jaar	356.145	94.883	Berekend volgens Chen&Hashimoto, zie ook Energiefabriek werkrapport
<u>Brandstoffen</u>				
Ontwaterd slib	ton/jaar	3.262	1.922	23% ds
Geperst zeefgoed	ton/jaar	0	1.165	50% ds

Deze in- en uitgaande producten zijn vervolgens omgerekend naar een theoretische energie inhoud. Hiermee wordt het mogelijk een voorlopige vergelijking te maken tussen de twee verschillende situaties.

TABEL 42

DE THEORETISCHE ENERGIE INHOUD VOOR RWZI WEESP

GJ in		Referentie	4 zeven	Bron/opmerking
Elektriciteit	GJ/jr	3.817	4.026	
Aardgas	GJ/jr	127	127	
Warmte	GJ/jr	1.746	777	
Diesel	GJ/jr	591	293	
Totaal	GJ/jr	6.281	5.223	
GJ uit				
Biogas	GJ/jr	-8.298	-2.211	
Ontwaterd slib	GJ/jr	-2.527	-1.489	
Droog zeefgoed	GJ/jr	0	-8.306	
Totaal	GJ/jr	-10.825	-12.005	
GJ balans	GJ/jr	-4.544	-6.782	Opwekking

Ook bij het proces van rwzi Weesp kan er theoretisch energie worden opgewekt, aangezien de uitgaande energiehoeveelheid hoger is dan de ingaande hoeveelheid. Echter, niet alle theoretisch uitgaande energie kan worden omgezet in bruikbare energie (elektriciteit). In onderstaande tabel wordt de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit uit de uitgaande producten weergegeven. Hiervoor is gebruik gemaakt van de elektrische rendementen vermeld in tabel 32.

TABEL 43

DE OPGEWekte ELEKTRICITEIT MET DE UITGAANDE PRODUCTEN VAN RWZI WEESP

Elektriciteit uit		Referentie	4 zeven
Biogas	MWh/jr	-853	-227
Ontwaterd slib	MWh/jr	-168	-99
Droog zeefgoed	MWh/jr	0	-923
Totaal	MWh/jr	-1.021	-1.249

Met de opgewekte hoeveelheid elektriciteit van de uitgaande producten, kan een energiebalans worden opgesteld in primaire energie. Het resultaat hiervan is weergegeven in tabel 44.

TABEL 44

DE PRIMAIRE ENERGIEBALANS VOOR RWZI WEESP

Primaire energie in		Referentie	4 zeven	Bron/opmerking
Elektriciteit	GJ prim/jr	9.541	10.066	
Aardgas	GJ prim/jr	127	127	
Diesel	GJ prim/jr	591	293	
Totaal	GJ prim/jr	10.259	10.486	
Primaire energie uit (via E)				
Biogas	GJ prim/jr	-7.676	-2.045	
Ontwaterd slib	GJ prim/jr	-1.516	-893	
Droog zeefgoed	GJ prim/jr	0	-8.306	
Totaal	GJ prim/jr	-9.192	-11.244	
Prim. energie balans	GJ prim/jr	1.068	-758	Verlies/Opwekking
Per ve verwijderd	MJ prim/ve	26	-18	

In bovenstaande tabel is te zien dat bij toepassing van fijnzeven bij de nieuwbouw van rwzi Weesp er meer primaire energie opgewekt kan worden dan er benodigd is. Dit kan verklaard worden door het relatief lage elektriciteitsverbruik op de zuivering, door toepassing van nieuwe (hoog rendement) installaties. Bovendien wordt gerekend met toekomstige debieten en influentvrachten, welke ruim zijn ingeschat. Hierdoor kan er relatief veel elektriciteit worden opgewekt uit de uitgaande producten. Bij toepassing van een voorbezinktank is de benodigde hoeveelheid primaire energie wel hoger dan de geproduceerde hoeveelheid.

8.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE

In de energiebalans zijn een aantal aannamen gemaakt. Om te bekijken in hoeverre verandering van de aannamen tot andere resultaten leidt, is er een gevoeligheidsanalyse gedaan. De aannamen worden weergegeven in tabel 45. Ook wordt een minimale en maximale waarde voor de aannamen gegeven. De aanname zal logischerwijs niet beneden of boven deze waarden komen. Door de minimale en maximale waarden een voor een te gebruiken in de berekening van de energiebalans is de gevoeligheid bepaald. Het resultaat hiervan is te zien in tabel 46 en afbeeldingen 19 en 20.

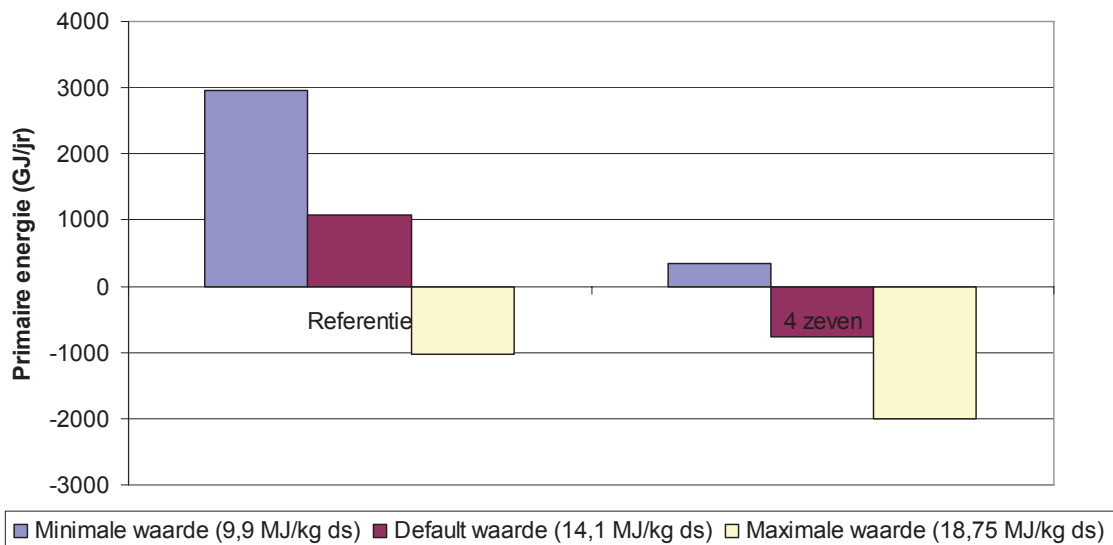
TABEL 45 DE AANNAMEN GEMAAKT IN DE ENERGIEBALANS

Beschrijving	Eenheid	Default waarde	Minimale waarde	Maximale waarde	Opmerking/bron
Calorische waarde biogas	MJ/m ³	23,3	19	25	Bron: Agentschap.nl, cijfers en tabellen 2007
Calorische waarde slib	MJ/kg org ds	21,6	18	25	Bron: slibketenstudie
Organische stof in slib	% os van ds	65	55	75	Standaard waarde
Calorische waarde slib	MJ/kg ds	14,1	9,9	18,75	Deze waarde wordt uitgerekend met Cal. waarde slib (MJ/kg org ds) maal % os van ds, maar kan ook handmatig veranderd worden
Calorische waarde zeefgoed	MJ/kg ds HHV	16,7	13	20	Bepaald door ECN
Geperst ds zeefgoed	%	50	35	65	50% is bewezen met persproeven op kleine schaal.
Transportafstand geperst zeefgoed Uithoorn-verbranding	km	30	10	200	Aanname: geperst zeefgoed heeft de zelfde transportafstand als ingedikt slib
Transportafstand geperst zeefgoed Blaricum-verbranding	km	44	10	200	Aanname: gedroogd zeefgoed heeft de zelfde transportafstand als ingedikt slib
Transportafstand geperst zeefgoed Weesp-verbranding	km	33	10	200	Aanname: geperst zeefgoed heeft de zelfde transportafstand als ingedikt slib
Ds gehalte ontwaterd slib	% ds	23	20	25	Deze waarde wordt ook in de kostenberekening gebruikt.
Elektrisch rendement WKK op biogas	%	37	30	45	Bron: Energiefabriek
Elektrisch rendement verbranding ontwaterd slib	%	24	0	40	Bron: Peter Simoes, AEB
Elektrisch rendement verbranding gedroogd zeefgoed	%	40	0	45	Bron: Energiefabriek

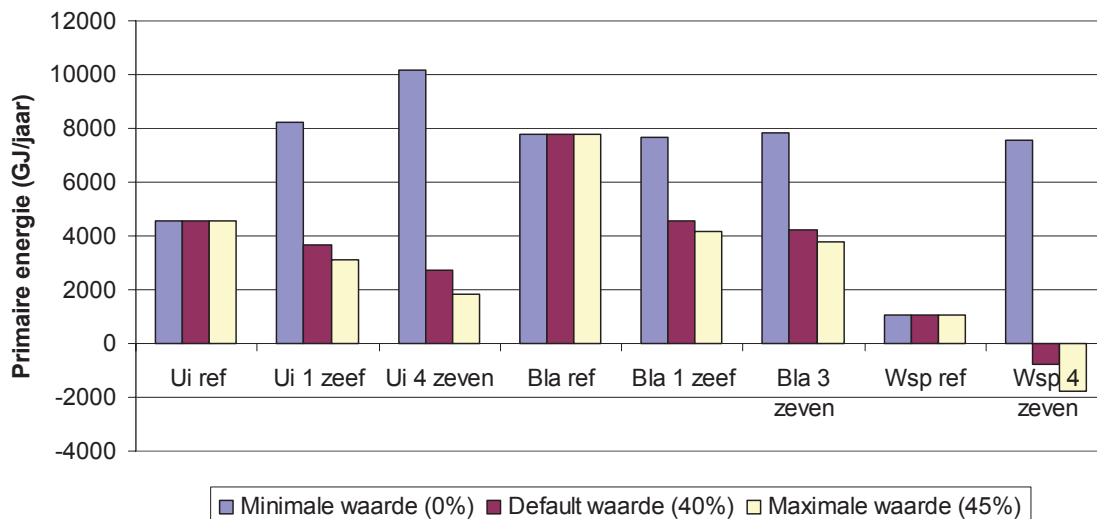
TABEL 46 EFFECT MINIMALE EN MAXIMALE WAARDEN VAN AANNAMEN OP PRIMAIRE ENERGIEBALANS

Beschrijving	Nieuwe waarde	Effect
Calorische waarde biogas (MJ/m ³)	19	Geen effect
	25	Geen effect
Calorische waarde slib (MJ/kg ds)	9,9	Uithoorn en Blaricum geen effect. Weesp fijnzeven heeft nu meer prim. energie nodig dan geproduceerd wordt. Toch blijven de fijnzeven een betere energiebalans houden dan de referentie. Zie afbeelding 19.
	18,75	Uithoorn en Blaricum geen effect. Weesp referentie produceert nu ook meer prim. energie dan er nodig is. Toch blijven de fijnzeven een betere energiebalans houden dan de referentie. Zie afbeelding 19.
Calorische waarde zeefgoed (MJ/kg ds HHV)	13	Bij Uithoorn en Weesp wordt de energiebalans van de referentie beter dan die van de fijnzeven. De minimale calorische waarde om de fijnzeven nog een betere energiebalans te geven dan de referenties is 14 MJ/kg. Bij Blaricum is er geen effect.
	20	Geen effect.
Geperst ds zeefgoed (%)	35	Uithoorn en Blaricum geen effect. Weesp fijnzeven heeft nu meer prim. energie nodig dan geproduceerd wordt. Toch blijven de fijnzeven een betere energiebalans houden dan de referentie.
	65	Geen effect.
Transportafstanden geperst zeefgoed - verbranding (km)	10	Geen effect.
	200	Geen effect.
ds gehalte ontwaterd slib (%)	20	Geen effect.
	25	Geen effect.
Elektrisch rendement WKK op biogas (%)	30	Geen effect.
	45	Uithoorn en Blaricum geen effect. Weesp referentie produceert nu ook meer prim. energie dan er nodig is. Toch blijven de fijnzeven een betere energiebalans houden dan de referentie.
Elektrisch rendement verbranding ontw. slib (%)	0	Uithoorn en Blaricum geen effect. Weesp fijnzeven heeft nu net meer prim. energie nodig dan geproduceerd wordt. Toch blijven de fijnzeven een betere energiebalans houden dan de referentie.
	40	Uithoorn en Blaricum geen effect. Weesp referentie produceert nu ook meer prim. energie dan er nodig is. Toch blijven de fijnzeven een betere energiebalans houden dan de referentie.
Elektrisch rendement verbranding geperst zeefgoed (%)	0	In alle situaties wordt de energiebalans van de referentie beter dan die van de fijnzeven. Zie afbeelding 20. De minimale rendementen om de fijnzeven nog een betere energiebalans te geven dan de referenties zijn: Uithoorn: 33%, Blaricum: 1% en Weesp: 32%
	45	Geen effect. Zie afbeelding 20.

AFBEELDING 19 EFFECT VERANDERING CALORISCHE WAARDE SLIB RWZI WEESP



AFBEELDING 20 EFFECT VERANDERING ELEKTRISCH RENDEMENT BIJ VERBRANDING ZEEFGOED



In tabel 46 is te zien dat alleen verandering in de calorische waarde van zeefgoed en het elektrisch rendement bij de verbranding van zeefgoed een effect heeft op de uitkomst van de energiebalans. Bij de minimale waarde van deze aannamen is de energiebalans van de referentiesituatie gunstiger dan die van de fijnzeven. Dit geldt voornamelijk voor rwzi Uithoorn en Weesp. Bij Blaricum is er namelijk geen effect van een lagere calorische waarde en is slechts 1% elektrisch rendement al voldoende om de fijnzeven situaties een gunstigere balans te geven dan de referentie.

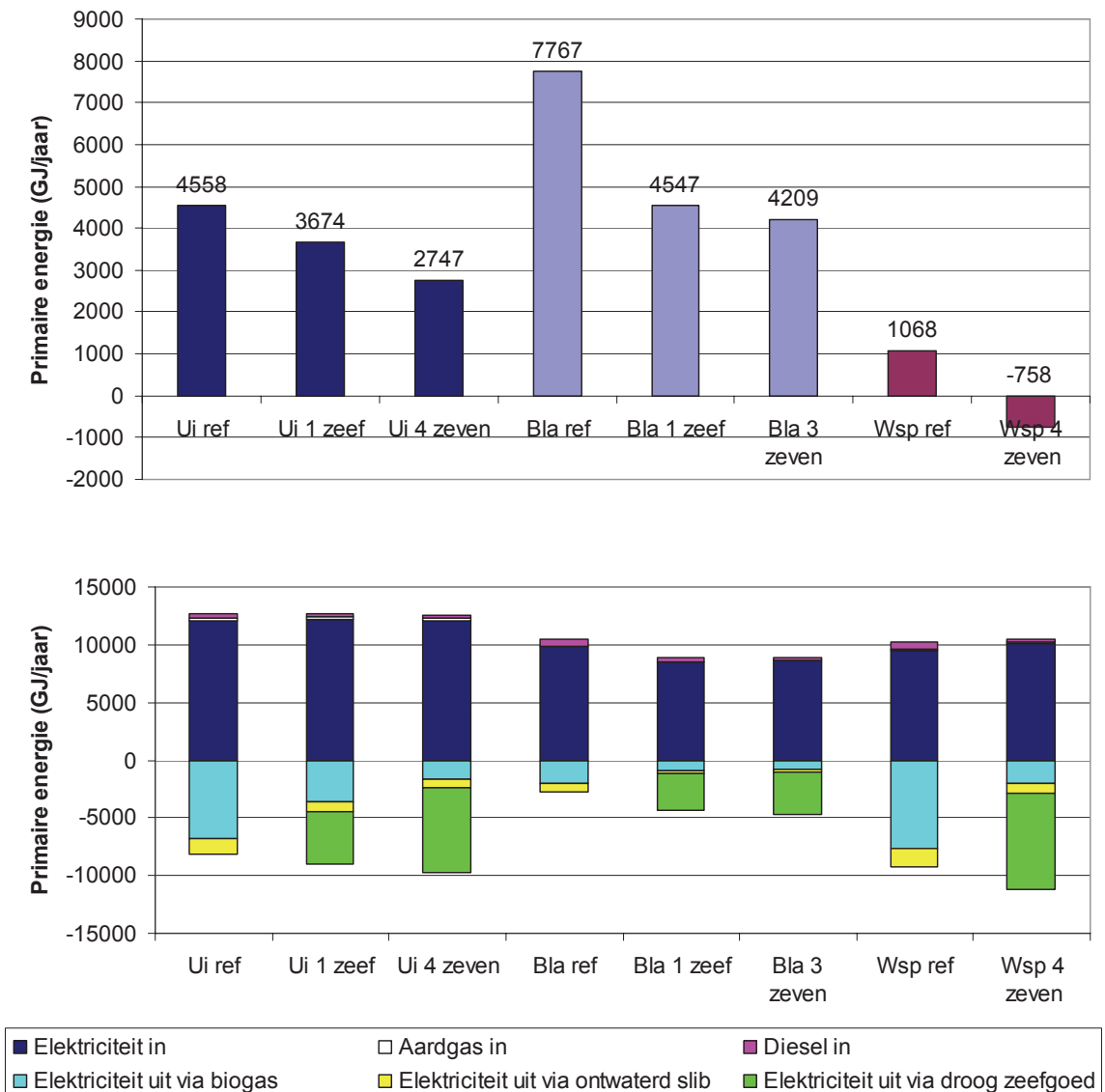
Verder blijkt de referentie situatie op rwzi Weesp energie te gaan opwekken indien de calorische waarde van het slib, het elektrisch rendement bij verbranding van biogas of het elektrisch rendement bij verbranding van ontwaterd slib de maximale waarde heeft.

In de gevoeligheidsanalyse is telkens slechts één waarde veranderd. Het kan dus zijn dat de bovenstaande voorwaarden voor Uithoorn en Weesp anders zijn wanneer er meerdere constanten veranderen. Deze gevoeligheidsanalyse is daarom slechts een indicatie. Er moet kritisch gekeken worden naar de werkelijke situatie.

8.5 CONCLUSIE

In onderstaande afbeeldingen is de uitkomst van de energie balans getoond voor de rwzi's Uithoorn, Blaricum en Weesp.

AFBEELDING 21 GRAFISCHE WEERGAVEN VAN DE PRIMAIRE ENERGIEBALANS VAN RWZI'S UITHOORN, BLARICUM EN WEESP



TABEL 47

DE BENODIGDE PRIMAIRE ENERGIE ALS PERCENTAGE VAN DE REFERENTIE

	Referentie	1 zeef	3 of 4 zeven
Uithoorn	100%	81%	60%
Blaricum	100%	59%	54%
Weesp	100%	Nvt	-71%

Uit bovenstaande afbeelding en tabel valt het volgende te concluderen:

- Bij toepassing van één zeef kan op rwzi Blaricum meer primaire energie bespaard worden dan op rwzi Uithoorn. Dit komt doordat er op rwzi Blaricum in de referentie situatie geen voorbezinktank aanwezig is en er daardoor met een zeef direct veel extra energie geproduceerd kan worden. Tegelijkertijd wordt er beluchttingsenergie bespaard. Op rwzi Uithoorn wordt wel een voorbezinktank vervangen, waardoor de winst relatief een stuk lager ligt. Bovendien kan één zeef op rwzi Blaricum 85% van het influentdebiet behandelen, op rwzi Uithoorn is dit percentage maar 61%.
- Bij het zeven van de volledige influentstroom (dus de toepassing van 3 of 4 zeven) wordt op rwzi Weesp zelfs primaire energie geproduceerd. Dit is opvallend, aangezien het proces van rwzi Uithoorn en Weesp vergelijkbaar is (beide hebben een voorbezinktank in de referentiesituatie). Voor het verschil zijn twee verklaringen:
 - Rwzi Weesp heeft een nieuw, energiezuinig ontwerp, terwijl rwzi Uithoorn met oudere, minder energiezuinige apparatuur werkt.
 - Bij de influent uitgangswaarden (en daarmee de slib- en zeefgoed productie) van rwzi Weesp is rekening gehouden met de toekomst en daarom zijn de waarden hoger dan die van rwzi Uithoorn, ondanks dat de zuivering van Uithoorn groter is dan Weesp (qua ontwerp aantal ve's). Hierdoor is de energieproductie ook hoger.
- Wat verder opvalt is dat rwzi Blaricum in alle situaties meer primaire energie nodig heeft dan Uithoorn en Weesp, ondanks dat Blaricum kleiner is. Blaricum heeft een belasting van 27.735 ve, Uithoorn van 55.314 ve en Weesp (ontwerp) 60.000 ve. Dit verschil wordt allereerst veroorzaakt door het ontbreken van een voorbezinktank in de referentiesituatie. Echter ook in de situaties met zeven is het meeste energie benodigd bij Blaricum. Hieruit kan wellicht geconcludeerd worden dat de primaire energiebalans van een zuivering gunstiger wordt naarmate de zuivering groter is, aangezien er dan meer elektriciteit opgewekt kan worden uit de uitgaande producten. Dit is duidelijk het geval bij het zeven van al het influent, de energiebalans voor respectievelijk Blaricum, Uithoorn en Weesp is dan 4209, 2747 en -758 GJ primair/jaar.

Uit de gevoeligheidsanalyse kan worden afgeleid dat de uitkomst van de primaire energiebalans voor rwzi Blaricum nauwelijks beïnvloedt kan worden met het veranderen van de aannamen. Voor rwzi Uithoorn en Weesp zijn de calorische waarde van het zeefgoed en het rendement bij verbranding van zeefgoed kritisch. De calorische waarde van het zeefgoed mag voor beide rwzi's niet lager worden dan 14 MJ/kg ds. Het elektrisch rendement mag niet lager worden dan 33% (voor rwzi Blaricum is dit 1%). Aangezien blijkt dat het belangrijk is dat er voldoende energie geproduceerd kan worden uit zeefgoed, is een aanbeveling voor vervolgonderzoek om de afzetroute van zeefgoed uitgebreider te onderzoeken.

9

CONCLUSIES

9.1 INLEIDING

Vastgesteld is dat er nagenoeg geen ervaring is met fijnzeven met een maaswijdte gelijk of minder dan 0,5 mm als voorzuivering van een biologische zuivering. Er is daarom geen informatie beschikbaar over het effect op de werking van het biologische zuiveringsproces. Zeven met een dergelijk geringe maaswijdte worden in het buitenland wel als mechanische zuivering op zich ingezet, zonder navolgende biologische zuivering.

Er ontbreekt bruikbare informatie over de deeltjesgrootte van het influent en de herkomst daarvan. Zo wordt er in influent een grote spreiding gerapporteerd in de fractie bezinkbaar materiaal ($> 100\mu\text{m}$). Gemiddeld is deze fractie circa 35% van de totale CZV in het influent. Cellulosevezels afkomstig van toiletpapier horen bij deze fractie, omdat deze een lengte hebben van circa 0,1 – 1 mm. Op basis van dit onderzoek wordt geconcludeerd dat ongeveer 30% - 50% van de zwevende stof in het influent cellulosevezel is.

In Noorwegen worden hoge rendementen op zwevende stof tot 80% gerapporteerd met fijnzeven met een maaswijdte van 0,35 mm. De ervaring daar is dat er een relatie bestaat tussen rendement, maaswijdte, hydraulische zeefbelasting ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$) en de afvalwatersamenstelling. Het effect van hoge rendementen op de samenstelling van het zeefgoed en de invloed op de verwerkbaarheid is onbekend.

Alleen gaas is geschikt om hoge rendementen te halen. Spleetjes of geperforeerd plaatmateriaal zijn om verschillende redenen niet bruikbaar. De openingen in het gaas mogen daarbij een maximale grootte van 0,5 mm hebben om effectief cellulosevezels af te vangen.

Spinselvorming wordt met een zeef tegengegaan. Volledige behandeling van RWA is daarvoor mogelijk niet noodzakelijk.

Zeefgoed laat zich eenvoudig ontwateren. Op basis van ervaringen in het buitenland en proeven bij Waternet blijkt door het zeefgoed te persen een droge stof percentage van 50% of hoger haalbaar is. Zeefgoed gaat tot nu toe meestal naar de stort /compostering of naar een verbrandingsinstallatie.

9.2 PROEFINSTALLATIE BLARICUM

Het gemeten zwevendestof verwijderingsrendement in Blaricum bij een maaswijdte gelijk of kleiner dan 0,5 m is vergelijkbaar met een voorbezinktank. Zo is een rendement gemeten van 40% voor zwevendestof met de bandzeef en 50% met de trommelzeef. Het verschil is waarschijnlijk debet aan de proefopstelling. Verondersteld wordt dat 50% zwevendestof verwijdering bij de gekozen procescondities in Blaricum haalbaar is.

De onderzochte zeven hebben beide probleemloos gefunctioneerd gedurende enkele maanden. De samenstelling van zeefgoed is bij beide zeven iets verschillend. Dit uit zich in de gehalten zware metalen en de gloeirest. De gehalten zware metalen zijn laag en voldoen nagenoeg aan het BOOM besluit.

9.3 CELLULOSE AFBRAAK IN RWZI

Zeefgoed bestaat voor ongeveer 80% uit cellulose. Dit is veel hoger dan in primair slib, waar maximaal 30% cellulose aanwezig is. Voor de rwzi Blaricum is vastgesteld dat ongeveer 32% van de zwevende stof in het influent bestaat uit cellulose.

In experimenten is gevonden dat circa 30% - 70% van de cellulose massa in een biologisch zuiveringsproces wordt afgebroken. Er is daarvoor een verblijftijd van circa 20 - 30 dagen noodzakelijk. De verwijderingsrendementen in de aeratietank en gisting zijn ongeveer gelijk. Voor de situatie van rwzi Blaricum, een laag belast omloopsysteem, is met twee experimenten een afbraak van cellulosevezels in actief slib gevonden van circa 50%.

Het bleek mogelijk de cellulose concentratie te meten in slib. In influent is de methode nog niet betrouwbaar. Uit metingen in primair slib en met een aanname van het gehalte in het influent blijkt dat het rendement van een voorbezinktank op cellulose gelijk is aan het rendement op zwevendestof. Dat betekent dat circa 50% van de cellulosevezels bezinken en de rest doorgaat naar het biologische proces. Van actief slib is het cellulose gehalte ongeveer 10 - 15% van de slibmassa. In uitgestist slib is het gemeten cellulosegehalte circa 15 - 23%.

Er zijn uit onderzoek aanwijzingen gekomen dat de verhouding inert en langzaam afbreekbare CZV van gezeefd influent gelijk is aan dat van voorbezonden water. Dit op basis van afbraakkinetiek en denitrificatie testen. Daarbij wordt de kanttekening gemaakt dat er maar een beperkt aantal metingen is gedaan en dat de resultaten geldig zijn voor de rwzi Blaricum (100% huishoudelijk afvalwater). Er is nader onderzoek noodzakelijk.

9.4 AFZET ZEEFGOED

Er zijn mogelijkheden voor hergebruik of verwerking als afval. Hergebruik is wellicht mogelijk door zeefgoed, al dan niet na drogen, als brandstof in te zetten. Een alternatief kan zijn om zeefgoed te verzuren en de vetzuren te winnen en nuttig in te zetten in de biologische zuivering. Dit kan bijvoorbeeld bij zandfilters of voor biologische defosfatering. Eventueel kunnen de gewonnen vetzuren ook extern verkocht worden. Productie van papier uit zeefgoed is technisch mogelijk, maar kent binnen de papierindustrie geen acceptatie.

Bij verwerking als afval zijn de kosten voor transport en afzet relatief bescheiden, omdat het zeefgoed tot circa 50% geperst kan worden. De verwerkingskosten zullen in de orde van € 20 - 100 per ton product liggen. Op rwzi Blaricum (27.0000 ve) kan bijvoorbeeld 360 ton zeefgoed (50%) per jaar geproduceerd worden. De jaarkosten voor afvalverwerking zijn dan € 7.200,= tot maximaal € 36.000,=. De afzetkosten zullen beter in beeld gebracht moeten worden om de haalbaarheid van een eventueel hergebruik vast te kunnen stellen.

De hoeveelheid zeefgoed die jaarlijks geproduceerd kan worden is relatief laag ten opzichte van andere biomassa reststromen. Dit kan een rem zijn op nuttige aanwending, omdat het voor afnemers mogelijk niet interessant is om een kleine stroom zeefgoed te verwerken. De (on)mogelijkheden moeten nog nader in beeld gebracht worden.

Op dit moment is de juridische status van zeefgoed niet duidelijk. Er zal in overleg met VROM bepaald moeten worden wat de classificatie van zeefgoed is. Roostergoed is nu bijvoorbeeld gevaarlijk afval. De classificatie zal helder moeten zijn voordat de verwerkingsroute bepaald kan worden.

9.5 KOSTEN BIJ TOEPASSING FIJNZEVEN

Voor de onderzochte locaties Blaricum zonder voorbezinktank en Uithoorn met voorbezinktank blijkt dat een fijnzeefinstallatie bij een realistisch gekozen uitgangspunten zich in circa 7 - 10 jaar terugverdient, onder voorwaarde dat ongeveer de droogweer aanvoerdebiet wordt gezeefd. Dit is mogelijk doordat de kosten voor transport en verwerking van zeefgoed veel lager zijn dan de huidige kosten voor verwerking en afvoer van primair- en secundair slib. Bij behandeling van het volledige aanvoerdebiet van de rwzi is er geen acceptabele terugverdientijd. De investering wordt dan te hoog ten opzichte van de kostenreductie in de slibverwerking. Van belang is wel hoe de slibontwateringskosten worden berekend. Indien alleen de operationele slibontwateringskosten worden meegenomen dan wordt de terugverdientijd bij het zeven van het droogweer aanvoerdebiet langer, voor Blaricum 9 jaar en voor Uithoorn 17 jaar.

Het blijkt dat in deze cases een rwzi zonder voorbezinktank een kortere terugverdientijd heeft dan een rwzi met voorbezinktank. De mogelijkheid dat er een acceptabele terugverdientijd is, geldt mogelijk voor veel meer rwzi's met of zonder bestaande voorbezinktank. Voorwaarde is wel dat er geen hoge lokale kosten zijn en de zeef hydraulisch inpasbaar is zonder dat er een extra opvoergemaal ten behoeve van de zeef nodig is.

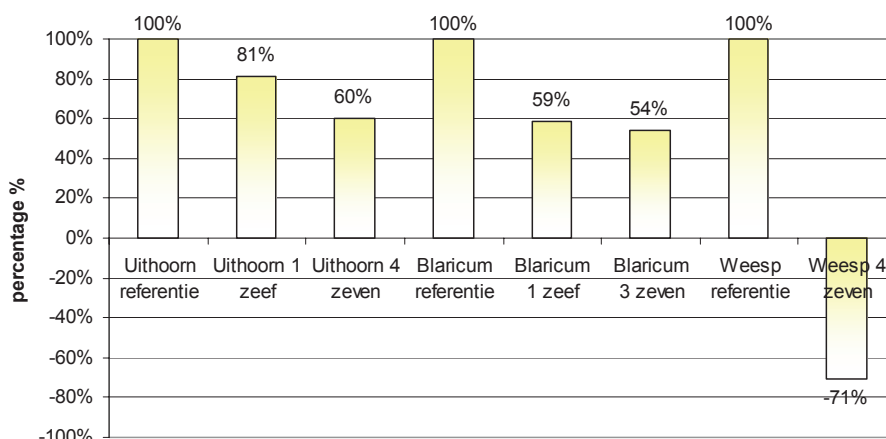
Bij een gevoeligheidsanalyse blijkt dat vooral de hydraulische belasting ($m^3/m^2.h$), en de surpluslibproductie na de zeef belangrijk zijn voor de terugverdientijd. De invloed van het drogestofrendement van een zeef, het drogestofgehalte van zeefgoed na persen en de kosten voor verwerking van het zeefgoed hebben minder invloed.

Voor de nieuwbouw van rwzi Weesp is een variantenstudie uitgevoerd waarbij een variant met een voorbezinktank is vergeleken met een variant met een zeefinstallatie. Daarbij wordt het volledige influentdebiet behandeld. Hieruit blijkt dat de investering niet onderscheidend is voor beide systemen. Het slib van Weesp wordt op rwzi Amsterdam West verwerkt, waardoor de sliblijn niet in de berekening is meegenomen. De jaarlijkse lasten zijn bij de variant met zeefinstallatie iets lager dan bij de variant met voorbezinktank door de lagere kosten van verwerking van zeefgoed.

9.6 ENERGIEBALANS BLARICUM, UITHOORN EN WEESP

In de onderstaande afbeelding is het resultaat van de berekeningen van de energiebalans te zien voor de rwzi's Blaricum zonder voorbezinktank, Uithoorn met voorbezinktank en nieuwbouw Weesp met voorbezinktank.

AFBEELDING 22 PERCENTAGE BENODIGDE ENERGIE TEN OPZICHTE VAN REFERENTIE SITUATIE



Het gehele zuiveringsproces inclusief slibontwatering en afzet van slib is voor de berekening meegenomen. Uitgangspunt was dat zeefgoed mechanisch tot 50% ontwaterd wordt en vervolgens verbrand mag worden in een biomassacentrale.

TABEL 48

PRIMAIRE ENERGIE BALANS

	Primaire energie	Referentie *	1 zeef	3 of 4 zeven **
Uithoorn	GJ/jaar	4558	3674	2747
Blaricum	GJ/jaar	7767	4547	4209
Weesp	GJ/jaar	1068	Nvt	-758

* De referentie van Uithoorn en Weesp is een voorbezinktank, op Blaricum is er geen voorbezinktank en gaat influent na roostergoedverwijdering rechtstreeks naar de AT

** Blaricum 3 zeven, Uithoorn en Weesp 4 zeven.

Bij de drie rwzi's kan geconcludeerd worden dat er meer energie bespaard kan worden naarmate een groter gedeelte van het influent gezeefd wordt. Het lijkt erop - onder voorwaarde dat verbranden van zeefgoed mogelijk is - dat fijnzeven vanuit overwegingen van energie een alternatief vormen voor voorbezinktanks.

Bij Blaricum kan met toepassing van één zeef meer energie bespaard worden dan op rwzi Uithoorn, aangezien er in de referentie situatie van Blaricum geen voorbezinktank is. Het verschil tussen één en drie of vier fijnzeven is relatief klein, maar dat kan verklaard worden met het feit dat één zeef al een flink deel van het debiet behandelt.

Bij zeven van het volledige debiet op rwzi Weesp kan zelfs energie worden geproduceerd (te zien aan het negatieve getal). Dit kan verklaard worden doordat er nieuwe energiezuinige apparatuur wordt toegepast en doordat er bij de influentuitgangswaarden rekening is gehouden met toekomstige vrachten. Hierdoor is de slib- en zeefgoedproductie relatief hoog en de energieproductie dus ook.

Er is een gevoeligheidsanalyse gedaan naar de gemaakte aannamen in de energiebalans. Hieruit blijkt (voor een situatie waarbij een voorbezinktank door een fijnzeef wordt vervangen) dat het elektrisch rendement bij de verbranding van het zeefgoed een belangrijke uitgangswaarde is; deze moet minimaal 33% zijn. Het is daarom een aanbeveling voor vervolgonderzoek om de afzetroute van zeefgoed uitgebreider te bekijken, zodat zeker wordt dat er voldoende energie opgewekt kan worden.

Op een rwzi waar nog geen voorbezinktank aanwezig is, zorgt toepassen van fijnzeven vrijwel altijd voor energiebesparing, alleen als het elektrische rendement lager is dan 1% is dit niet het geval.

10

AANBEVELINGEN

10.1 NADER ONDERZOEK

De volgende onderdelen zouden nader onderzocht kunnen worden om de mogelijkheden en de risico's van fijnzeven beter in kaart te brengen:

Zeef techniek

Er is aandacht nodig voor de keuze van het type zeef. Er zijn uit de MBR wereld veel operationele problemen met zeven bekend:

- verstopping door vet en papier
- te lage capaciteit bij maximale hydraulische doorzet
- overstromingen of bypass bij de 'first flush'

Daarbij is de ervaring met MBR's niet volledig bruikbaar, omdat daar met een grovere maaswijdte gezeefd wordt (0,8 – 1,0 mm in plaats van < 0,5 mm). Tevens is voor deze toepassing 100% lek dicht niet noodzakelijk en is een sporadische bypass toelaatbaar. Er zouden bij voorkeur verschillende soorten zeven naast elkaar getest moeten worden.

Bij leveranciers is een ontwikkelingstraject nodig in de richting van zeven met een grotere hydraulische capaciteit van bijvoorbeeld 1000 – 4000 m³/h. Technisch lijkt er geen reden te zijn waardoor dit niet mogelijk is. Alleen, zulke zeven bestaan er voor afvalwater nog niet. Daarbij moet er aandacht zijn voor het energieverbruik van de zeef en de benodigde hoeveelheid water of lucht nodig voor reiniging van de zeefband of zeeftrommel.

Leveranciers zouden eveneens hun ontwikkeling moeten richten op het persen van zeefgoed. Indien op labschaal > 60% drogestof haalbaar is dan is de uitdaging om door persen van zeefgoed zo hoog mogelijk te komen.

SCHAALGROOTTE RWZI

Een zeefinstallatie kan worden toegepast bij een kleine en middelgrote rwzi's, omdat er geen afhankelijkheid is van de schaalgrootte van de rwzi. Dit in tegenstelling tot een voorbezinktank en gisting die onder de 100.000 ve meestal niet toegepast worden. Om de technische ontwikkeling van zeven te stimuleren kan in beeld gebracht kunnen worden wat het marktpotentieel is indien bijvoorbeeld vanwege de MJA3 (energie) zeven grootschalig worden toegepast.

Er zal ook een groot aantal rwzi's zijn die hydraulisch of biologisch overbelast zijn. Inzet van een zeef kan een oplossing zijn om aan de effluentkwaliteit te kunnen blijven voldoen.

Onderzocht kan worden of bij grotere rwzi's zeven ook toegepast kunnen worden. Een zuivering als Amsterdam West zou ongeveer 75 bandzeven nodig hebben voor het volledige debiet. Voor de DWA zijn er 25 zeven noodzakelijk. Dit lijkt minder aantrekkelijk, maar is bij voldoende financiële en energetische voordelen niet op voorhand uit te sluiten. De relatie tussen schaalgrootte en kosten zou inzichtelijk moeten worden.

VERWERKING ZEEFGOED

Een aantal verwerkingsmogelijkheden voor zeefgoed zijn in deze rapportage in beeld gebracht.

Wellicht zijn interessante combinaties van ontwaterd slib en zeefgoed mogelijk. "Eenvoudig" opmengen geeft een drogestof van 30% - 40% van het mengsel.

Vanuit de cradle to cradle gedachte lijkt papierproductie uit zeefgoed een prima oplossing, maatschappelijke acceptatie ontbreekt echter hiervoor. Opwerken van zeefgoed zou een goed alternatief kunnen zijn. Productie van vetzuur, bio-ethanol of bioplastisch is een duurzamere oplossing dan zeefgoed te verbranden. Wellicht dat aangesloten kan worden bij andere initiatieven conform de bio-based economy gedachte. Reststromen van biomassa worden in Nederland momenteel op verschillende locaties onderzocht op nuttige aanwending. Verschillende waterschappen zijn hierbij betrokken voor de verwerking van ontwaterd slib.

Verbranden van gedroogd zeefgoed kan juridische problemen geven vanwege nog onbekende classificatie. Dit is een aandachtspunt dat in landelijk verband opgepakt kan worden, vooral omdat uit de energiebalans is gekomen dat er voldoende energie opgewekt moet worden uit zeefgoed om energievoordeel te hebben ten opzichte van een voorbezinktank.

Met zeefgoed wordt ook zand verwijderd. Een eerste indruk is dat dit aanzienlijke hoeveelheden zijn. Immers zeefgoed heeft een as-gehalte van 4% tot 8%. Een snelle indicatieve berekening laat zien dat de afgevangen hoeveelheid in de orde is van een zandvangster. De vraag is wat de consequentie is voor de verdere verwerking van zeefgoed en de technische werking van een pers.

COMBINATIE ZEEF EN VOORBEZINKTANK

Het is denkbaar bij rwzi's met een bestaande voorbezinktank een zeef hier in serie bij te zetten. De zeef verwijdert selectief cellulose terwijl de voorbezinktank dat niet doet. De combinatie van het gebruik van een fijnzeef met een voorbezinktank leidt mogelijk tot een heel hoog verwijderingsrendement. Onderstaand rekensommetje illustreert het mogelijke effect.

- Influent 100 kg zwevendestof, waarvan 40 kg cellulose en 60 kg overig.
- Zeef 50% rendement op zwevende stof betekent 10 kg overig en 40 kg cellulose (cellulose wordt verondersteld volledig afgescheiden te zijn in een zeef).
- Voorbezinktank: een deel van de zwevendestof na de zeef kan waarschijnlijk nog wel afgescheiden worden. Dit is circa 25 kg van de aangevoerde SS in het influent.

Het gezamenlijk rendement van zeef en voorbezinktank zal dan circa 75% SS zijn. Dit is ongeveer dezelfde waarde als met een voorprecipitatie haalbaar is, maar dan zonder chemicaliën. De energiebalans van een rwzi kan hierdoor sterk verbeteren. Ook hergebruik opties van zeefgoed kunnen interessanter zijn dan de toename van primair slib bij bijvoorbeeld een voorprecipitatie. In serie zetten van zeef en voorbezinktank verdient nader onderzoek.

Overigens wordt in Noorwegen geclaimd dat met een zeef een zwevende stof rendement van 70% of hoger mogelijk is door koefiltratie. In dat geval zal serie plaatsen van een zeef en voorbezinktank minder meerwaarde hebben. Het kan echter ook zijn dat het aantal zeven dan zodanig hoog moet zijn (doordat een lage hydraulische belasting nodig is) dat een dergelijke koefiltratie niet realistisch is.

COMBINATIE ZEEF / SLIBRECIRCULATIE EN SPUISLIB VERWIJDERING

Het is denkbaar dat samen met het zeefgoed ook spuislib of een deel daarvan door middel van een geringe koekfiltratie kan worden afgevangen. Daartoe zou het spuislib, of een deel daarvan, tijdens DWA met de zeef worden verwijderd. In hoeverre dit een stabiele procesvoering geeft zou onderzocht kunnen worden.

Een zeef voor alleen de DWA capaciteit zou mogelijk ook te benutten zijn om, op momenten met lage aanvoer zoals in de nacht, slib over de zeef te recirculeren om papier en ander materiaal dat via de bypass langs de zeef gegaan is alsnog te verwijderen. Op deze wijze wordt mogelijk via een omweg toch de RWA aanvoer gezeefd.

MJA3-ENERGIE

Er kan een impact zijn van influent zeven op de MJA3-energie. Door inzet van zeven wordt in de rekenvoorbeelden een besparing van minstens 40% gehaald op voorwaarde dat de energie-inhoud van zeefgoed benut kan worden. In bepaalde gevallen (nieuwe, energiezuinige zuiveringen met een hoge slib/zeefgoed productie) kan zelfs energie geproduceerd worden. Kostentechnisch is bij een bestaande rwzi het zeven van het volledige debiet mogelijk niet interessant, maar vanuit overwegingen van energie besparing kan de conclusie anders zijn. Extern opgewekte energie zou bij de MJA-energie daarbij toegerekend moeten worden aan de rwzi. Dit zal een belangrijk aandachtspunt zijn.

10.2 PRAKTIJKINSTALLATIE

Pas wanneer een praktijkinstallatie in bedrijf is, kunnen parameters zoals slibproductie en invloed op de inerte fractie van het slib en het effect op de werking van een rwzi echt worden bepaald. In hoeverre cellulose bijvoorbeeld bijdraagt aan de denitrificatie is nu nog niet duidelijk. Rwzi's waar een zeef geplaatst wordt, kunnen bedreven worden met een lagere slibbelasting, de effecten op de effluent kwaliteit en slibproductie zijn onduidelijk.

De onderzoeksvragen op lange termijn richten zich op de volgende punten:

- de dimensioneringsgrondslagen van een rwzi met een zeefinstallatie
- nutriëntenverwijdering
- vergisten van het resterende surplusslib, effect op methaangehalte biogas
- ontwateren van surplusslib of uitgegist slib zónder papiervezels
- zware metalen gehalte ontwaterd slib indien in plaats van een voorbezinking een zeef wordt toegepast. Immers een deel van de zware metalen krijgt een andere "uitgang".
- voordelen in operationele zin bij de verbranding van ontwaterd slib. Nu worden er bijvoorbeeld door het AEB (Afval Energie Bedrijf) in Amsterdam problemen gemeld met verstoppingen.

Bij een positief resultaat zal de techniek grootschalige toepassing kunnen krijgen bij rwzi's binnen en buiten Nederland. Dit is in eerste instantie vooral te verwachten bij kleinere tot middelgrootte rwzi's. Het is ook mogelijk dat de techniek ook bij grotere rwzi's succesvol zou kunnen zijn. Een bijzonder aspect is dat er geen gevoeligheid is voor schaalgrootte zoals dat bij voorbezinking en gistingstanks het geval is. De toepassing van fijnzeven kan mogelijk leiden tot een efficiëntere voorbehandeling van het afvalwater.

Een zeefinstallatie is, afhankelijk van de lokale omstandigheden, door een geringere ruimte behoefte, eenvoudiger in te passen in een rwzi dan een voorbezinktank. De rwzi Blaricum beschikt november 2010 over een praktijk zeefinstallatie. Wenselijk zou zijn om ook proefnemingen te doen met een rwzi waar twee volledig gescheiden straten aanwezig zijn. Onderzoeksprojecten moeten, bij voorkeur in STOWA verband, gecoördineerd worden.

BIJLAGE 1

REFERENTIES

Friedler E., Brown M.D., Butler D. (1996) A study of wc paper derived sewer solids. Wat. Sci. Tech. Vol. 33, No 9, pp 17-24.

Franz-Bernd Frechen, Wernfried Schier et .al. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2008 (55) Nr 1. pg 39-44.

Marani D., Renzi V., Ramadori R., Bragulia C.M.(2004) Water science and technology Vol 50 No. 12 pp. 79 – 86.

B.Rusten et al 2006, Water science & technology Vol 54 No 10 pp 31 -38.

Wernfried Schier, FranBernd Frechen, International conference Amsterdam Rai Netherlands, 1st and 2nd October 2008.

Sophonsii C., Morgenroth E., (2004) Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters. Chemosphere NO. 55 pp. 691 – 703.

STOWA 2005-26 Slibstrategiestudie

STOWA 2006-05 MBR rapport Varsseveld

STOWA 2006-13 Geavanceerde voorzuivering van afvalwater;l praktijktoepassing op de rwzi Amstelveen

STOWA 2006-16 MBR proefinstallatie rwzi Hilversum

STOWA 2007-25 Inventarisatie roosters en zeven in de communale afvalwaterbehandeling

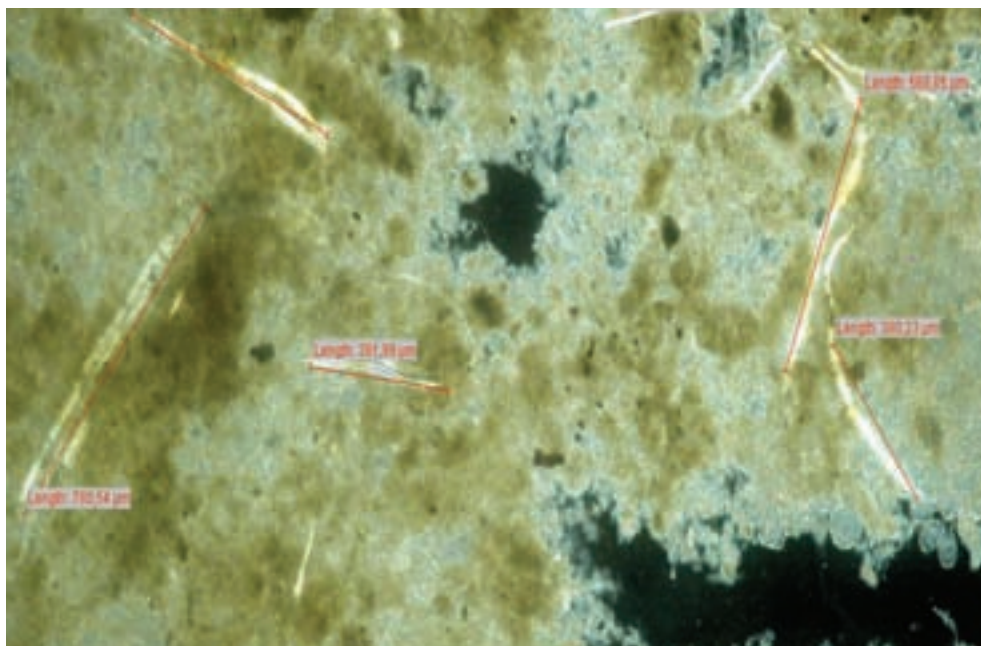
BIJLAGE 2

VEZELLENGTES EN SLIBBEELD MET VEZELS

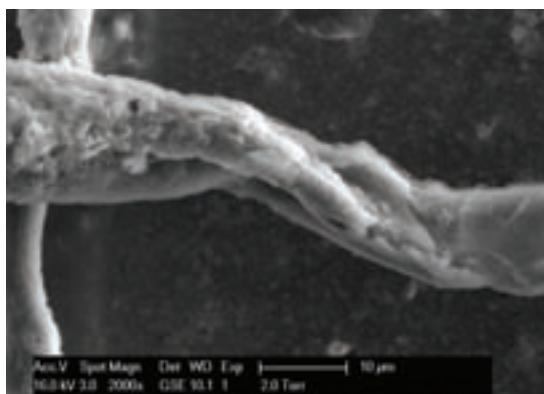
Van slib en zeefgoed is de vezellengte bepaald. In onderstaande afbeelding 23 is een voorbeeld van slib opgenomen. De lengte varieert van 0,1 tot 10 mm. Nader onderzoek wijst uit dat ook in primair slib, actief slib en uitgegist slib vergelijkbare lengtes worden aangetroffen (afbeelding 24).

Nader onderzoek met een elektronenmicroscop ESEM van de TU-Delft leert dat er aangroei van micro-organismen aan de vezel plaatsvindt (zie 24 en 25). De dikte van de vezel wordt gaandeweg aangetast en niet zozeer de lengte. In afbeelding 26 en 27 zijn een microscopische foto's van actief slib van de rwzi Blaricum te zien. Met gepolariseerd licht worden de vezels zichtbaar gemaakt.

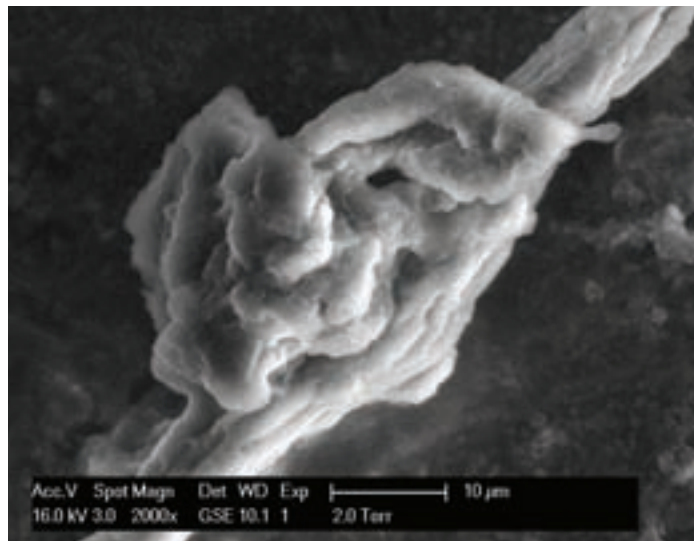
AFBEELDING 23 VEZELLENGTE ACTIEF SLIB RWZI AMSTERDAM WEST (NA VOORBEZINKTANK)



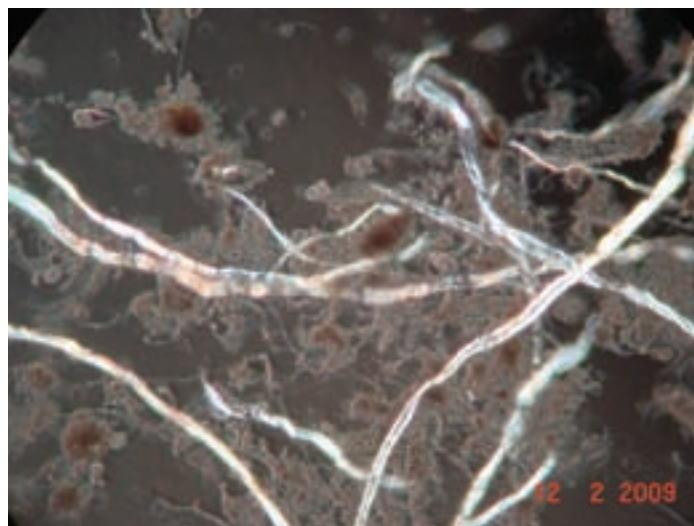
AFBEELDING 24 ESEM OPNAME VAN EEN CELLULOSE VEZEL IN UITGEGIST SLIB RWZI AMSTERDAM WEST



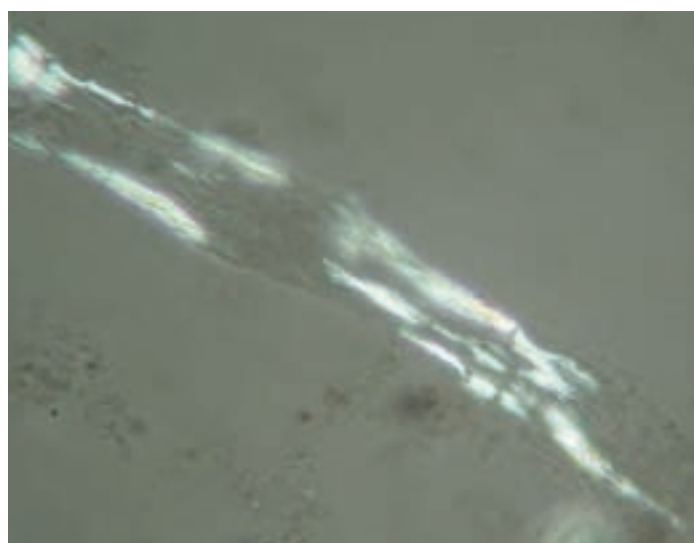
AFBEELDING 25 ESEM OPNAME UITGEGIST SLIB RWZI AMSTERDAM WEST, TE ZIEN VALT AANGROEI OP PAPIERVEZEL



AFBEELDING 26 PAPIERVEZELS IN ACTIEF SLIB VAN DE RWZI BLARICUM FOTO MBV GEPOLARISEERD LICHT



AFBEELDING 27 PAPIERVEZEL GEDEELTELIJK AFGEBROKEN FOTO MBV GEPOLARISEERD LICHT



BIJLAGE 3

PROGRAMMA VAN EISEN

PRAKTIJKINSTALLATIE VOOR HET ZEVEN

VAN AFVALWATER

ALGEMEEN

Op de rwzi Blaricum en / of Uithoorn zal mogelijk een zeefinstallatie worden gerealiseerd voor het zeven van afvalwater. Er zal voor vier situaties een kostenberekening gemaakt worden. Voor beide locaties, volledig RWA debiet en alleen DWA debiet.

- Geen reservestelling
- Het perswater gaat retour naar het influent van de rwzi.
- Een beperkte bypass van influent van de zeefinstallatie is toegestaan.
- Het behandeld debiet moet gemeten en bemonsterd worden.
- Afgezogen lucht behandelen in bestaand luchtafgassysteem
- Verbruiken elektra en water voor zeefinstallaties moet geregistreerd kunnen worden.
- Er wordt voorzien in een eenvoudig bouwwerk.
- Storingsmeldingen naar het scada systeem van de rwzi.
- Leverancier: Salsnes (Noorwegen)

Type SF 6000

Maaswijdte: 0,35 mm

Afmetingen: l= 2,6m, b = 2,7 m, h = 1,6 m

ONTWERP UITGANGSPUNTEN BLARICUM

Parameter	eenheid	Ontwerp fijnzeef	
		RWA	DWA +
Max capaciteit	m ³ /h	1600	500
aantal	n	3	1
Container ruimte	m ³	2 x 30	30
opvoergemaal	m ³ /h	1600	nvt

ONTWERP UITGANGSPUNTEN UITHOORN

Parameter	eenheid	Ontwerp fijnzeef	
		RWA	DWA
Max capaciteit	m ³ /h	2250	500
aantal	n	4	1
Container ruimte	m ³	2 x 30	30
opvoergemaal	m ³ /h	nvt	nvt

BIJLAGE 4

INVESTERING BLARICUM EN UITHOORN

Rwzi Blaricum Salsness Bandfilters Fullscale

	Variant A	Variant B
Ontwerp uitgangspunten	RWA zeven, met drie zeven, overstort/bypass, lokale besturing, eenvoudige bouw met staalconstructie, containers buiten	Alleen DWA met 1 bandfilter opgesteld in gebouw
aantal Bandfilters	3	1
aantal perscontainers	2	1
Zie PvE Chris Ruiken		
Capaciteit	1600 m3/h	500 m3/h
ondergrondseleidingwerk	HPE DN 600	HPE DN 400
Pompinstallatie	ja, in pompkelder	vrijverval vanaf ZV
ruimte behoefte	l*b*h	l*b*h
pompkelder	8 * 5 * 8	nvt
bandfilter ruimte	14 * 5 * 8	6 * 5
schakelruimte	4*7*4	3*5*4
container opstelplaats	14 * 8	10*8
CT raming exclusief	€ 379.045	€ 141.029
WTB raming exclusief	€ 700.900	€ 259.000
E raming exclusief	€ 393.000	€ 121.000
Totaal exclusief	€ 1.472.945	€ 521.029
engineering 15 %	€ 220.942	€ 78.154
onvoorzien %	€ 294.589	€ 104.206
BTW 19 %	€ 279.860	€ 98.996
Totaal investeringskosten	€ 2.268.335	€ 802.385

Rwzi Uithoorn Salsness Bandfilters Fullscale

	Variant A	Variant B
Ontwerp uitgangspunten	RWA zeven, met vier zeven, overstort/bypass, lokale besturing, buiten opgesteld in de Vbt 2 vlakke vloer, twee containers buiten	Alleen DWA met 1 bandfilter opgesteld in de buitenlucht
aantal Bandfilters	4	1
aantal perscontainers	2	1
Zie PvE Chris Ruiken		
Capaciteit	2250 m3/h	550 m3/h
ondergrondseleidingwerk		
toevoerleiding	HPE DN 600	HPE DN 400
afvoer	DN 900	DN 400
pompinstallatie	beschikbaar	beschikbaar
CT raming exclusief	€ 143.464	€ 73.750
WTB raming exclusief	€ 732.900	€ 236.000
E raming exclusief	€ 127.000	€ 66.000
Totaal exclusief	€ 1.003.364	€ 375.750
engineering 15 %	€ 150.505	€ 56.363
onvoorzien 10 %	€ 100.336	€ 37.575
BTW 19 %	€ 190.639	€ 71.393
Totaal investeringskosten	€ 1.444.844	€ 541.080

BIJLAGE 5

CELLULOSE METEN

TOELICHTING

Onderstaand is beschreven hoe de cellulose concentratiemetingen, zoals deze in dit rapport vermeld staan, in slib zijn uitgevoerd. Echter, voorschrijdend inzicht leert dat deze analyse-methode aanpassing behoeft. De resultaten die verkregen zijn hebben wel indicatieve waarde. Aangezien de analysetechniek bij Waternet en Waterproef nog in ontwikkeling is, net als de cellulose concentratiemetingen in influent, kan de analysemethode nog niet worden opgenomen. Onderzoekers die cellulosemetingen willen doen wordt geadviseerd het onderzoek van Waternet naar een betrouwbare analyse methode nog even af te wachten.

TECHNIEK VAN CELLULOSE METINGEN

Er is geen gestandaardiseerde methode om de hoeveelheid cellulosevezels (papiervezels) in zuiveringsslib kwantitatief vast te stellen. Onderzoek naar de afbreekbaarheid van cellulose in afvalwaterzuiveringsinstallaties is vaak in situ uitgevoerd, waar de vezels eenvoudig te scheiden waren van de slibmassa en een dergelijke methode niet nodig was. De samenstelling van zuiveringsslib is in beperkte mate onderzocht en in sommige bepalingen is cellulose ook meegenomen als een van de componenten. In de meeste gevallen is cellulose echter geschat aan de hand van het totaal koolhydraten of gecombineerd met andere componenten bepaald, zoals lignine (Pavlostathis & Gilardo Gomez, 1991). Deze metingen zijn dus onnauwkeurig en onbetrouwbaar. In andere gevallen zijn methoden gebruikt gebaseerd op hetzelfde principe als in de hier gepresenteerde methode (Honda et al. 2002). Op lab schaal is er veel onderzoek gedaan naar de biologische afbraak van cellulose. In deze experimenten is cellulose het belangrijkste, en op biomassa na het enige, bestandsdeel in de oplossing. Veel methoden die beschreven zijn in literatuur zijn erop gericht de concentratie cellulose in deze oplossingen te bepalen. In deze methoden worden bijvoorbeeld de cellen gelyseerd met formaat (Weimer & Zeikus, 1977) of NaOH (Verachtert et al. 1982) en wordt de hoeveelheid cellulose vervolgens bepaald door middel van een drogestof bepaling. In andere gevallen wordt de hoeveelheid koolwaterstoffen bepaald door middel van een anthrone kleuring (Hu et al. 2004; Pavlostathis et al. 1990). Geen van deze methoden is geschikt om de concentratie cellulose in zuiveringsslib te bepalen vanwege de grote hoeveelheid en gevarieerde samenstelling van organische verontreinigingen en asrest. Updegraff heeft een methode voorgesteld om concentraties cellulose te meten in monsters met dergelijke verontreinigingen (Updegraff 1969). Ondanks de toepasbaarheid wordt deze methode toch maar in enkele gevallen gebruikt (Morgavi et al. 1994). Aangezien Updegraff uitgaat van monsters met een groter aandeel cellulose (meer dan 50%) en een hogere concentratie (5-20 g/L) dan zuiveringsslib is de methode van Updegraff herzien en aangepast om toegepast te kunnen worden voor zuiveringsslib.

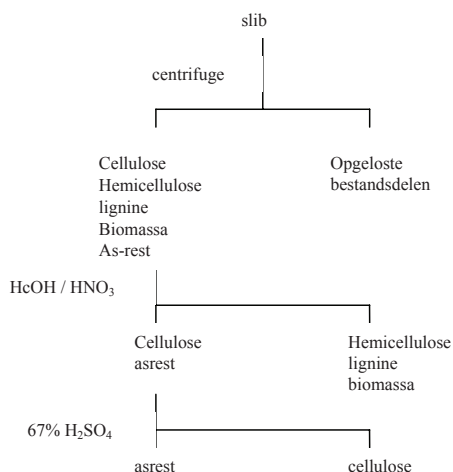
METHODE

De gepresenteerde methode bestaat uit drie delen: 1) verwijdering van organische verontreinigingen 2) oplossen cellulose vezels 3) spectrofotometrische bepaling van de cellulose concentratie (tabel 49; afbeelding 28).

TABEL 49 DE AANGEPASTE METHODE EN ORIGINELE METHODE VAN UPDEGRAFF (1969)

	Eigen methode	Updegraff (1969)
Voor behandeling van monster	<ul style="list-style-type: none"> • Homogeniseer het monster en doe 2 tot 10 ml in een centrifugebuis (afhankelijk van droge stof concentratie). • Centrifugeer en verwijder supernatant. • Voeg langzaam 10 ml 1:10 65% salpeterzuur/azijnzuur anhydride toe (maak dagelijks vers) en vortex. Plaats 30 minuten in waterbad van 100°C met een metalen schuif over de buis om verdamping te voorkomen. • Koel af, centrifugeer, verwijder supernatant en spoel met water (2x) en verwijder water (centrifuge). 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogeniseer het monster en doe 10 ml in een centrifugebuis. • Centrifugeer en verwijder supernatant • Voeg 3 ml 1:10 geconcentreerd salpeterzuur: 80% azijnzuur toe en vortex. Plaats 30 minuten in kokend waterbad. • Centrifugeer en verwijder supernatant en was met water (1x) en verwijder water (centrifuge).
Reactie met cellulose	<ul style="list-style-type: none"> • Voeg 10 ml 67% H₂SO₄ toe en vortex. Let op dat er geen materiaal aan de buis kleeft. Laat 1 uur staan bij kamertemperatuur. • Centrifugeer en verdun supernatant 5 tot 20x (afhankelijk van concentratie cellulose). Indien concentratie cellulose 2 g/L is moet er 20x verdund worden. • Neem 5 ml van de verdunning en voeg langzaam 10 ml van een 2 g/L anthrone in geconcentreerd H₂SO₄ toe (maak vers) terwijl de buis gekoeld wordt (koud water/ijs). Voorkom dat de oplossing teveel opwarmt door de verdunning van het H₂SO₄! • Plaats 16 minuten in waterbad van 100°C met metalen schuif over de buis. • Koel onmiddellijk af door in koud water/ijs te zetten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Voeg 10 ml 67% H₂SO₄ toe en vortex en laat 1 uur staan. • Verdun 500x • Koel de monsters af in ijs. • Voeg 10 ml, 2 g/L anthrone in geconcentreerd H₂SO₄ toe. Vortex en koel af in ijs. • Zet in een kokend waterbad voor 16 minuten met een afsluiting op de buis. • Koel de buis af tot kamertemperatuur.
Analyse Verwerken resultaten	<ul style="list-style-type: none"> • Vortex monster. • Lees af in spectrofotometer bij 620 nm. Gebruik 5 ml water met 10 ml Anthrone oplossing als blanco. • Vermenigvuldig gemeten extinctie met de gebruikte verdunning na de H₂SO₄ reactie. • Vergelijk met ijklijn gemaakt van cellulose in water. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lees af in spectrofotometer bij 620 nm. Gebruik 5 ml water met 10 ml Anthrone oplossing als blanco. • Vergelijk met een ijklijn.
Opmerkingen	Een cellulose concentratie van 3,5 g/L geeft een extinctie van 1-1,2 ten opzichte van de blanco bij een cuvet met een lichtlengte van 10mm.	Een starthoeveelheid van 100 µg cellulose geeft een extinctie van 0,34-0,37 bij een cuvet met lichtlengte van 12 mm. Er wordt uitgegaan van een beginconcentratie van 5 tot 20 g/L in het monster.

AFBEELDING 28 ANALYSE METHODE VOOR CELLULOSE IN ZUIVERINGSSLIB



BIJLAGE

TABELLEN UIT HOOFDSTUK 3

TABEL 50 BANDZEEF (SALSNES) ZEEFGOED

Elem Code	IR	GR	CZV	KjN	P	Hg	Zn	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	soortelijke massa
Eenheid	% ng	% dg	g/kg O2dg	g/kg N dg	g/kg P dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	g/l
22-09-08	31,2	5,6	1148	19,9	3,2									560
25-09-08	28,5	5,7	1432	9,2	1,9	0,255	181	0,59	0,12	3,07	50,2	1,93	15,9	648
30-09-08	28,0	7,8	1247	11,8	2,8									760
2-10-08	29,7	15,1	1170	9,9	2,6	0,091	649	0	0,26	6,86	81,7	5,17	212	499
7-10-08	26,9	7,5	1469	14,4	2,7									567
9-10-08	28,7	7,0	1233	13,9	2,4	0,09	248	0	0,16	3,31	46,9	2,36	35,9	615
14-10-08	26,5	6,2	1760	8,0	2,3									581
16-10-08	24,6	12,3		12,1	5,0	0,37	606	0,17	0,35	7,9	128	5,53	54,3	
20-10-08	21,1	6,5		20,5	3,1									
23-10-08	24,5	13,6		16,6	4,7	0,384	760	0,83	0,4	9,64	135	8,16	114	
28-10-08	27,6	8,0		14,4	2,7									
30-10-08	27,0	8,7		10,9	2,9	0,304	203	0,12	0,09	2,22	46,1	2,21	13,6	
4-11-08	17,6	6,1		14,6	3,4									
6-11-08	23,1	4,8		10,7	2,5	0,103	149	0	0	2,27	48,6	1,53	9,96	
10-11-08	25,9	4,5		8,8	2,5									
13-11-08	21,5	9,7		17,8	4,2	0,142	428	2,51	0,18	6,72	63,2	4,02	51	
17-11-08	21,3	4,9		9,7	2,7									
19-11-08	19,8	7,0		12,1	3,6	0,14	495	0	0	9,27	118	5,99	45,2	
gemiddelde	25,2	7,8	1351	13,1	3,1	0,21	413,22	0,47	0,17	5,70	79,74	4,10	61,32	604

TABEL 51 TROMMELZEEF (HUBER) ZEEFGOED

Elem Code	IR	GR	CZV	KjN	P	Hg	Zn	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	soortelijke massa
Eenheid	% ng	% dg	g/kg O2dg	g/kg N dg	g/kg P dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	mg/kg dg	g/l
22-09-08	21,26	4,136	1396	4,951	1,497									645
25-09-08	24,93	2,868	1263	5,312	1,511	0,047	104	0	0	3,01	33,3	1,7	10,3	524
30-09-08	28,18	2,135	1104	5,388	0,952									561
2-10-08	27,4	8,1	1275	26,6	5,4	0,109	391	0,72	0,12	6,41	71,6	3,86	68,8	589
7-10-08	31,1	4,8	1366	6,4	1,3									430
9-10-08	29,3	3,3	1179	6,7	1,4	0,338	218	0	0,01	3,54	44,1	2,24	19,6	630
14-10-08	27,2	4,6	1024	4,1	1,8									502
16-10-08	27,0	7,3		8,6	2,6	0,136	280	1,04	0,24	6,52	59,8	3,67	27,4	
20-10-08	28,2	2,6		4,2	0,9									
23-10-08	30,1	3,5		5,6	1,7	0,122	172	1,36	0	4,4	26,4	2,48	18,4	
gemiddeld	27,5	4,3	1230	7,8	1,9	0,1504	233	0,624	0,074	4,776	47,04	2,79	28,9	554

TABEL 52

GEHALTE P EN N IN ZEEFGOED

Salsnes			Huber		
Elem Code	KjN	P	Elem Code	KjN	P
Eenheid	g/kg N dg	g/kg P dg	Eenheid	g/kg N dg	g/kg P dg
22-09-08	19,9	3,2	22-09-08	5,0	1,5
25-09-08	9,2	1,9	25-09-08	5,3	1,5
30-09-08	11,8	2,8	30-09-08	5,4	1,0
2-10-08	9,9	2,6	2-10-08	26,6	5,4
7-10-08	14,4	2,7	7-10-08	6,4	1,3
9-10-08	13,9	2,4	9-10-08	6,7	1,4
14-10-08	8,0	2,3	14-10-08	4,1	1,8
16-10-08	12,1	5,0	16-10-08	8,6	2,6
20-10-08	20,5	3,1	20-10-08	4,2	0,9
23-10-08	16,6	4,7	23-10-08	5,6	1,7
28-10-08	14,4	2,7	gemiddeld	7,8	1,9
30-10-08	10,9	2,9			
4-11-08	14,6	3,4			
6-11-08	10,7	2,5			
10-11-08	8,8	2,5			
13-11-08	17,8	4,2			
17-11-08	9,7	2,7			
19-11-08	12,1	3,6			
gemiddelde	13,1	3,1			

NB: dg = ds

BIJLAGE 7

CELLULOSE AFBRAAK IN EEN RWZI

Inhoud

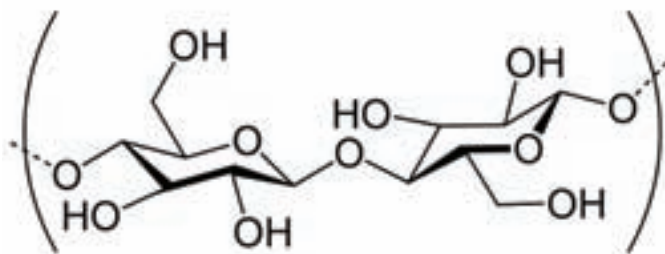
- 1 literatuur
 - 2 Doel en opzet onderzoek
 - 3 Materiaal & methode
 - 4 Resultaten
 - 5 Discussie
 - 6 Conclusie
- Bijlage: Referenties

1 LITERATUUR

CELLULOSE

Cellulose is een niet in wateroplosbaar polymeer. Cellulose is opgebouwd uit glucose-eenheden die steeds 180° van elkaar gedraaid zijn waardoor cellobiose het monomeer van cellulose is (afbeelding 29). Sterke waterstofbruggen en van der Waals krachten tussen cellulose polymeren zorgen ervoor dat een sterke structuur ontstaat.

AFBEELDING 29 MOLECUULSTRUCTUUR VAN CELLULOSE

**CELLULOSE IN AFVALWATER ZUIVERINGSINSTALLATIES**

Een groot aandeel van de vaste stoffen in het influent van een huishoudelijk afvalwaterzuiveringsinstallatie bestaat uit cellulose, afkomstig van toiletpapier. Het aandeel wordt geschat op 35% tot 50% van het totaal gesuspendeerde bestanddelen (Maki 1952; Ramasamy et al. 1981). Fijnzeven kunnen op een efficiënte manier vaste stoffen uit het influent verwijderen. Deze zeven kunnen een rendement halen van wel 80% (Rusten & Odegaard 2006). In eerder resultaten is gevonden dat fijnzeven vooral cellulose vezels verwijderen bij een rendement op vaste stoffen van ongeveer 40% (Ruiken & Breuer 2009). Dit rendement komt overeen met het rendement van voorbezinktanks. Het aandeel cellulose in het gezeefde materiaal bedraagt in dit geval ongeveer 79% van de totale massa en 84% van de organische fractie (dit onderzoek). Het aandeel cellulose in de vaste stoffen die voorbezinktanks verwijderen (primair slib), is minder dan 30% (dit onderzoek).

EFFECT FIJNZEVEN OP ZUIVERINGSPROCES

Om het effect van het gebruik van fijnzeven en de verwijdering van cellulosevezels uit het influent te kunnen voorspellen is het nodig om te weten welke bijdrage cellulose levert aan het zuiveringsproces en in welke mate cellulose wordt afgebroken. Actief slib modellen zijn in staat de prestaties van het zuiveringsproces te voorspellen aan de hand van de influentsamenstelling (Henze et al. 1999; Gujer et al. 1999). De bijdrage van cellulose aan de influent-samenstelling en dus de invloed op het zuiveringsproces is echter niet triviaal omdat het influent nooit gekarakteriseerd wordt aan de hand van de moleculaire samenstelling. In actief slib modellen wordt de afbraakkinetiek relevant voor modellen gebruikt: vaste stof niet biologisch afbreekbaar (X_i); vaste stof wel biologisch afbreekbaar (X_s); oplosbaar niet biologisch afbreekbaar (S_i); oplosbaar wel biologisch afbreekbaar (S_s); biomassa (X_h) (Henze et al. 1999; Gujer et al. 1999; Roeleveld & van Loosdrecht 2002). Niet biologisch afbreekbaar (inert) betekend in dit geval dat het niet afgebroken wordt in het zuiveringsproces, bij langere verblijftijden of andere condities wordt het mogelijk wel biologisch afgebroken. Vaste stoffen die gedeeltelijk afgebroken worden behoren tot zowel de fractie X_s als X_i . Actief slib modellen maken gebruik van de karakteriseringsmethode van influent aan de hand van de afbraakkinetiek. Hierin wordt slechts één (gemiddelde) hydrolysesnelheid gebruikt voor alle vaste stoffen aanwezig in het influent. Deze indeling is afdoende om te gebruiken in actief slib modellen zolang er geen grote veranderingen zijn in de influent-samenstelling, maar moeten herzien worden als er wel grote veranderingen zijn in de influentsamenstelling (Sophonsiri & Morgenroth 2004).

Aangezien fijnzeven specifiek selecteren op cellulose, en de influentsamenstelling dus veranderd, is de gebruikelijke influentkarakterisering methode mogelijk niet afdoende om het effect van celluloseverwijdering te voorspellen met behulp van actief slib modellen. Bij verwijdering van cellulose uit het influent kan deze fractie niet simpelweg van de fractie X_s gehaald worden omdat cellulose niet per se dezelfde hydrolysesnelheid heeft als andere vaste stoffen in het influent. Ook wordt cellulose niet volledig afgebroken in het zuiveringsproces, wat betekend dat cellulose voor een deel tot de fractie X_i (niet afgebroken fractie) en voor een deel tot de fractie X_s (afgebroken fractie) behoort.

De bijdrage van cellulose zou dus aan de verschillende modeltermen (X_i en X_s) gebruikt kunnen worden, zodat beide fracties hiervoor gecorrigeerd kunnen worden. Hiervoor is de afbreekbaarheid en afbraak kinetiek van cellulose in waterzuiveringsinstallaties nodig.

AFBRAAKSNELHEID CELLULOSE

De afbraak van cellulose in waterzuiveringsinstallaties is door verschillende onderzoekers onderzocht door de massa afname van cellulose *in situ* te volgen. Gevonden is dat volledige afbraak mogelijk is in 30 tot 70 dagen (Hofsten & Edberg 1972; Edberg & Hofsten 1975; Verachttert et al. 1982). Hofsten & Edberg (1972) hebben de afbraaksnelheid van cellulose in verschillende natuurlijke waterige omgevingen vergeleken met de afbraak in waterzuiveringsinstallaties en vonden dat de afbraaksnelheid in waterzuiveringsinstallaties vele malen hoger ligt dan in natuurlijke waterige omgevingen (rivieren, meren etc.).

Door verhoudingen tussen lignine en cellulose op verschillende plaatsen in het zuiveringsproces met elkaar te vergelijken, voorspellen Verachttert et al. (1982) dat een afbraak van 50% gehaald wordt in actief slib tanks en 60% gehaald wordt in vergisters van een zuiveringsinstallatie.

CELLULOLYTISCHE BIOMASSA

Organismen met cellulolytische eigenschappen komen voor onder zowel aerobe als anaerobe bacteriën, schimmels en hogere organismen zoals protozoa (Weimer 1992). Cellulolyti-

sche biomassa aanwezig in waterzuiveringsinstallaties bestaat vrijwel exclusief uit bacteriën (Verachtert et al. 1982). O'Sullivan et al. (2007) vonden door middel van Fluorescent *In Situ* Hybridization (FISH) dat 10 tot 25% van de bacteriën aanwezig in actief slib cellulolytische eigenschappen bezitten. Veel cellulolytische bacteriën, vooral anaerobe bacteriën, hechten zich aan cellulose en produceren een laag glycocalyx om de cellen om zo een biofilm te vormen (Lynd et al. 2002). De laag glycocalyx bestaat uit een slijmerig laag extracellulaire glycoproteïnen. De aanhechting en vorming van de glycocalyx laag zorgen ervoor dat cellen en vrijgemaakte substraten (glucose, cellobiose) geconcentreerd blijven rond het cellulose substraat. Bovendien zijn de cellen zo beter beschermd tegen bijvoorbeeld protozoa. Mogelijk zorgt de laag glycocalyx ervoor dat de omgeving in de biofilm anaeroob is, zelfs als de condities buiten de biofilm aeroob zijn (Lynd et al. 2002).

ANAEROBE EN AEROBE AFBRAAK

De snelheid van cellulose afbraak gevonden in oxische en anoxische sedimenten van meren door Hoeniger (1985) is vergelijkbaar. Ook komt de afbraak van cellulose in huishoudelijk afval, bij verschillende vaste stof retentie tijden, onder aerobe en anaerobe condities ongeveer met elkaar overeen (Vinzant et al. 1990). Mino et al. (1995) onderzochten de hydrolyse snelheid van langzaam biologisch afbreekbaar CZV met zetmeel als modelsubstraat door zowel actief slib, twee verschillende mono culturen en enzymen. Ze vonden dat de eerste orde hydrolyse constante hetzelfde is onder aerobe, anoxische en anaerobe condities voor alle gebruikte inocula. In actief slib modellen wordt vaak aangenomen dat de hydrolyse snelheid onder anaerobe en anoxische condities veel langzamer is dan onder aerobe condities (Henze et al. 1999; Gujer et al. 1999). In veel experimenten wordt de hydrolyse snelheid berekend aan de hand van de zuurstof of nitraat opname snelheid en worden niet de hydrolyse producten of overblijvend substraat gekwantificeerd. In actief slib modellen wordt de correctiefactor voor anoxische en anaerobe condities vaak bepaald door model kalibratie. Beide aanpakken zouden mogelijk tot een verkeerde hydrolyse snelheid/correctie factor kunnen leiden (Goel et al. 1998).

Zoals al eerder genoemd is het mogelijk dat door vorming van een biofilm rondom cellulose de omstandigheden voor de cellulolytische bacteriën ook anaeroob zijn onder aerobe condities. Dit zou ook kunnen verklaren waarom er bijna geen verschil wordt waargenomen tussen de aerobe en anaerobe hydrolyse snelheid.

AFBRAAK ROUTE

Omdat cellulose onoplosbaar is in water en veel te groot is om opgenomen te worden door de cel, wordt cellulose extracellulair gehydrolyseerd. Vervolgens worden de hydrolyse producten (glucose, cellobiose, cellotriose etc.) opgenomen door de cel en in de cel verder afgebroken. Onder aerobe condities zal dit resulteren in CO₂ productie. Onder anaerobe condities zal fermentatie op de hydrolyse producten door gemengde culturen voornamelijk resulteren in productie van vluchtige vetzuren (bijv. acetaat, propionaat, butyraat), alcoholen (bijv. ethanol) en H₂ (Kleerebezem et al. 2008; Temudo et al. 2007; Rodriguez et al. 2005). Door methanogene biomassa (niet cellulolytisch) kunnen de gevormde vetzuren en H₂ omgezet worden in CH₄ (Weimer & Zeikus 1977). De samenstelling van de gevormde fermentatie producten en de gebruikte fermentatie routes zullen afhankelijk zijn van de (afbraak) condities, zoals pH, groeisnelheid, concentratie producten etc.

Het is algemeen geaccepteerd in literatuur dat de hydrolyse van cellulose (en andere vaste stoffen) het langzaamste proces is in de afbraak route. Het wordt dan ook bijna altijd aangenomen dat de hydrolyse van cellulose de snelheidsbepalende stap is (Pavlostathis & Giraldo-Gomez 1991).

Het is algemeen in literatuur geaccepteerd dat bij verlaagde pH de (anaerobe) afbraak van cellulose sterk gehinibiteerd wordt. Een pH optimum tussen 6,5 en 7,0 wordt vaak gevonden en onder pH 5,0-5,5 wordt zelden nog (anaerobe) afbraak waargenomen (Hu et al. 2005). Het pH optimum van veel cellulases ligt rond de pH 5,0-5,5 (Ng et al. 1977). Dit geeft aan dat de pH inhibitie die wordt waargenomen toe te schrijven is aan de werking van bacteriën en niet komt door de werking van de enzymen.

Vaak worden lange lag-tijd waargenomen, van een dag tot wel een week, voordat cellulose afbraak begint bij zowel *in situ* als *in vitro* experimenten (Verachtert et al. 1982; Hoeniger et al. 1985; Mourino et al. 2001; Hu et al. 2005; Lynd et al. 1989). Noodzakelijke aanhechting en vorming van een laag glycocalyx voordat afbraak begint, zou deze lag-tijd kunnen verklaren (Mourino et al. 2001).

AFBRAAK MODELLEN

In literatuur wordt vaak eerste orde kinetiek gebruikt om de afbraak van cellulose te beschrijven (zoals beschreven door Pavlostathis & Giraldo-Gomez 1991 en Weimer 1992). Aangezien cellulose alleen afgebroken wordt aan het oppervlak van de deeltjes, zou het beter zijn om de afbraak niet aan de concentratie te relateren maar aan het beschikbare oppervlak. Sommige auteurs bevestigen dat de afbraak eigenlijk afhankelijk is van het beschikbare oppervlak in plaats van de concentratie, maar vinden het onpraktisch omdat de cellulose deeltjes vaak onregelmatig gevormd zijn en het beschikbare oppervlak dus moeilijk vast te stellen is (Song et al. 2005). Door een bepaalde uniforme geometrische vorm voor de deeltjes aan te nemen (bijv. cilinder of bol) is het mogelijk om het beschikbare oppervlak te relateren aan de concentratie.

EFFECT CELLULOSE OP ZUIVERINGSPROCES

Aangezien cellulose een van de belangrijkste bestanddelen in afvalwater is, heeft (de afbraak van) cellulose ook een belangrijk effect op het zuiveringsproces. In beluchte delen van het zuiveringsproces zal cellulose (of de hydrolyse/fermentatie producten van cellulose) aeroob afgebroken worden, wat dus leidt tot een hogere O_2 consumptie, CO_2 productie en benodigde hoeveelheid beluchttingsenergie. In anaerobe delen van het zuiveringsproces wordt cellulose afgebroken tot vluchtige vetzuren. Deze vluchtige vetzuren worden gebruikt door denitrificerende bacteriën om NO_3 te reduceren tot N_2 en CO_2 , en door 'Polyphosphate accumulating organisms' (PAO's) om fosfaat op te nemen. Volgens Nowak et al. (1999) is de bijdrage van vaste stoffen (fractie Xs) echter gering in het denitrificatie proces. Cellulolytische bacteriën zullen groeien op cellulose, wat zal leiden tot extra slib productie. In de vergisters zal de afbraak van cellulose bijdragen aan de CH_4 productie.

HERGEBRUIK CELLULOSE/ZEEFGOED

De cellulose vezels die verwijderd worden uit het influent zouden mogelijk hergebruikt kunnen worden. Door Liu et al. (2003) is de mogelijkheid om met behulp van gemengde culturen (actief slib) H_2 te produceren uit cellulose, aanwezig in zuiveringsslib, onderzocht. Ook is door Honda et al. (2002) onderzocht hoe cellulose terug gewonnen zou kunnen worden uit primair slib door hydrolyse met lage concentraties zwavelzuur (<1%) bij hoge temperatuur en druk. Door Cheung & Anderson (1997) is onderzocht hoe ethanol geproduceerd kan worden uit cellulose aanwezig in primair slib door enzymatische hydrolyse en ethanol productie door gisten. Door Champagne & Li (2009) is onderzocht hoe door enzymatische hydrolyse van cellulose in primair slib suikers geproduceerd kunnen worden.

Een ander alternatief zou zijn om in een anaerobe tank vluchtige vetzuren te produceren uit het afgevangen cellulose. Vervolgens kunnen deze vluchtige vetzuren gedoseerd worden in de anaerobe of anoxische gedeeltes van het actief slib proces. Dit zal de stikstof en fosfaat verwijdering ten goede komen. Een vergelijkbaar concept, het HYPRO concept, bestaat voor primair slib. Hierbij wordt door middel van precipitatie een hoog rendement gehaald in de voorbezinktanks. Vervolgens wordt het primair slib verzuurd (gehydrolyseerd) en worden de vrijgemaakte vetzuren gedoseerd in het actief slib systeem (Henze & Harremoës, 1990).

2 DOEL EN OPZET ONDERZOEK

Het eerste doel van dit onderzoek is om de verschillen tussen het gebruik van fijnzeven en voorbezinktanks op de biologische nutriëntverwijdering te onderzoeken. Dit onderzoek laat zien dat fijnzeven voornamelijk cellulose vezels uit het influent verwijderen terwijl voorbezinktanks dit slechts gedeeltelijk doen. Om het effect van cellulose verwijdering te onderzoeken is de afbraak kinetiek van cellulose in rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) in beeld gebracht door middel van zowel *in situ* als *in vitro* experimenten. Via modellen in combinatie met de afbraak kinetiek wordt de afbraak in rwzi's voorspeld. Via de voorspelde afbraak is de invloed op de actief slib model termen onderzocht. Ook zijn concentraties cellulose in slib bepaald en is door middel van massa balansen de afbraak berekend. Ook is door middel van denitrificatie experimenten het verschil tussen voorbezonden en gezeefd influent op de denitrificatie onderzocht.

Het tweede doel van dit onderzoek is om de mogelijkheid tot hergebruik van het zeefgoed door middel van vluchtige vetzuren productie te onderzoeken. De vetzuur productie snelheid en yield is onderzocht in anaerobe batch experimenten.

3 MATERIAAL & METHODEN

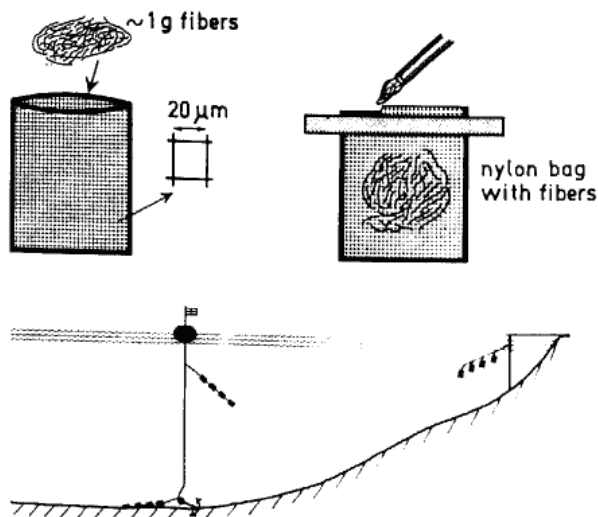
IN SITU CELLULOSE AFBRAAK

De *in situ* afbraak is gevolgd om de afbraak kinetiek van cellulose in rwzi's in beeld te brengen. De verkregen experimentele resultaten zijn geïnterpreteerd aan de hand van eerste orde kinetiek en een model dat de afbraaksnelheid relateert aan het beschikbare oppervlak van de deeltjes. De hierbij verkregen parameters zijn gebruikt om de resultaten te vergelijken met resultaten in literatuur en om voorspellingen te kunnen doen voor de afbraak in actief slib systemen bij verschillende slibleeftijden.

De *in situ* afbraak van cellulose vezels en stukken papier is gevolgd volgens de methode van Hofsten & Edberg (1972) met kleine aanpassingen. Rechthoekige nylon zakjes van 10 x 20 cm (Europet Bernina, cat no. 45015) met een gemiddelde maaswijdte van 10 µm werden gevuld met 1,5 g papiervezels of stukken papier. Als bron van stukken papier werden Whatman no. 595,5 folded filter papers gebruikt. Volgens de fabrikant bestaat dit filterpapier uit vrijwel 100% cellulose vezel. Van deze filters werden stukken afgeknipt totdat het gewicht 1,5 g bedroeg. Cellulose vezels zijn van hetzelfde filterpapier verkregen. Het afgewogen papier werd samen met 0,5-1 l water in een bekerglas gestopt en met behulp van een staafmixer tot vezels vermalen. De vezel suspensie werd vervolgens in het nylon zakje gegoten. Het bekerglas werd gespoeld met water totdat alle vezels in het nylon zakje terecht gekomen waren. Microscopische observaties lieten zien dat de vezels niet kleiner werden door gebruik van de staafmixer. De nylon zakjes werden vervolgens dichtgeknoopt en aan een kunststof lijn bevestigd en in de aeratie tank van rwzi Blaricum gehangen op ongeveer 20-30 cm diepte. De zuurstof concentratie op de locatie van het experiment bedroeg 2,8 mg/l. Periodiek

(minimaal elke 7 dagen) werd er een nylon zakje uit de aeratie tank gehaald en werd na het afspoelen van het nylon zakje met kraanwater het drooggewicht van de inhoud bepaald zoals bij *analyse* uitgelegd. De totale duur van het experiment was 40 dagen.

AFBEELDING 30 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE IN SITU EXPERIMENTEN. GEADAPTEERD VAN HOFSTEN & EDBERG (1972)



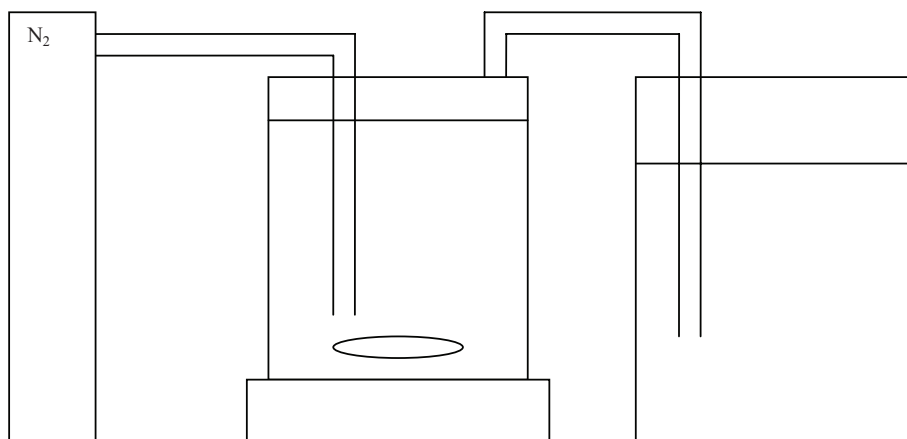
ANAEROBE BATCH CELLULOSE AFBRAAK

De anaerobe afbraak van cellulose is onderzocht in batch experimenten om de anaerobe afbraak kinetiek in beeld te brengen. Ook kan in deze experimenten de mogelijkheid onderzocht worden om vluchtige vetzuren uit zeefgoed of cellulose te produceren. Tevens kan de anaerobe biomassa yield en afbreekbaarheid van zeefgoed en cellulose onderzocht worden.

De anaerobe afbraak van cellulose is onderzocht in batch experimenten waarin cellulose de enige koolstof bron is. Vier glazen flessen van 5 l met een werkvolume van 4 l zijn gevuld met 0,5 l actief slib van RWZI Blaricum (droge stof concentratie van 4 g/L; slib vers gehaald), 5 of 10 g/L cellulose (Merck, gemiddelde deeltjes grote 50 µm, cat. no. 1023312500), 10 g/L wc papier of 10 g/L zeefgoed (Pilot Blaricum, Salsnes zeef, 350 µm, gedroogd bij 105 °C), 0,5 g/L NH_4Cl , 12,5 ml/L bufferoplossing (BOOM Bv; pH 7; 3,54 g/L KH_2PO_4 ; 14,7 g/L Na_2HPO_4), 0,5 ml/L nutriënten oplossing (1,8% NO_3 ; 2,6% $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$; 2,6% NH_4 ; 4% P_2O_5 ; 6% K_2O ; 0,02% Fe; 0,01% B; 0,002% Cu; 0,01% Mn; 0,001% Mo; 0,002% Zn met EDTA als tegen ion) en aangevuld tot 4 l met kraanwater. De opstellingen werden continu geroerd door middel van een Heidolph MR 3000 magneet roerder met 200-300 rpm en de opstellingen zijn door middel van een waterslot luchtdicht afgesloten. Het gas is opgevangen in een 1 l bekersglas. Er was geen significante gas productie. De temperatuur werd niet gecontroleerd maar wel gemeten. Deze bleef gedurende het hele experiment tussen de 15 en 20 °C. Bij start van het experiment werd de pH op 7,0 gebracht door toevoeging van 1,4 M NaOH of 1 M HCl. Elke 48-72 uur werd de pH gemeten met een WTW Sen tix 41 pH elektrode en WTW pH 197-S analyser en werd de pH op pH 6,8 – 7,0 gebracht door handmatige titratie van een 1,4 M NaOH oplossing afgerond op hele milliliters. De pH daling in deze periode bedroeg maximaal 1 pH eenheid en was groter voor microcrystalline cellulose dan voor wc papier/zeefgoed. Ook werd elke 48-72 uur een monster van 25 ml genomen door de opstelling handmatig te schudden en vervolgens met een 50 ml spuit een monster te nemen. Hiervan werd vervolgens de droge stof concentratie bepaald. Na 960 uur (bij alle vier de opstellingen) en na 1400 uur (bij de wc papier en zeefgoed opstellingen) werd een monster genomen en werd hiervan de concentratie opgelost

CZV bepaald. Bij de start van het experiment en na iedere monsternamen werd de opstelling doorgeblazen met N_2 gas voor enkele minuten om anaerobe condities te handhaven. De fermentaties waren gestopt toen de droge stof concentratie constant was voor 3 opeenvolgende meetpunten en de pH nauwelijks meer daalde tussen de verschillende meetpunten. De microcrystalline cellulose fermentaties zijn gestopt na 960 uur (40 dagen) en de wc papier/zeefgoed fermentaties zijn gestopt na 1400 uur (58 dagen).

AFBEELDING 31 OPSTELLING VAN DE ANAEROBE BATCH EXPERIMENTEN



De totale zuur productie is berekend aan de hand van de hoeveelheid gedoseerd NaOH (vergelijking 1). Aangenomen is dat bij pH 7 de vetzuren volledig gedissocieerd zijn en de verhouding tussen gevormd vetzuur en toegevoegd NaOH dus 1 is (mol/mol), aangezien de pH aan het begin en eind van het experiment hetzelfde is (pH 7). De productie van vetzuren, berekend aan de hand van de toevoeging van NaOH, is uitgedrukt als hoeveelheid acetaat.

$$[HAc] = \frac{Q_{NaOH} \cdot [NaOH] \cdot Mw_{HAc}}{V} \quad (1)$$

Waarin $[HAc]$ de concentratie gevormd acetaat (vetzuur) is, Q_{NaOH} de cumulatieve hoeveelheid NaOH oplossing die toegevoegd is (ml) is, $[NaOH]$ de concentratie NaOH in de NaOH oplossing is (1,4 M), Mw_{HAc} het molecuul gewicht van acetaat is (60 g/mol) en V het volume van de reactor is (4 l).

Biomassa en resterend substraat zijn berekend aan de hand van de vaste stof concentratie. De vaste stof aanwezig in de experimenten bestaat uit zowel biomassa als uit substraat (cellulose). Een deel van de vaste stof die verdwijnt door afbraak van cellulose komt terug als biomassa. Via de biomassa yield kan het restant vaste stof verdeeld worden over biomassa en substraat. Voor het verbruikte cellulose kan namelijk geschreven worden dat:

$$\text{cellulose verbruikt} = \frac{1}{Y_{xs}} X_t \quad (2)$$

Hierin is Y_{xs} de biomassa yield en $X(t)$ de hoeveelheid gevormde biomassa op tijdstip t . Als aangenomen wordt dat alle vaste stof aan het eind van de fermentatie biomassa is, en alle cellulose dus opgebruikt is dan kan de biomassa yield berekend worden via:

$$Y_{xs} = \frac{ds_{eind} - X_0}{\text{cellulose}_0} \quad (3)$$

Waarin X_0 de biomassa concentratie is op $t=0$ is (aanvang experiment), ds_{eind} de vaste stof concentratie aan het eind van het experiment is en $cellulose_0$ de cellulose concentratie op $t=0$ is. Hierbij is aangenomen dat de biomassa yield gedurende het experiment constant was. Gevonden waarden voor de biomassa yield bedragen 0,15; 0,25; 0,26; 0,23 (g/g) voor microcrystalline cellulose 5 g/L; microcrystalline cellulose 10 g/L; wc papier 10 g/L; zeefgoed 10 g/L. De aanwezige vaste stof op tijdstip t bestaat uit de biomassa ent, de aangegroeide biomassa, toegevoegd substraat min de hoeveelheid verbruikt substraat (vergelijking 4). De concentratie vaste stof kan dan dus met behulp van de gevonden yield factor en vergelijking 5 geschreven worden als:

$$ds(t) = X_0 + X(t) + cellulose_0 - \frac{1}{Y_{xs}} X(t) \quad (4)$$

Waarin $ds(t)$ de vaste stof concentratie op tijdstip t is. Aangezien de startconcentratie biomassa (0,5 g/L), start concentratie substraat (5 of 10 g/L), de droge stof concentraties in de tijd (gemeten) en de yield factor (berekend) bekend zijn, kan de concentratie biomassa in de tijd berekend worden door vergelijking 4 te herschrijven tot:

$$X(t) = X_0 + \frac{ds(t) - X_0 - cellulose_0}{1 - \frac{1}{Y_{xs}}} \quad (5)$$

De concentratie cellulose op tijdstip t kan dan geschreven worden als:

$$cellulose(t) = ds(t) - X(t) \quad (6)$$

Waarin $X(t)$ de biomassa concentratie op tijdstip t is, $ds(t)$ de vaste stof concentratie op tijdstip t is, X_0 de biomassa concentratie bij aanvang van het experiment is, $cellulose_0$ de cellulose concentratie bij aanvang van het experiment is en Y_{xs} de biomassa yield is. Met behulp van vergelijkingen 5 en 6 kan dan de concentratie cellulose en biomassa op ieder tijdstip berekend worden aan de hand van de vaste stof concentratie en de biomassa yield. De concentraties biomassa en cellulose hoeven dan niet onafhankelijk van elkaar experimenteel bepaald te worden.

DENITRIFICATIE

De denitrificatie snelheid van gezeefd en voorbezonden water is onderzocht in opstellingen gelijk aan die van de batch anaerobe cellulose afbraak experimenten. Per opstelling werd er toegevoegd: 1 l actief slib van rwzi Blaricum (droge stof concentratie 3,9 tot 8,2 g/L); 3 l gezeefd of voorbezonden influent van rwzi Hilversum; 2 ml (experiment A), 10 ml (experiment B) of 60 ml (experiment C) 120 g/L KNO_3 oplossing. Gezeefd water is verkregen door een influent monster (momentopname) te zeven volgens de methode van Rusten & Odegaard (2006) met een zeef met maaswijdte van 250 μm . Voorbezonden water is verkregen door influent 1 uur te laten bezinken in 12 l emmers en voorzichtig 3 l van het bovenstaande water af te scheppen. Van het ruwe influent, gezeefd water en voorbezonden water is de concentratie droge stof bepaald. Hieruit is het verwijderingsrendement berekend. Het actief slib was maximaal 24 uur oud en gekoeld bewaard ($<7^\circ\text{C}$). Voor de toevoeging van het actief slib aan het gezeefde/voorbezonden water is het actief slib belucht met buitenlucht met behulp van een compressor om snel omzetbare organische bestanddelen, aanwezig in het actief slib, te verwijderen (oxideren). Na toevoeging van het actief slib en de KNO_3 oplossing is de opstelling belucht met

N₂ gas voor 2 tot 3 minuten om anoxische condities te verkrijgen. Periodiek werd een monster genomen en werd de concentratie NO₃ gemeten. Na elke monster name werd de opstelling belucht met N₂ gas om anoxische condities te handhaven.

ANALYSE

Thermografische analyse: Het aandeel cellulose in zeefgoed en primair slib is geanalyseerd door middel van een Leco TGA 601 analyser. Hierbij is 0,3 tot 1 gram gedroogd en fijn gemalen monster gebruikt. Het monster werd eerst verhit tot 105 °C en op deze temperatuur gehouden totdat de massa niet meer afnam om restanten vocht te verwijderen. Daarna werd de temperatuur met 1 °C per minuut verhoogd tot 550 °C onder een lucht atmosfeer (21% O₂, 79% N₂) en werd de massa van ieder monster continu gemeten. Aan de hand van deze resultaten is de massa afname als functie van de temperatuur verkregen. De fractie cellulose in het monster kan dan volgens onderstaande procedure berekend worden.

Van de verkregen grafiek kan gezegd worden dat de oppervlakte onder de grafiek gelijk is aan de massa afname (zie resultaten sectie). De relatieve massa afname onder de piek is berekend door de massa afname tussen begin en eind temperatuur van de piek te delen door de massa van het monster bij 105 °C (na het verdampen van restanten vocht).

$$Opp_{piek} = \frac{M_{t=begin} - M_{t=eind}}{M_{t=105}} \quad (7)$$

Bij zuiver cellulose (microcrystalline cellulose en filtreerpapier) is de oppervlakte onder deze piek gemiddeld 60% (57% en 63%) ten opzichte van het totale oppervlak onder de curve. Het overige deel van de cellulose verbrandt daarna geleidelijk en langzaam bij hogere temperaturen, mogelijk door pyrolyse producten. Dit betekent dat dus 60% van de cellulose teruggevonden wordt in de piek ($X_{cellulose, piek} = 0,60$). Hiervoor moet de gevonden oppervlakte van de piek (massa afname) dus gecorrigeerd worden. Van het monster kan dan het aandeel cellulose van de totale massa berekend worden via onderstaande vergelijking.

$$X_{cellulose, totaal} = \frac{(M_{t=begin} - M_{t=eind}) \frac{1}{X_{cellulose, piek}}}{M_{t=105}} \quad (8)$$

Het aandeel cellulose van de organische fractie van de totale massa kan berekend worden via onderstaande vergelijking. Hierbij is aangenomen dat al het organische materiaal verbrand is bij 550 °C.

$$X_{cellulose, organisch} = \frac{(M_{t=begin} - M_{t=eind}) \frac{1}{X_{cellulose, piek}}}{M_{t=105} - M_{t=550}} \quad (9)$$

Aangezien de exacte verbrandingstemperatuur enigszins verschilt per monster worden begin en eind temperaturen van de pieken handmatig vastgesteld (zie resultaten).

Vaste stof concentratie: Vaste stof concentraties van de anaerobe batch afbraak experimenten, influent en van slib zijn bepaald door 25 ml (200 ml in geval van influent) te filteren over een filtreer papiertje (Whatman no. 41) met behulp van een vacuüm pomp. Het filtreerpapier is vervolgens gedroogd onder een halogeen lamp bij 130 °C (Mettler Toledo HB 43 S) totdat het gewicht niet meer afnam (±15 minuten). Aan de hand van de gewichtstoename van het filtreer papiertje is de droge stof concentratie berekend.

Vaste stof residu: Droge stof residu in de *in situ* afbraak proefjes is bepaald door de inhoud van de nylon zakjes, na de buitenkant van de zakjes gewassen te hebben, over te brengen in een bakje en de wand van de nylon zakjes met water af te spoelen zodat de volledige inhoud van het zakje in het bakje terecht kwam. Als alle vaste stof in het bakje zat is de inhoud hiervan gefiltreerd over een vouwfilter (Whatman no. 595,5 folded filter paper). Deze vouwfilter is gedroogd in een oven bij 105 °C voor minimaal 18 uur. Aan de hand van de gewichtstoename van het filtreer papiertje is het droge stof residu berekend.

Opgelost CZV: Opgelost CZV is bepaald door het monster te filtreren over een Whatman no. 595,5 folded filter paper. Het filtraat is 10x verdund (concentratie na verdunning <1000 mg CZV/L) en geanalyseerd met behulp van een Hach Lange LCI 4000 cuvet en met Hach Lange Laga 50 spectrofotometer met demi water toegevoegd aan een cuvet als blanco. Deze methode is equivalent aan ISO 15705:2002 (small scale sealed tube method) en gebaseerd op oxidatie van CZV met dichromaat in fosfor- en zwavelzuur gevolgd door spectrofotometrische bepaling van dichromaat residu.

Opgelost nitraat: Opgelost nitraat is geanalyseerd door het monster te filteren over een Whatman no. 595,5 folded filter paper. Het filtraat is 2 tot 20x verdund (verdunningsfactor verschilt per monster; concentratie na verdunning < 60 mg NO₃/L) en geanalyseerd met behulp van een Hach Lange LCK 339 cuvet en met Hach Lange Laga 50 spectrofotometer. Deze analyse is gebaseerd op reactie van NO₃ met 2,6-dimethylfenol naar 4-nitro-2,6-dimethylfenol in zwavel- en fosforzuur gevolgd door een spectrofotometrische bepaling van 4-nitro-2,6-dimethylfenol.

Vluchtige vetzuren en alcoholen: Vluchtige vetzuren en alcoholen zijn bepaald door het monster te filtreren over een Whatman no. 595,5 folded filter paper. Het filtraat is verdund en geanalyseerd met behulp van een gas chromatograaf.

Microscopische afbeeldingen: Microscopische afbeeldingen zijn gemaakt met behulp van een Leica DMLS lichtmicroscop in combinatie met een polarisatie filter (Leica) om cellulose uit te lichten.

Concentratie cellulose: Cellulose concentraties in slib en influent afvalwater zijn geanalyseerd volgens een aangepaste methode van Updegraff (1969). Hierbij werd 10 ml slib (5 ml in geval van uitgestort of primair slib) in een 18 ml glazen centrifugebuis gedaan en gecentrifugeerd voor 5 minuten bij 3000 rpm en werd het supernatant verwijderd. Vervolgens werd 10 ml azijnzuur/salpeterzuur reagens toegevoegd (10:1 azijnzuur anhydride : 65% salpeterzuur), gevortexed en 30 minuten in een waterbad van 100 °C geplaatst met een aluminium schuif op de buis om verdamping te voorkomen. Hierna wordt het monster gecentrifugeerd voor 5 minuten bij 3000 rpm en werd het supernatant verwijderd. Vervolgens werd het monster twee keer gewassen met 10 ml water, gevolgd door centrifugeren voor 5 minuten bij 3000 rpm en werd het supernatant verwijderd. Hierna werd 10 ml 67% zwavelzuur toegevoegd, gevortexed en werd het monster 60 minuten op kamertemperatuur geïncubeerd. Vervolgens werd het monster verdund (5 tot 20 keer, afhankelijk van de verwachte concentratie cellulose; concentratie na verdunning ±0,1-0,2 g/L) met water. Aan 5 ml van deze verdunning werd 10 ml anthrone reagens toegevoegd (2 g/L Anthrone, ACROS organics, in geconcentreerd zwavelzuur; vers gemaakt voor gebruik) terwijl het monster werd gekoeld in koud water. Hierna werden de buizen voor 16 minuten in een waterbad van 100 °C geplaatst met een aluminium schuif op de buis om verdamping te voorkomen. De buizen werden daarna meteen gekoeld in

koud water. Hierna werd de oplossing uitgelezen met een spectrofotometer bij 620 nm met 5 ml water plus 10 ml anthrone reagens als blanco. Als referentie werd microcrystalline cellulose (Merck, gemiddelde deeltjes grote 50 μm) in water gebruikt (0-3,5 g/L). Voor nadere informatie over de bepalingsmethode wordt verwezen naar Bijlage 5.

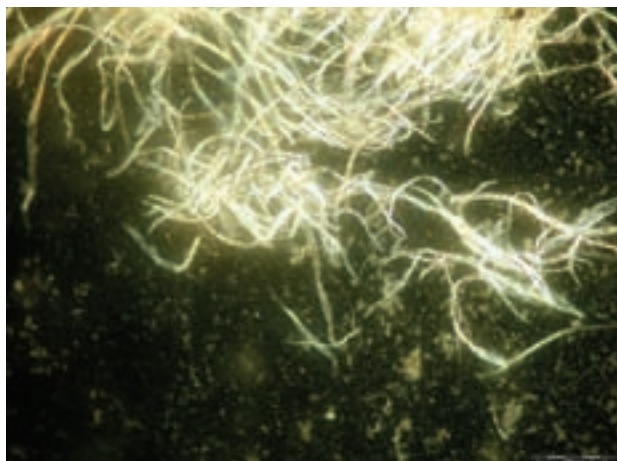
4 RESULTATEN

AANDEEL CELLULOSE IN ZEEFGOED EN PRIMAIR SLIB

zeefgoed

Microscopische observaties van het zeefgoed verkregen bij de Salsnes fijnzeef pilot in Blaricum met een maaswijdte van 250 tot 500 μm doen vermoeden dat een groot deel van het zeefgoed uit cellulose vezels bestaat (afbeelding 32).

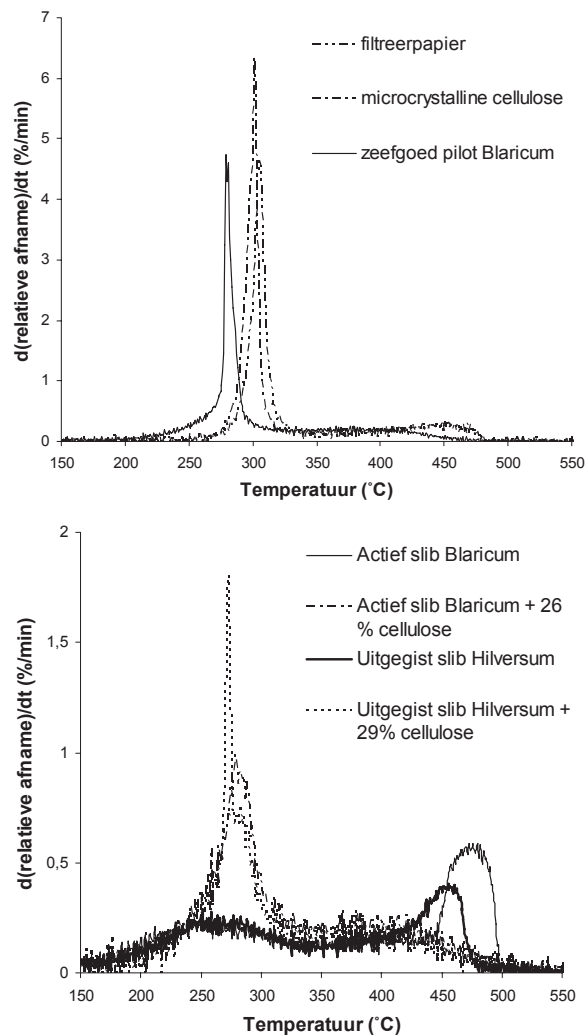
AFBEELDING 32 MICROSCOPISCHE OPNAME VAN HET VERKREGEN ZEEFGOED. DE WITTE OPLICHTENDE VEZELS ZIJN CELLULOSE VEZELS



Om de fractie cellulose in het zeefgoed vast te stellen is het verbrandingsspectrum van het zeefgoed vergeleken met dat van microcrystalline cellulose en filtreerpapier. Cellulose heeft een klein temperatuurbereik waarin het verbrandt en kan op deze manier onderscheiden worden van andere organische stoffen. Bij mengsels van organische stoffen, zoals in actief en uitgegist slib, wordt een heel breed verbrandingspatroon waargenomen. Hierin is wel een bult te zien ter hoogte van cellulose, afkomstig van lage concentraties cellulose in dit slib.

AFBEELDING 33

VERBRANDINGSCURVES VAN MICROCRYSTALLINE CELLULOSE, FILTREERPAPIER EN ZEEFGOED (LINKS). HIERIN IS EEN DUIDELIJKE PIEK TE ZIEN, AFKOMSTIG VAN DE VERBRANDING VAN CELLULOSE. VERBRANDINGSCURVES VAN ACTIEF SLIB BLARICUM EN UITGEGIST SLIB HILVERSUM (RECHTS) MET DAARAAN WEL EN GEEN MICROCRYSTALLINE CELLULOSE TOEGEVOEGD. TE ZIEN IS DAT DE MONSTERS ZONDER TOEVOEGING EEN BIJNA CONSTANTE VERBRANDINGSNELHEID HEEFT, MET EEN KLEINE BULT TER HOOGTE VAN DE VERBRANDINGSPIEK VAN CELLULOSE TERWIJL DE MONSTERS MET TOEVOEGING VAN CELLULOSE OP DEZELFDE PLAATS EEN DUIDELIJKE PIEK LATEN ZIEN



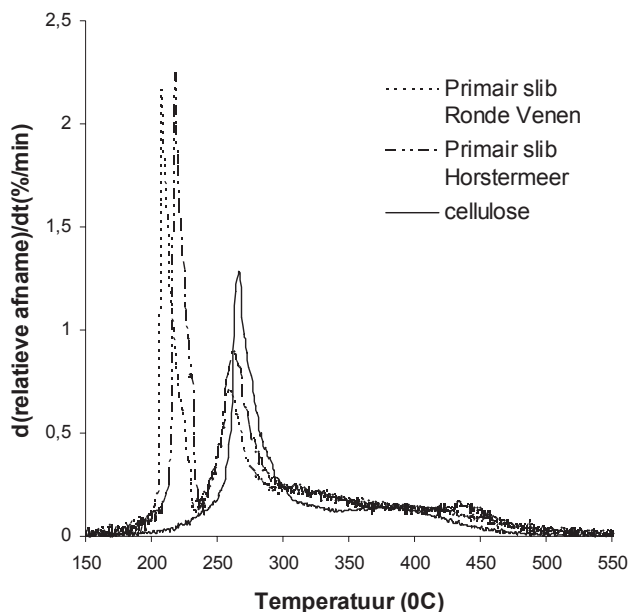
Het oppervlak onder de piek is gelijk aan de massa afname. De gebruikte temperaturen voor de pieken uit afbeelding 33 zijn: 290-310 °C voor microcrystalline cellulose; 280-320 °C voor filtreerpapier; 270-300 °C voor zeefgoed. De gevonden fractie cellulose voor het zeefgoed bedraagt 79% van de totale massa en 84% van de organische fractie. De asrest van het zeefgoed bedraagt 6%.

De fijnzeef had tijdens de productie van het zeefgoed een rendement van ongeveer 40%. Als aangenomen wordt dat al het cellulose in het influent verwijderd wordt door de zeef, met een aandeel cellulose in het zeefgoed van 79%, betekent dit dat 32% van de vaste stoffen in het influent uit cellulose vezels bestaat.

Primair slib

Op een vergelijkbare manier kan een verbrandingscurve gemaakt worden van primair slib (afbeelding 34). In het geval van primair slib zijn er twee duidelijke pieken zichtbaar. Een ter hoogte van cellulose en een grotere piek bij een lagere verbrandingstemperatuur. De herkomst van deze piek is onbekend.

AFBEELDING 34 VERBRANDINGS-CURVE VAN CELLULOSE EN PRIMAIR SLIB VAN RWZI 'RONDE VENEN' EN 'HORSTERMEER'



In het geval van cellulose wordt een piek gevonden tussen 260 en 290 °C. Bij primair slib van 'Ronde Venen' en 'Horstermeer' wordt in beide gevallen een piek gevonden tussen 250 en 280 °C. Via vergelijkingen 2 en 3 kan de fractie cellulose in het primaire slib van de totale massa en organische massa berekend worden. Een fractie cellulose van de totale massa van 25% en 32% wordt gevonden voor respectievelijk 'Ronde Venen' en 'Horstermeer'. Een fractie cellulose van de organische massa van 32% en 38% wordt gevonden voor respectievelijk 'Ronde Venen' en 'Horstermeer'.

Het is dus te zien dat het aandeel cellulose in primair slib een stuk lager is dan in het zeefgoed. Aangezien het rendement op vaste stoffen tussen voorbezinktanks en fijnzeven ongeveer vergelijkbaar is (ongeveer 50%), betekent dit dat voorbezinken water meer cellulose bevat dan water van een fijnzeef.

Het wordt aangenomen dat al het cellulose tijdens de TGA analyse verbrand in een gebied van ongeveer 30 °C. De massa afname tijdens deze 30 °C relatief ten opzichte van de totale massa wordt toegerekend aan cellulose. Aangezien mogelijk ook andere organische bestanddelen verbranden in hetzelfde bereik als cellulose is het mogelijk dat de gevonden uitkomst te hoog is. Dit is zeker het geval bij monsters met een relatief lage concentratie cellulose (bijvoorbeeld primair slib ten opzichte van zeefgoed). De gevonden waarde voor de concentratie cellulose kan dan ook het beste gezien worden als een bovengrens in de concentratie en niet als een absolute concentratie.

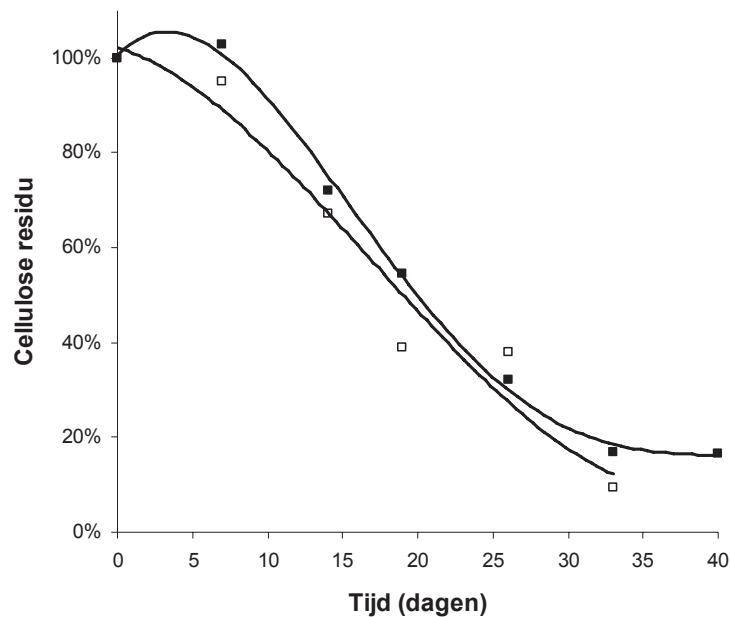
AFBRAAK CELLULOSE IN RWZI

In situ aerobe cellulose afbraak

Om resultaten in literatuur met betrekking tot de afbraak van cellulose in rwzi's te verifiëren en te vergelijken met de huidige Nederlandse situatie, is de afbraak van cellulose *in situ* gevolgd. Om ook het verschil in afbraak snelheid te zien tussen intacte stukken papier en losse vezels, is de afbraak van vezels en stukken papier (beide afkomstig van filterpapier) *in situ* gevolgd in de actiefslib tanks van rwzi Blaricum (25.146 i.e.; geen voorbezinktank; carrousel ontwerp; gemiddelde vaste stof concentratie actief slib van 4,8 g/L; sibleeftijd van

26 dagen). De *in situ* afbraak is gevolgd door de massa afname van het substraat te volgen in nylon zakjes (materiaal en methoden). De zakjes zijn opgehangen in het aerobe deel van het actief slib systeem. De temperatuur in de aeratietanks was gedurende het experiment altijd tussen de 17 en 22 °C en de pH was gedurende het experiment tussen de pH 7,6 en 7,8. Periodiek is het residu in een van de nylon zakjes bepaald. Deze nylon zakjes hebben een maaswijdte van gemiddeld 10 µm, wat klein genoeg is om de vezels in de zakjes te houden maar groot genoeg is om (cellulolytische) bacteriën door te laten.

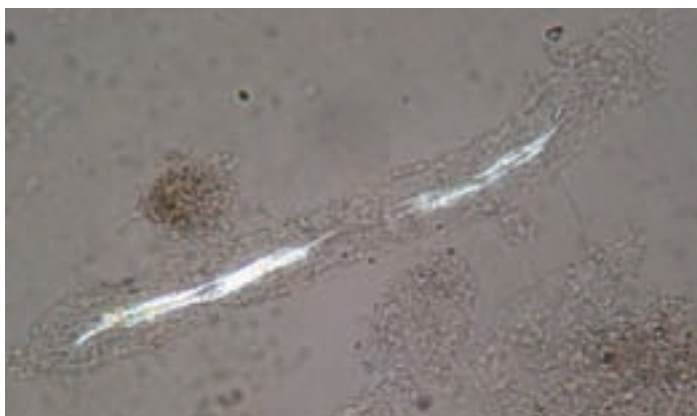
AFBEELDING 35 IN SITU AFBRAAK VAN PAPIER VEZELS (□) EN VAN STUKKEN PAPIER (■) IN DE AERATIE TANK



Te zien is dat er nauwelijks verschil is tussen de afbraak snelheid van losse vezels en stukken papier. Bijna volledige afbraak is mogelijk in 30 tot 40 dagen. Er is een duidelijke lag-tijd zichtbaar van ongeveer 7 dagen. Deze tijd heeft de biomassa waarschijnlijk nodig om de zakjes binnen te dringen en aan de cellulose vezels te hechten. Een dergelijke lag-tijd wordt ook verwacht voor cellulose vezels in influent afvalwater die de actief slib tanks in gaan. Microscopische observaties wijzen uit dat het resterende residu in de zakjes na een periode van 30 tot 40 dagen afkomstig is van biomassa in de zakjes. Deze biomassa is hoogstwaarschijnlijk afkomstig van groei op de cellulose vezels. Het residu aan het eind van het experiment aanwezig in de zakjes, is ongeveer 20% van de begin massa. Dit is veel minder dan je op basis van de biomassa yield zou verwachten. Een biomassa yield van 50% (g/g) wordt vaak aangenomen in de aerobe gedeeltes van het actief slib systeem (Gujer et al. 1999). Waarschijnlijk is dus gevormde biomassa ook weer uit de zakjes gespoeld. Aangehechte bacteriën kunnen niet zomaar uitspoelen, maar als de vezel (bijna) volledig afgebroken is kunnen de bacteriën weer terug de oplossing in komen. Aangezien de bacteriën de zakjes in kunnen komen, zullen ze er ook uit kunnen spoelen als ze niet aangehecht zijn.

Microscopische observaties van het residu in de zakjes gedurende het experiment wijzen uit dat het grootste gedeelte van het residu na 2 tot 3 weken nog steeds cellulose vezels betrof. Er is duidelijk te zien dat de vezels kleiner worden (in diameter) en dat biomassa zich aan de vezels hecht (afbeelding 36).

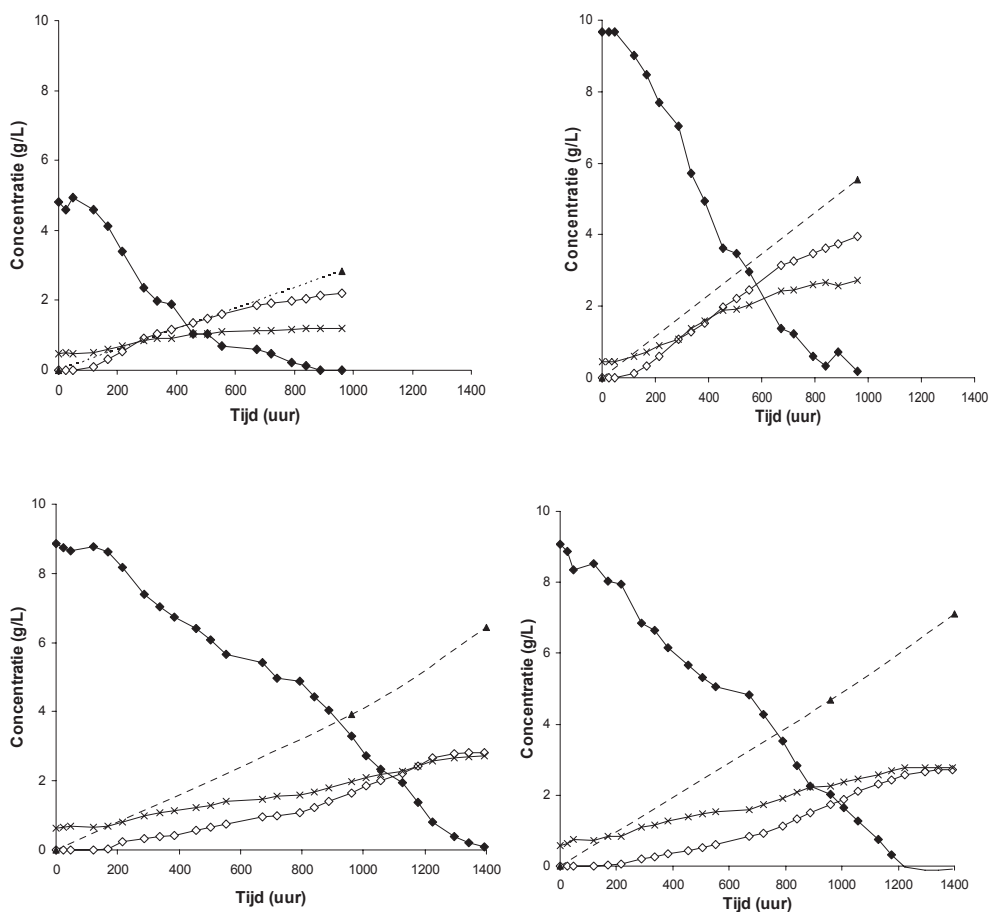
AFBEELDING 36 CELLULOSE VEZELS GEÏSOLEERD UIT DE IN SITU PROEFJES AAN HET EINDE VAN HET EXPERIMENT. ER IS EEN DUIDELIJKE BIOFILM ZICHTBAAR RONDOM DE VEZEL



Anaerobe Batch cellulose afbraak

De anaerobe afbraak van zeefgoed, wc papier en microcrystalline cellulose is onderzocht in 5 l batch reactoren (afbeelding 38). Actief slib uit rwzi Blaricum is gebruikt als ent (0,5 g/L). De pH is gedurende deze experimenten handmatig in het gebied pH 6-6,8 gehouden.

AFBEELDING 37 ANAEROBE BATCH AFBRAAK VAN MICROCRYSTALLINE CELLULOSE 5 G/L (LINKSBOVEN), CELLULOSE 10 G/L (RECHTSBOVEN), WC PAPIER (LINKSONDER) EN ZEEFGOED (RECHTSONDER). GEVOLGD IS DE CONCENTRATIE CELLULOSE (◆); GEVORMDE ZUREN ALS ACETAAT (◇); BIOMASSA (×); OPGELOST CZV (▲). EXPERIMENTEN ZIJN GESTOPT NADAT DE PH EN GEMETEN VASTE STOF CONCENTRATIE GEDURENDE DRIE MEETPUNTEN CONSTANT WAS. DIT WAS NA 1000 UUR BIJ DE EXPERIMENTEN MET MICROCRYSTALLINE CELLULOSE (ZOWEL 5 EN 10 G/L), EN NA 1400 UUR BIJ DE EXPERIMENTEN MET WC PAPIER EN ZEEFGOED.

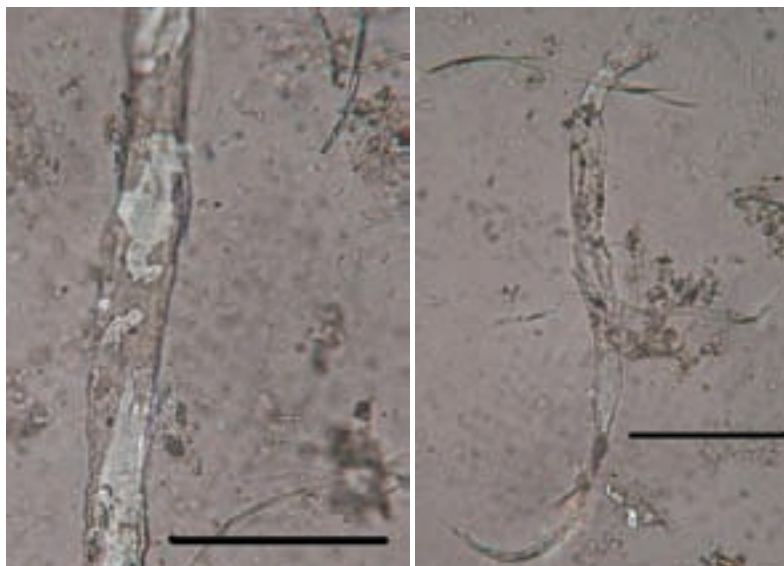


Gedurende de experimenten werd periodiek de concentratie cellulose, biomassa en gevormd zuur (afbraak product van cellulose) bepaald. Aan het eind van alle vier de experimenten en na 960 uur bij de wc papier en zeefgoed fermentaties is de concentratie opgelost Chemisch zuurstof verbruik (CZV) gemeten. Chemisch zuurstof verbruik is evenredig aan het aantal elektronen dat nog gedoneerd kan worden door het substraat, en daarmee een maat voor de hoeveelheid organisch materiaal.

Te zien is dat bijna volledige afbraak mogelijk is en dat resterende vezels bijna volledig afgebroken zijn (afbeelding 38). Afbraak begint na een lag-tijd van ongeveer 1 week.

Te zien is dat wc papier en zeefgoed met ongeveer dezelfde snelheid afgebroken worden. Dit is in lijn met de aanname dat het (grotendeels) hetzelfde substraat is. De afbraaksnelheid voor deze substraten is lager dan de afbraaksnelheid van microcrystalline cellulose. Microcrystalline cellulose bestaat uit kleinere deeltjes dan de cellulose vezels, waardoor deze een groter specifiek oppervlak hebben en daardoor sneller afgebroken kunnen worden.

AFBEELDING 38 OVERGEBLEVEN VEZELS AAN HET EINDE VAN DE FERMENTATIE. DE MAATSTREEP GEEFT 100 μ M AAN



CONCENTRATIES CELLULOSE IN SLIB

Van het slib (primaair, actief en uitgest) van verschillende afvalwater zuiveringsinstallaties (tabel 53) is de concentratie cellulose bepaald (tabel 54). Deze gemeten waarden kunnen vergeleken worden met waarden die gevonden zijn in literatuur (tabel 55). De gepresenteerde concentraties zijn een gemiddelde van meerdere metingen. De monsters waarvan de concentraties bepaald zijn, zijn genomen met een interval van minimaal een week.

TABEL 53 ONTWERP GEGEVENS VAN DE ONDERZOCHE HUISHOUDELIJKE AFVALWATER ZUIVERINGSINSTALLATIES

Zuivering	i.e.	Procestype	Voorbezinktank	Bron afvalwater
Amsterdam West	846.000	mUCT	Ja	Huishoudelijk
Westpoort	360.000	mUCT	Ja	Huishoudelijk + 30% industrieel
Uithoorn	50.000	Propstroom + denitrificerende zandfilters	Ja	Huishoudelijk
Horstermeer	142.000	Propstroom	Ja	Huishoudelijk
Blaricum	25.000	Carrousel	Nee	Huishoudelijk

TABEL 54 CONCENTRATIES CELLULOSE IN SLIB VAN VERSCHILLENDE ZUIVERINGEN. AAN DE HAND VAN DE VASTE STOF CONCENTRATIE IS HIERUIT DE FRACTIE CELLULOSE BEPAALD. VAN IEDER MONSTER ZIJN MEERDERE ANALYSES UITGEVOERD, BEHALVE VAN HET KUNSTMATIGE SLIB. DE STANDAARDAFWIJKINGEN TUSSEN DE METINGEN VAN DE CONCENTRATIES CELLULOSE EN DE DAARUIT VOLGENDE FRACTIES CELLULOSE ZIJN BEREKEND

Monster	Zuivering	Concentratie cellulose (g/l)	Concentratie vaste stof (g/l) ¹	Fractie cellulose (%)
Primair slib	Amsterdam West	7,45 ±4,42	40 ±5,66	18 ±9
	Westpoort	1,07 ±0,56	2,60 ±0,55	46 ±34
	Uithoorn	8,09 ±2,49	62 ±0	13 ±4
	Horstermeer	13,16 ±5,77	56,2 ±9,73	25 ±13
Actief slib	Amsterdam West	0,47 ±0,28	3,84 ±0,23	12 ±7
	Westpoort	0,28 ±0,30	3,82 ±0,13	4 ±2
	Uithoorn	0,43 ±0,11	4,28 ±0,26	10 ±3
	Horstermeer	0,72 ±0,33	4,72 ±0,38	15 ±6
Uitgegist slib	Blaricum	0,64 ±0,32	4,88 ±0,13	13 ±7
	Amsterdam West ²	4,92 ±1,27	35,25 ±1,89	14 ±4
	Horstermeer	7,33 ±3,79	32,4 ±1,34	23 ±12

¹Bepaald als indamprest.²Ongeveer een kwart van het slib dat vergist wordt op Amsterdam West is afkomstig van andere zuiveringen.

TABEL 55 CONCENTRATIES CELLULOSE IN SLIB GEVONDEN IN LITERATUUR

Monster	Fractie cellulose (%)	Referentie
Influent	35	Maki (1952)
	50	Ramasamy et al. (1981)
	1,2-38,9 (gem. 16,3)	Honda et al. (2002)
	18,2; 19,9 ¹ ; 32,2	Pavlostathis et al. (1991)
Primair slib	15,4	Verachtert et al. (1982)
	8-15	Sun & Cheng (2002)
	29,3	Champagne & Li (2009)
Actief slib	7 ² ; 9,7 ¹	Pavlostathis et al. (1991)
	6,7	Verachtert et al. (1982)
	13,8	Champagne & Li (2009)
	9,2 ¹	Shimizu et al. (1992)
Uitgegist slib	4,5	Verachtert et al. (1982)

¹gemeten als totaal koolhydraat²inclusief lignine

Geprobeerd is, om via dezelfde analysemethode concentraties cellulose in influent te meten. De methode bleek hier echter om nog onbekende redenen niet geschikt voor te zijn. Gevonden concentraties waren veel te hoog, in sommige gevallen zelfs hoger dan de concentratie onopgeloste bestanddelen. Hierom is in berekeningen een fractie cellulose van 35% van de

onopgeloste bestanddelen gebruikt. Deze waarde komt overeen met de hoeveelheid cellulose die verwijderd wordt door fijnzeven en waarden in literatuur.

De gevonden concentraties cellulose in slib komen goed overeen met concentraties gevonden in literatuur. Er zijn grote spreidingen gevonden in de concentraties tussen verschillende monsters (genomen op verschillende momenten) van dezelfde zuiveringsinstallatie. Ook zijn er grote spreidingen te vinden tussen (gemiddelde) concentraties van verschillende zuiveringsinstallaties. In literatuur wordt eenzelfde grote spreiding gevonden. Gevonden spreidingen kunnen komen door onnauwkeurigheid in de analyse methode of monsternamen, maar het kan ook zijn dat de fractie cellulose in slib varieert. Zeker in primair slib zijn hierin grote verschillen mogelijk. In actief slib of uitgegist slib worden hierin kleinere verschillen verwacht vanwege een lange verblijftijd (20 tot 30 dagen), waardoor variaties in samenstelling kleiner zijn. De spreidingen die gevonden worden zijn bij primair slib ook groter dan bij actief slib of uitgegist slib.

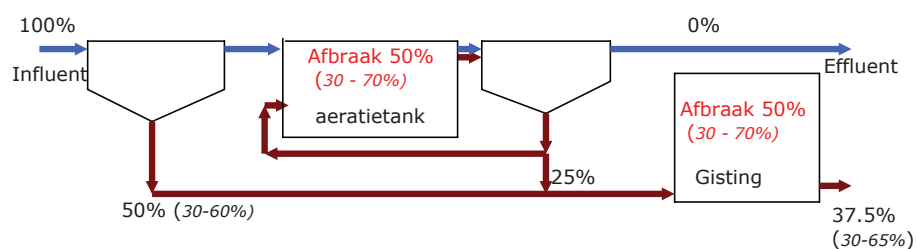
De concentraties cellulose die in primair slib gemeten zijn, zijn enigszins lager dan de hoeveelheid cellulose berekend aan de hand van de TGA analyses. Dit wordt ook verwacht aangezien de concentratie gevonden aan de hand van de TGA analyses gezien kan worden als een bovengrens.

Massa balansen

Via een massa balans kan de omzetting over een proces(onderdeel) berekend worden.

Via de in en uitgaande stromen in de verschillende onderdelen van het zuiveringsproces (afbeelding 39) kan dus de omzetting berekend worden aan de hand van de slibstromen en concentraties cellulose.

AFBEELDING 39 SCHEMATISCHE WEERGAVEN VAN DE IN EN UITGAANDE STROMEN IN HET ZUIVERINGSPROCES
CELLULOSE BALANS RWZI ALS PERCENTAGE VAN DE MASSA IN INFLUENT. TUSSEN HAAKJES IS DE GEMETEN SPREIDING GETOOND



TABEL 56 BEREKENDE RENDEMENTEN EN OMZETTINGEN AAN DE HAND VAN MASSA BALANSEN, CONCENTRATIES CELLULOSE IN INFLUENT EN SLIB

	Zuivering	35% cellulose in influent
Rendement voorbezinktank	Amsterdam West	35%
	Westpoort	76%
	Uithoorn	26%
	Horstermeer	61%
Omzetting actief slib systeem	Blaricum	71%
Omzetting vergister	Amsterdam West	38%
	Horstermeer	35%
Omzetting totaal	Amsterdam West	38%
	Horstermeer	49%
	Blaricum	71% ¹

¹Omdat rwzi Blaricum alleen een actief slib systeem heeft (geen voorbezinktank of vergister) is de totale omzetting gelijk aan de omzetting in het actief slib systeem.

Te zien is dat voorbezinktanks maar een gedeelte van het cellulose verwijderen, wel is er een grote spreiding in de gemeten concentraties en dus verwijderingsrendement aanwezig. Dit betekent dat een aanzienlijk deel van het cellulose doorgaat naar het actief slib systeem. Hierin kan microscopisch cellulose worden aangetoond. Cellulose wordt deels afgebroken in zowel de vergisters als in het actief slib systeem.

Vanwege de grote spreiding tussen cellulose metingen zou het denkbaar zijn dat de gemeten concentratie cellulose enigszins afwijkt van de daadwerkelijke concentratie. Om het effect van een afwijkende concentratie op de berekende omzetting te bepalen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de berekende omzettingen (vergister en totaal). De gevoeligheid op de berekende omzetting is bepaald bij een 10% afwijking (hoger en lager) in de gemeten cellulose concentraties in slib en influent (tabel 57).

Er is een gevoeligheidsanalyse van een afwijking in gemeten fracties cellulose in slib en influent op de berekende omzetting uitgevoerd. De verandering op de berekende omzetting is berekend bij een 10% verandering (hoger of lager) van de fractie cellulose in slib of influent.

TABEL 57 GEVOELIGHEIDS ANALYSE

Verandering concentratie in		Omzetting vergister		Omzetting totaal	
		West (%)	Horstermeer (%)	West (%)	Horstermeer (%)
Uitgest slib	+10%	-16	-19	-3	-2
	-10%	+16	+19	+3	+2
Primair slib	+10%	+7	+13		
	-10%	-8	-16		
Actief slib	+10%	+8	+4		
	-10%	-9	-4		
Influent	+10%			+3	+2
	-10%			-3	-2

Te zien is dat een afwijkende concentratie cellulose een hele grote invloed heeft op de berekende omzetting in de vergister. Het effect van een afwijkende concentratie op de berekende totale omzetting is veel kleiner.

AFBRAAK MODEL CELLULOSE

Modellen

Om de afbraak van cellulose te kunnen voorspellen in het zuiveringsproces is er een model nodig die de afbraak van de cellulose deeltjes nauwkeurig beschrijft. In literatuur zijn verschillende modellen te vinden (tabel 58).

TABEL 58 OVERZICHT VAN KINETISCHE MODELLEN GEBRUIKT IN LITERAATUUR OM DE AFBRAAK VAN VASTE (CELLULOSE) DEELTJES TE BESCHRIJVEN

Model	Vergelijking	Kinetische parameter	Referentie
1e orde	$\frac{dC}{dt} = k_1 C$	K1 (dag-1)	Pavlostathis & Gossett (1985); Shimizu et al. (1992); Noike (1985); Vavilin et al. (1996); Myint & Nirmalakhandan (2006)
Oppervlakte gebaseerde model (cilinders)	$\frac{dC}{dt} = k_{sbk} A = k_{sbk} \sqrt{C_0} \sqrt{C}$	Ksbk (dag-1)	Vavilin et al. (1996)

Note: In alle vergelijkingen is C de concentratie substraat, C_0 de concentratie substraat bij aanvang van het experiment (batch) of in het influent (cstr) en t de tijd.

Kinetische parameters In situ afbraak

Kinetische parameters verkregen uit de batch experimenten zijn vergeleken met parameters berekend uit resultaten gevonden in literatuur waarin vergelijkbare experimenten uitgevoerd zijn (tabel 59). Exacte procescondities en het ontwerp van zuiveringsinstallaties in de referenties is niet gespecificeerd in de betreffende referenties. De parameters zijn berekend door middel van lineaire regressie en de kleinste kwadraten methode.

TABEL 59 OVERZICHT VAN KINETISCHE PARAMETERS GEVONDEN IN DE IN SITU AFBRAAK STUDIES VAN CELLULOSE (PAPIER) VEZELS IN LITERAATUUR EN DIT ONDERZOEK

K_1 (eerste orde) [1/dag]	K_{sbk} (oppervlak) [1/dag]	Experimentele condities	Referentie
0,07	0,04	Vezels; Actief slib; T=17-22°C; pH 7,6-7,8; $[O_2]=2,80$ mg/L	Dit onderzoek
0,07	0,05	Papier; Actief slib; T=17-22°C; pH 7,6-7,8; $[O_2]=2,80$ mg/L	Dit onderzoek
0,14	0,08	Actief slib	Verachtert et al. (1982)
0,05	0,03	Bleached sulfide pulp, actief slib	Hofsten & Edberg (1971)
0,02	0,01	Actief slib	Edberg & Hofsten (1975)
0,06	0,03	Actief slib	Edberg & Hofsten (1975)
0,05	0,03	Vergister	Edberg & Hofsten (1975)
0,02	0,02	Actief slib 30°C	Edberg & Hofsten (1975)
0,02	0,02	Actief slib 17°C	Edberg & Hofsten (1975)

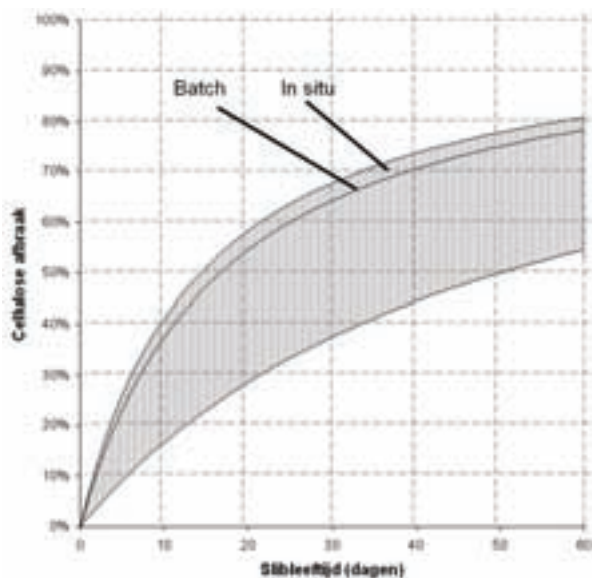
Te zien is dat er een grote spreiding is tussen de afbraaksnelheden in de verschillende experimenten. De snelheden die gevonden zijn in dit onderzoek liggen in hetzelfde bereik als de snelheden waargenomen in literatuur. Ze zijn wel aan de hoge kant vergeleken met literatuur.

Voorspelling in actief slib tank

Via eerste orde kinetiek

De kinetische parameters gevonden voor de *in situ* proeven in tabel 59, en de gevonden parameters voor de anaerobe batch proeven in afbeelding 40 kunnen gebruikt worden om de afbraak in een actief slib tank te beschrijven. Door middel van een massa balans over cellulose kan de afbraak beschreven worden. Er kan namelijk gezegd worden dat de afbraak van cellulose gelijk is aan het verschil tussen de aanvoer en afvoer van cellulose. Als eerste orde kinetiek aangenomen wordt dan kan de volgende grafiek geconstrueerd worden.

AFBEELDING 40 VOORSPELLING VAN DE AFBRAAK VAN CELLULOSE ALS FUNCTIE VAN DE SLIBLEEFTIJD (VASTE STOF RETENTIETIJD), GEBASEERD OP DE PARAMETERS VERKREGEN UIT DE BATCH AFBRAAK PROEVEN, IN SITU EXPERIMENTEN EN LITERATUUR



Te zien is dat onder gebruikelijke slijbleeftijden van 20 tot 30 dagen, 30 tot 70% van de ingaande cellulose omgezet wordt in de actief slib tanks. Voorspellingen aan de hand van gevonden kinetische parameters in de *in situ* experimenten en batch experimenten geven hogere waarden dan voorspellingen aan de hand van kinetische parameters die afgeleid zijn uit waarden in literatuur.

In de berekeningen van de afbraak in afbeelding 40 is de lag-tijd die nodig is voor de biomassa om zich te hechten aan de vezels, zoals die waargenomen is, niet meegenomen. Door een lag-tijd wordt de effectieve verblijftijd korter. Een lag-tijd zal dus zorgen voor een lagere afbraak. Dit effect zal bij kortere verblijftijden groter zijn dan bij langere verblijftijden.

VOORSPELLING EFFECT VAN ZEVEN OP ZUIVERINGSPROCES

Verskil met voorbezinktank

Zowel een zeef als voorbezinktank verwijderen vaste stof uit het influent voordat dit de actief slib tanks in stroomt. De moleculaire samenstelling, en daarmee potentieel de eigenschappen, van beide producten is heel verschillend. Huidige actief slib modellen (ASM) die gebruikt worden, gebruiken voor biologisch afbreekbare vaste stoffen (modelterm X_s) slechts één afbraaksnelheid. Zeven verwijderen selectief één (moleculair) component uit het influent, welke een veel lagere afbraaksnelheid heeft dan de “gemiddelde” afbraaksnelheid van de vaste stoffen in het influent (fractie X_s). De fractie cellulose kan in het geval van fijnzeven dus niet simpelweg van de fractie biologisch afbreekbare vaste stoffen (X_s) afgehaald worden.

Cellulose wordt niet geheel afgebroken in de actief slib tanks. Actief slib modellen kennen twee fracties voor vaste stoffen. De fractie X_s , welke biologisch afbreekbaar is en welke in het actief slib systeem vrijwel geheel wordt afgebroken, en fractie X_i , welke niet biologisch afbreekbaar is. Aangezien cellulose maar voor 30 tot 70% wordt omgezet betekent dit dus dat cellulose, in de ASM modeltermen, gedeeltelijk tot de fractie X_s en gedeeltelijk tot de fractie X_i hoort. Van het gedeelte cellulose dat wordt afgebroken (is dus afhankelijk van de cellulose hydrolyse snelheid en sibleeftijd) kan worden gezegd dat dit tot de fractie X_s hoort. Van het gedeelte cellulose dat niet wordt afgebroken kan gezegd worden dat dit tot fractie X_i hoort. Op deze manier kan dus de bijdrage van cellulose aan de fractie X_i en aan de fractie X_s berekend worden.

Als vervolgens aangenomen wordt dat een zeef alleen cellulose uit het influent verwijderd, kan het verwijderingsrendement van een zeef voor de fracties X_i en X_s berekend worden voor verschillende influent samenstellingen door de berekende bijdrage aan de fracties, van de oorspronkelijke fracties in het influent af te trekken. Deze aanpak is schematisch weergegeven in afbeelding 41.

AFBEELDING 41 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE BEREKENING VAN X_i EN X_s VERWIJDERING VAN EEN FIJNZEEF



Verwijderingsrendementen voor fijnzeven zijn berekend aan de hand van de influent samenstelling van Blaricum (locatie fijnzeef pilot) en standaard waarden in literatuur. De verwijdering van X_i en X_s zijn berekend voor de extreme waarden van cellulose afbraak bij verblijftijden tussen 20 en 30 dagen. Hiervan is het gemiddelde berekend (tabel 60). Deze berekende rendementen op de fracties X_i en X_s voor fijnzeven kunnen vergeleken worden met rendementen op X_i en X_s voor voorbezinktanks die gevonden zijn in literatuur.

TABEL 60

VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOOR XI EN XS VOOR EEN VOORBEZINKTANK (BOVEN) EN EEN FIJNZEEF (ONDER) BEREKEND AAN DE HAND VAN DE AFBREEKBAARHEID VAN HET ZEEFGOED VOOR VERSCHILLENDE INFLUENT SAMENSTELLINGEN. ALLE PROCESSEN MET VOORBEZINKTANK ZIJN ZONDER PRECIPITATIE

Voorbezinktank			
Verwijdering Xi (\pm S.D.)	Verwijdering Xs (\pm S.D.)	Verwijdering TSS (\pm S.D.)	Referentie
45% \pm 15% ¹	52% \pm 20% ¹	48% \pm 13% ¹	STOWA 99-13
44% \pm 29% ²	46% \pm 8% ²	46% \pm 14%	STOWA 06-13
35% \pm 7%	35% \pm 7%	35% \pm 7%	STOWA 98-29
67% ³	20% ³	35% \pm 7% ³	STOWA 96-20
Fijnzeef (350 μm) Blaricum			
Verwijdering Xi	Verwijdering Xs	Verwijdering TSS	Verhouding Xi/Xs (-)
	48%	40%	Xi/Xs = 1 (SIMBA model rwzi Blaricum)

¹ Onder 6 verschillende zuiveringen

² Berekend aan de hand van BZV/CZV verwijdering. Aangenomen is dat Xs = BZV-S_s en dat S_s = 0,8*opgelost CZV (STOWA 99-13)

³ Theoretische verwijdering, niet gebaseerd op experimentele waarden.

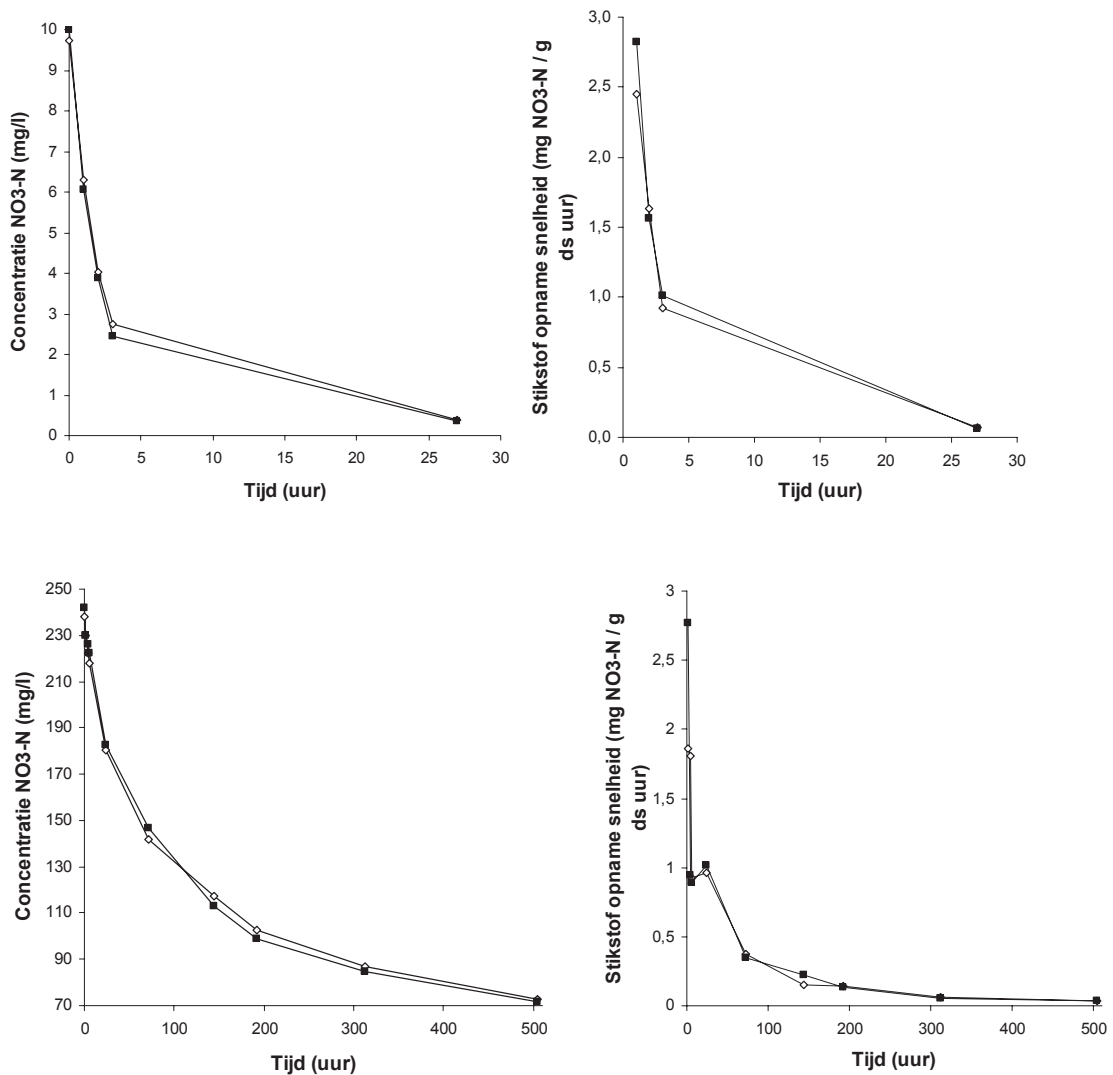
Het rendement van een fijnzeef op Xi en Xs is bij de gebruikte aannames afhankelijk van de influent samenstelling (verhouding Xi/Xs).

Bovenstaande betekent dat een voorbezinktank en fijnzeef zich hetzelfde zouden gedragen in combinatie met biologische zuivering en dat de biologische slibproductie gelijk is.

Denitrificatie

Om het effect van zeven van influent ten opzichte van voorbezinken te onderzoeken op de denitrificatie, is de denitrificatie snelheid gemeten van voorbezinken en gezeefd influent van rwzi Hilversum (alleen huishoudelijk afvalwater, 85.175 i.e. à 136 TZV) met actief slib van rwzi Blaricum als ent (afbeelding 42).

AFBEELDING 42 DENITRIFICATIE SNELHEID VAN GEZEefd WATER (◇) EN VOORBEZONKEN WATER (■) BIJ VERSCHILLENDE STARTCONCENTRATIES NITRAAT. LINKS DE CONCENTRATIE NITRAAT EN RECHTS DE NITRAAT AFBRAAKSNELHEID. LET EROP DAT DE SCHAAL VAN DE ASSEN VERSCHILT TUSSEN DE EXPERIMENTEN



Er is geen verschil te zien tussen de denitrificatiesnelheid van voorbezonden en gezeefd influent. De denitrificatiesnelheid is bij de start van het experiment het grootst en neemt dan snel af. De snelle denitrificatie gedurende de eerste paar uur is afkomstig van denitrificatie met behulp van opgelost CZV. Hierin wordt geen verschil verwacht tussen gezeefd en voorbezonden influent. De afbraak hierna komt gedeeltelijk door hydrolyse van de nog aanwezige vaste stoffen in het gezeefde/voorbezonden influent en gedeeltelijk door endogene respiratie van het toegevoegde actief slib.

Rendementen op zwevende stof van het voorbezinken en zeven waren respectievelijk 59% en 59% en 50% en 39%. De droge stof concentraties van het voorbezonden en gezeefde water bedroegen respectievelijk 60 mg/l en 60 mg/l; 140 mg/l en 170 mg/l.

In het denitrificatie proces wordt H⁺ opgenomen wat leidt tot een verhoging van de pH welke de denitrificatie kan remmen. De pH liep in geen van de experimenten op tot boven de pH 8,5.

Aan de hand van de minimaal benodigde hoeveelheid CZV voor denitrificatie (2,83 g CZV / g $\text{NO}_3\text{-N}$) kan de hoeveelheid verbruikt CZV berekend worden. Hoeveelheden CZV die omgezet zijn gedurende de eerste drie uur van de denitrificatie bedragen voor voorbezinken en zeven respectievelijk: 19,7 mg/l en 21,3 mg/l; 45,3 mg/l en 45,0 mg/l.. Er is geen significant verschil te zien tussen CZV of NO_3 opname tussen voorbezinken en gezeefd water. Dit is een indicatie dat een voorbezinktank en een fijnzeef eenzelfde effect hebben op de denitrificatie in het actief slib proces.

5 DISCUSSIE

CELLULOSE VERWIJDERING DOOR FIJNZEVEN

Het is gevonden in dit onderzoek dat een fijnzeef cellulose uit het influent kan verwijderen met een zuiverheid van ongeveer 80%. Dit is een stuk hoger dan bij primair slib. Het aandeel cellulose in primair slib is minder dan 30%. Ook is gevonden dat het zeefgoed zich in fermentatie experimenten zich hetzelfde gedraagt als wc papier. Dit is een indicatie dat het groten deels om hetzelfde materiaal gaat.

Als deze fijnzeven al het cellulose aanwezig in het influent verwijderen zou dit betekenen dat het aandeel cellulose in het influent van RWZI Blaricum 32% is van de zwevende stof in het influent. Dit komt overeen met het gemiddelde aandeel cellulose van 35% van de zwevende stof gevonden in het influent van huishoudelijk afvalwater zuiveringsinstallaties gevonden door Maki (1952). En is iets lager dan de 50% die geschat is door Ramasamy et al. (1981).

AFBRAAKSNELHEID CELLULOSE

Door middel van *in situ* experimenten is aangetoond dat cellulose afgebroken wordt in de actief slib tanks. Cellulose vezels en stukken papier worden met dezelfde snelheid afgebroken. Dit betekent dat de papierstructuur aanhechtingsplaatsen voor biomassa niet afschermt en bacteriën in staat zijn de papierstructuur binnen te dringen.

Er is een grote spreiding tussen afbraaksnelheden gevonden in literatuur. Eerste orde afbraak constanten tussen 0,02 en 0,14 (1/dag) zijn waargenomen (Edberg & Hofsten 1975; Hofsten & Edberg 1971; Verachtert et al. 1982). Dit is gedeeltelijk te verklaren door de verschillende proces condities van de experimenten, hoewel deze vaak niet nauwkeurig gespecificeerd zijn. Afbraaksnelheden die waargenomen zijn in de actief slib tanks onder aerobe condities door middel van de *in situ* experimenten komen overeen met de afbraaksnelheden gevonden voor wc papier en zeefgoed onder anaerobe condities in de batch fermentatie experimenten. Dit geeft aan dat de afbraak onder gecultiveerde condities vergelijkbaar is met de afbraak in de actief slib tanks. Ook wijst dit erop dat de afbraaksnelheid onder aerobe en anaerobe condities vergelijkbaar is.

Of de afbraaksnelheid onder aerobe, anaerobe en anoxische condities in de actief slib tanks inderdaad hetzelfde is zal verder onderzocht moeten worden. Dit zou bijvoorbeeld onderzocht kunnen worden door *in situ* experimenten uit te voeren in de verschillende zones in een actief slib tank. Ook zou dit onderzocht kunnen worden in batch opstellingen welke onder anaerobe, aerobe of anoxische (toevoeging van KNO_3) condities gehouden worden. In het geval van de anoxische condities moet de concentratie NO_3 wel nauwkeurig gereguleerd worden zodat NO_3 niet uitgeput raakt of in te hoge concentraties aanwezig is. De afbraak kan in een dergelijk experiment alleen afgeleid worden aan de hand van de vaste stof afbraak. Er moet dan rekening gehouden worden met verschillende biomassa yields voor de verschillende condities (hogere biomassa yield onder aerobe en anoxische condities dan onder anaerobe condities).

De gevonden afbraaksnelheid van microcrystalline cellulose is hoger dan de afbraaksnelheid van wc papier en zeefgoed. Dit zou verklaard kunnen worden door het grotere specifieke oppervlak van de microcrystalline cellulose deeltjes (de microcrystalline cellulose deeltjes zijn kleiner). De specifieke afbraaksnelheid (eerste orde afbraak constante) gevonden voor verschillende concentraties (5 en 10 g/L) microcrystalline cellulose is hetzelfde. Dit bevestigt dat de beschikbaarheid van substraat limiterend was in de batch experimenten. Door andere onderzoekers is ook vaak gevonden dat de specifieke afbraaksnelheid onafhankelijk is van de beginconcentratie (Hu et al. 2005).

Bijna volledige afbraak van de verschillende geteste cellulose substraten is mogelijk in zowel de gecultiveerde batch experimenten als in de *in situ* experimenten.

AFBRAAK IN RWZI

Aan de hand van de gevonden kinetische parameters voor eerste orde kinetiek is de fractie cellulose vezel die afgebroken wordt in de actief slib tanks berekend. Bij slibleeftijden tussen 20 en 30 dagen wordt een afbraak voorspeld van 30 tot 70% bij zowel het oppervlakte limiterende model als bij eerste orde kinetiek.

Aan de hand van massa balansen en concentraties cellulose in slib wordt een afbraak voorspeld van ongeveer 40-70%. De voorspelde afbraak in dat geval is iets lager dan de afbraak voorspeld aan de hand van de afbraak kinetiek (gevonden door experimenten in dit onderzoek). Dit zou verklaard kunnen worden door een lag-tijd voordat cellulose afbraak begint. De aanwezigheid van een lag-tijd is verwaarloosd in het geval van de voorspellingen aan de hand van de afbraak kinetiek. Gevonden is dat de lag-tijd in *in situ* en batch experimenten ongeveer 1 week is. Door deze lag-tijd zal de daadwerkelijke afbraak lager zijn dan voorspeld zonder lag-tijd.

Het gebied waarin de afbraak voorspeld wordt is redelijk groot (30-70%). Dit onder andere doordat de afbraak onderzocht is in heel verschillende proefopzetten en met (slib van) verschillende afvalwater zuiveringsinstallaties. De voorspellingen komen overeen met de voorspelling van Verachtert et al. (1982), die voorspelden dat 50% van de cellulose wordt afgebroken in een afvalwater zuiveringsinstallatie.

EFFECT VAN CELLULOSE VERWIJDERING OP ZUIVERINGSPROCES

Verschillen in verwijderingsrendement op de fractie afbreekbare vaste stof (X_s) en niet afbreekbare vaste stof (X_i) tussen een voorbezinktank en fijnzeef zijn met elkaar vergeleken. De aanname dat het zeefgoed zich precies hetzelfde gedraagt als cellulose is gebruikt. Dit is ook gevonden in de anaerobe batch experimenten en wordt ook verwacht aangezien 80% van het zeefgoed uit cellulose bestaat. Gevonden wordt dat de rendementen afhankelijk zijn van de influent samenstelling. Dit komt doordat aangenomen wordt dat een fijnzeef alleen cellulose vezels verwijderd en de absolute verwijdering van X_i en X_s alleen afhankelijk is van het rendement op het totaal gesuspendeerde bestanddelen (dus vaste hoeveelheid X_i en X_s , onafhankelijk van influent samenstelling). Hierdoor is het relatieve rendement afhankelijk van de hoeveelheid (absoluut) X_i en X_s in het influent (influent samenstelling).

Als de rendementen berekend worden voor de locatie van de fijnzeef pilot (Blaricum), waar gevonden is dat het zeefgoed bijna volledig uit cellulose bestaat, wordt ongeveer hetzelfde rendement op X_i en X_s gevonden als vaak voor voorbezinktanks gevonden wordt. Dit zou betekenen dat bij eenzelfde verwijdering van vaste stoffen, de verwijdering van de fracties X_i en X_s ongeveer hetzelfde is bij een voorbezinktank en fijnzeef. Dit zou dus ook betekenen dat het effect op de biologische nutriënten verwijdering en slibproductie ongeveer hetzelfde zijn.

Deze conclusies zijn echter enigszins voorbarig omdat de pilot slechts op een locatie gedraaid heeft en de zeefgoed samenstelling, en dus Xi en Xs verwijdering, op een andere locatie of onder andere procescondities, mogelijk heel anders is. Ook is de samenstelling van het zeefgoed hoogst waarschijnlijk afhankelijk van het rendement op vaste stof verwijdering en van de influent samenstelling. De fijnzeef pilot in Blaricum had een rendement op vaste stoffen van ongeveer 40%. Bij andere rendementen op vaste stof is de samenstelling, en dus het rendement op de fracties Xi en Xs, waarschijnlijk anders.

In de lab schaal experimenten is geen verschil gevonden tussen de denitrificatie snelheid van voorbezonden en gezeefd water. Volgens Nowak (1999) is het ook vooral opgelost CZV (fractie Ss) die zorgt voor het belangrijkste deel van de denitrificatie en speelt de fractie Xs maar een kleine rol. Aangezien het verschil tussen fijnzeven en voorbezinktanks alleen betrekking heeft op de fractie Xs en Xi, wordt op grond van de resultaten van Nowak et al. (1999) ook geen groot verschil verwacht op de denitrificatie snelheid tussen verschillende methoden van vaste stof verwijdering.

Of de fractie Xs inderdaad weinig effect heeft op de denitrificatie of fosfaat verwijdering zal verder onderzocht moeten worden.

Indien het rendement op de fracties Xi en Xs niet verandert in het geval van gebruik van een fijnzeef, dan blijven de huidige actief slib modellen bruikbaar.

Als het slechts het doel is de nutriënt concentratie (verwijdering) in een situatie met zeef te modelleren, dan zouden ook de huidige actiefslib modellen gebruikt kunnen worden. Wel moet dan gecompenseerd worden voor een andere verwijdering van de fracties Xi en Xs.

Als er grote verschillen zouden zijn tussen het rendement op de fracties Xi en Xs bij een voorbezinktank en zeef, dan worden de grootste verschillen verwacht qua slibproductie en daardoor de slibleeftijd.

6 CONCLUSIE

Vastgesteld is dat zeefgoed uit ongeveer 80% cellulose bestaat terwijl primair slib uit minder dan 30% cellulose bestaat. Het rendement op vaste stoffen is ongeveer vergelijkbaar. Dit betekent dat het effluent van een voorbezinktank nog veel cellulose vezels bevat. Door middel van concentraties cellulose in slib is ook gevonden dat actief slib cellulose vezels bevat. Door middel van lab schaal batch experimenten, *in situ* experimenten en massa balansen is gevonden dat cellulose gedeeltelijk afgebroken wordt in het zuiveringsproces. Afbraak wordt geschat op 40 tot 70% bij gebruikelijke verblijftijden. Dit betekent dat cellulose zich gedeeltelijk gedraagt als inert materiaal (fractie Xi uit ASM modellen) en gedeeltelijk als omzetbaar materiaal (fractie Xs uit ASM modellen). Deze verdeling tussen Xi en Xs komt vooral door beperkingen in actief slib modellen. Biologisch gezien is cellulose volledig afbreekbaar. Huidige actief slib modellen bieden echter niet de mogelijkheid om te corrigeren voor langzamere hydrolyse snelheden. Hierdoor komt een deel van de cellulose terug in de modellen als Xi. Voor de situatie van rwzi Blaricum, waar het zeefgoed verkregen is en de fijnzeef pilot gedraaid heeft, is het rendement op de fracties Xi en Xs berekend. Gevonden is dat het rendement op de fractie Xs iets groter is dan het rendement op de fractie Xi. Verschillen in denitrificatie snelheid tussen voorbezonden en gezeefd water zijn niet waargenomen in lab schaal experimenten.

REFERENTIES (HORENDE BIJ CELLULOSE AFBRAAK STUDIE)

Bagnara, Gaudin, Belaich (1987), Physiological properties of *cellulomonas fermentans*, a mesophilic cellulolytic bacterium, *applied microbiology and biotechnology* 26, pp170-176

Bouzas, Ribes, Ferrer, Seco (2007), Fermentation and elutriation of primary sludge: Effect of SRT on process performance, *Water research* 41, pp747-756

Budhavaram & Fan (2009), Production of lactic acid from paper sludge using acid-tolerant, thermophilic *Bacillus coagulan* strains, *Bioresource technology* 100, pp5966-5972

Burrell, O'Sullivan, Song, Clarke, Blackall (2004), Identification detection and spatial resolution of clostridium populations responsible for cellulose degradation in a methanogenic landfill leachate bioreactor, *Applied and environmental microbiology* 70(4), pp2414-2419

Champagne & Li (2009), Enzymatic hydrolysis of cellulosic municipal wastewater treatment process residuals as feedstocks for the recovery of simple sugars, *Bioresource technology* 100, pp5700-5706

Cheung & Anderson (1997), Laboratory investigation of ethanol production from municipal primary wastewater solids, *Bioresource technology* 59, pp81-96

Cokgor, Oktay, Tas, Zengin, Orhon (2009), Influence of pH and temperature on soluble substrate generation with primary sludge fermentation, *Bioresource Technology* 100, pp380-386

Contois (1959), Kinetics of bacterial growth: relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures, *Journal of genetic microbiology* 21, pp40-50

Edberg & Hofsten (1975), Cellulose degradation in wastewater treatment, *Journal WPCF* 47(5), pp1012-1020

Fleischer & Larsson (1974), Cellulose degradation in different types of limnic environments, *Hydrobiologia* 44(4), pp523-536

Gijzen, Zwart, Verhagen, Vogels (1988), High-rate two phase process for the anaerobic degradation of cellulose employing rumen microorganisms for an efficient acidogenesis, *biotechnology and bioengineering* 31, pp418-425

Goel, Mino, Satoh, Matsuo (1998), Enzyme activities under anaerobic and aerobic conditions in activated sludge sequencing batch reactor, *Wat. Res.* 32(7), pp2081-2088

Gujer, Henze, Mino, van Loosdrecht (1999), Activated sludge model no. 3, *Water Science & Technology* 39(1), pp183-193

Henze, Gujer, Mino, Matsuo, Wentzel, Marais, van Loosdrecht (1999), Activated sludge model no. 2d, *asm2d*, *Water Science & Technology* 39(1), pp165-182

Henze & Harremoes (1990), Chemical-biological nutrient removal – the HYPRO concept, *chemical water and wastewater treatment*, pp499-510

Henze & Mladenovski (1991), Hydrolysis of particulate substrate by activated sludge under aerobic, anoxic and anaerobic conditions, *Wat. Res.* 25(1), pp61-64

Hoeniger (1985), Microbial decomposition of cellulose in acidifying lakes of south central ontario, *applied and environmental microbiology* 50(2), pp 315-322

Hofsten & Edberg (1972), Estimating the rate of degradation of cellulose fibers in water, *OIKOS* 23, pp29-34

Honda, Miyata, Iwahori (2002), Recovery of biomass cellulose from waste sewage sludge, *j Mater Cycles Waste Manag* 4, pp46-50

Hu, Wang, Yu (2004), Anaerobic degradation of cellulose by rumen microorganisms at various pH values, *biochemical engineering journal* 21, pp59-62

Hu, Yu, Zhu (2005), Influence of particle size and pH on anaerobic degradation of cellulose by ruminal microbes, *international biodeterioration & biodegradation* 55, pp233-238

Jönsson & Jansen (2006), Hydrolysis of return sludge for production of easily biodegradable carbon: effect of pre-treatment, sludge age and temperature, *Water Science & Technology* 53(12), pp47-54

Jönsson, Pottier, Dimitrova, Nyberg (2007), Utilising laboratory experiments as a first step to introduce primary sludge hydrolysis in full-scale, *Preceedings of 10th IWA Specialised conference on design, operation and economics of large wastewater treatment plants*, pp129-136

Jorgensen (1990), Biological hydrolysis of sludge from primary precipitation, *Chemical water and wastewater treatment*, pp511-520

Kato, Haruta, Cui, Ishii, Igarashi (2004), Effective cellulose degradation by a mixed culture system composed of a cellulolytic clostridium and aerobic non cellulolytic bacteria, *FEMS microbiology ecology* 51, pp133-142

Kleerebezem, Rodriguez, Temudo, van Loosdrecht (2008), Modeling mixed culture fermentations; the role of different electron carriers, *Water Science & Technology* 57(4), pp 493-497

Kleijntjens, de Boks, Luyben (1986), A continuous thermophilic cellulose fermentation in an upflow reactor by a clostridium thermocellum containing mixed culture, *biotechnology letters* 8(9), pp667-672

Leschine (1995), Cellulose degradation in anaerobic environments, *annual reviews microbiology* 49, pp399-426.

Liu, Zhang, Fang (2003), Thermophilic H₂ production from a cellulose-containing wastewater, *Biotechnology letters* 25, pp365-369

Lynd, Grethlein, Wolkin (1989), fermentation of cellulosic substrates in batch and continuous culture by clostridium thermocellum, *applied and environmental microbiology* 55(12), pp3131-3139

- Lynd, Weimer, van Zyl, Pretorius (2002), Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology 66(3), microbiology and molecular biology reviews 66(3), pp506-577
- Maki (1952), Experiments on the microbiology of cellulose decomposition in a municipal sewage plant, Anthonie van Leeuwenhoek, pp185-200
- Marani, Renzi, Ramadori, Braguglia (2004), Size fractionation of CZV in urban wastewater from a combined sewer system, Water Science & Technology 50(12), pp79-86
- Mino, San Pedro, Matsuo (1995), Estimation of the rate of slowly biodegradable CZV (SBCZV) hydrolysis under anaerobic, anoxic and aerobic conditions by experiments using starch as model substrate, Water Science & Technology 31(2), pp95-103
- Morgenroth, Kommedal, Harremoes (2002), Processes and modeling of hydrolysis of particulate organic matter in aerobic wastewater treatment – a review, Water Science & Technology 45(6), pp25-40
- Mourino, Akkarawongsa, Weimer (2001), Initial pH as a determinant of cellulose digestion rate by mixed ruminal microorganisms in vitro, J Dairy Sci 84, pp848-859
- Murray (1986), Symbiotic relationship of bacteroides cellulosolvens and clostridium saccharolyticum in cellulose fermentations, Applied and environmental microbiology 51(4), pp710-714
- Myint & Nirmalakhandan (2006), Evaluation of first-order, second-order, and surface-limiting reactions in anaerobic hydrolysis of cattle manure, Environmental Engineering science 23(6), pp970-980
- Ng, Weimer, Zeikus (1977), Cellulolytic and physiological properties of clostridium thermocellum, Archives of microbiology 114, pp1-7
- Noike, Edno, Chang, Yaguchi, Matsumoto (1985), Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion, Biotechnology and Bioengineering 17, pp1482-1489
- Nowak, Svardal, Franz, Kuhn (1999), Degradation of particulate organic matter – A comparison of different model concepts, Water Science & Technology 39(1), pp119-127
- Op den Camp, Verhagen, Kivaisi, de Windt, Lubberding, Gijzen, Vogels (1988), Effects of lignin on the anaerobic degradation of (ligno) cellulosic wastes by rumen microorganisms, applied microbiology and biotechnology 29, pp408-412
- Orhon, Cokgor, Sozen (1999), Experimental basis for the hydrolysis of slowly biodegradable substrate in different wastewaters, Water Science & Technology 39(1), pp87-95
- O'Sullivan, Burrell, Clarke, Blackall (2007), A survey of the relative abundance of specific groups of cellulose degrading bacteria in anaerobic environments using fluorescence in situ hybridization, journal of applied microbiology 103, pp1332-1343
- Pavlostathis, Miller, Wolin (1988), fermentation of insoluble cellulose by continuous cultures of ruminococcus albus, applied and environmental microbiology 54(11), pp2655-2659

- Pavlostathis & Gossett (1985), A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge, *Biotechnology and Bioengineering* 28, pp1519-1530
- Pavlostathis & Giraldo-Gomez (1991), Kinetics of anaerobic treatment: a critical review, *Critical reviews in environmental control* 21(5,6), pp411-490
- Ramasamy, Meyers, Bevers, Verachtert (1981), Isolation and characterization of cellulolytic bacteria from activated sludge, *journal of applied bacteriology* 51, pp475-481
- Rodriguez, Kleerebezem, Lema, van Loosdrecht (2005), Modeling product formation in anaerobic mixed culture fermentations, *Biotechnology and bioengineering* 93(3), pp592-606
- Roeleveld & van Loosdrecht (2002), Experience with guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands, *Water Science & Technology* 45(6), pp77-87
- Ruiken & Breuer (2009), Zeven als alternatief voor voorbezinken?, *Afvalwaterwetenschap* 8(3), pp188-195
- Rusten & Odegaard (2006), Evaluation and testing of fine mesh sieve technologies for primary treatment of municipal wastewater, *Water Science & Technology* 54(10), pp31-38
- Sanders, Geerking, Zeeman, Lettinga (2000), Anaerobic hydrolysis kinetics of particulate substrates, *Water Science & Technology* 41(3), pp17-24
- Schwarz (2001), The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria, *Applied microbiol Biotechnol* 56, pp634-649
- Shimizu, Kudo, Nasu (1993), Anaerobic waste-activated sludge digestion – a bioconversion mechanism and kinetic model, *Biotechnology and Bioengineering* 41, pp1082-1091
- Song, Clarke, Blackall (2005), Concurrent microscopic observations and activity measurements of cellulose hydrolyzing and methanogenic populations during the batch anaerobic digestion of crystalline cellulose, *Biotechnology and Bioengineering* 91(3), pp369-378
- Sophonsiri & Morgenroth (2004), Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal industrial and agricultural wastewaters, *Chemosphere* 55, pp691-703
- Soundar & Chandra (1987), Cellulose degradation by a mixed bacterial culture, *journal of industrial microbiology* 2, pp257-265
- STOWA (1999), *Influentkarakterisering van ruw en voorbehandeld afvalwater. De invloed van voorbezinking en voorprecipitatie*, ISBN 90.5773.064.2
- STOWA (2006), *Geavanceerde voorzuivering van afvalwater; praktijktoepassing op de RWZI Amstelveen*, ISBN 90.5773.346.3
- STOWA (1998), *Fysische/chemische voorzuivering van afvalwater. Identificatie en evaluatie van zuiveringsscenario's gebaseerd op fysisch/chemische voorzuivering*, ISBN 90.5773.040.5

STOWA (1996), Varianten op voorbezinking. Een haalbaarheidsstudie, ISBN 90.74476.57.0

Sun & Cheng (2002), Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresource Technology* 83, pp1-11

Temudo, Kleerebezem, van Loosdrecht (2007), Influence of the pH on (open) mixed culture fermentations of glucose: a chemostat study, *biotechnology and bioengineering* 98(1), pp69-79

Ucisk & Henze (2008), Biological hydrolysis and acidification of sludge under anaerobic conditions: The effect of sludge type and origin on the production and composition of volatile fatty acids, *Water research* 42, pp3729-3738

Updegraff (1969), Semimicro determination of cellulose in biological materials, *Analytical biochemistry* 32, pp420-424

Vavilin, Rytov, Lokshina (1996), A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter, *Bioresource technology* 56, pp229-237

Vavilin, Rytov, Lokshina (1997), Two-Phase model of hydrolysis kinetics and its application to anaerobic degradation of particulate organic matter, *Applied biochemistry and biotechnology* vol. 63-65, pp45-57

Veeken, Kalyuzhnyi, Scharff, Hamelers (2000), Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste, *journal of environmental engineering*, pp1076-1081

Verachtert, Ramasamy, Meyers, Bevers (1982), Investigations on cellulose biodegradation in activated sludge plants, *journal of applied bacteriology* 52, pp185-190

von Munch, Keller, Lant, Newell (1999), Mathematical modelling of prefermenters – I. Model development and verification, *Water Resource* 33(12), pp2757-2768

Vinzant, Adney, Grohmann, Rivard (1990), Aerobic and anaerobic digestion of processed municipal solid waste, *applied biochemistry and biotechnology* 24/25, pp765-771

Weimer (1992), Cellulose degradation by ruminal microorganisms, *Critical reviews in biotechnology* 12(3), pp189-223

Weimer & Zeikus (1976), fermentation of cellulose and cellobiose by *clostridium thermocellum* in the absence and presence of *methanobacterium thermoautotrophicum*, *applied and environmental microbiology*, pp289-297

Winkler, Muller-Rechberger, Nowak, Svoldal, Wandl (2001), A new approach towards modelling of the carbon degradation cycle at two-stage activated sludge plants, *Water Science & Technology* 43(7), pp19-27