

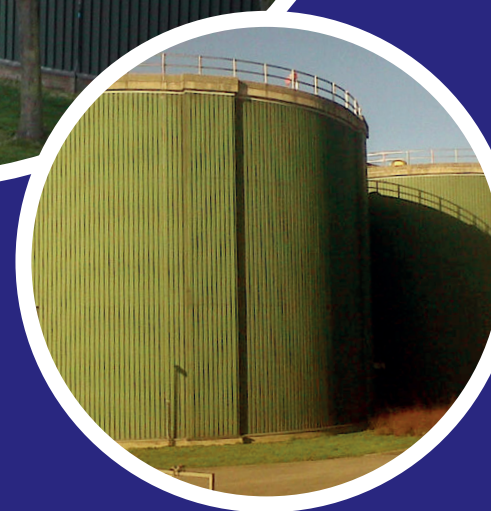
stowa

HAALBAARHEID VAN THERMOFIELE SLIBGISTING IN NEDERLAND



RAPPORT

2014
23



HAALBAARHEID VAN THERMOFIELE
SLIBGISTING IN NEDERLAND

RAPPORT

2014

23

ISBN 978.90.5773.664.3



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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

PROJECTUITVOERING

Freek Kramer - Witteveen+Bos
Anna Veldhoen - Witteveen+Bos
Davey Smet - Colsen B.V.

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Etteke Wypkema - Waterschap Brabantse Delta
Roger Vingerhoeds - Waterschap Brabantse Delta
Levien Van Dixhoorn - Waterschap Brabantse Delta
Marc Augustijn - Waterschap Scheldestromen
Inge van der Velde - Waterschap Reest en Wieden
Rutger Dijsselhof - Waterschap Reest en Wieden
Victor Claessen - Waterschap De Dommel
Jules van Lier - Technische Universiteit Delft
Ruud van Dalen - Waterschap Vallei en Veluwe
George Zoutberg - Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Yede van der Kooij - Wetterskip Fryslân
Cora Uijterlinde - STOWA

FOTO OMSLAG Waterschap Brabantse Delta

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2014-23
ISBN 978.90.5773.664.3

COPYRIGHT De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

DISCLAIMER Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

TEN GELEIDE

De waterschappen willen in 2020 minstens 40% van het energieverbruik zelf opwekken. In de Meerjarenaafspraken energie-efficiency (2008), Klimaatakkoord (2010), Lokale Klimaatagenda (2011) Green Deal (2011), Ketenakkoord Fosfaat en recentelijk het SER Energieakkoord (2013) zijn beleidsmatige afspraken gemaakt over energie- en fosfaatterugwinning. Grondstoffen-terugwinning, energie- en kostenbesparing zijn belangrijke uitdagingen voor de toekomst.

Op veel grotere rwzi's in Nederland wordt zuiveringsslib vergist om biogas te produceren voor elektriciteitsproductie en om de hoeveelheid af te zetten slib en daarmee ook de kosten te verlagen. De procestemperatuur in de slibgistingstanks varieert hierbij tussen de 33 en 35 °C. Dit wordt mesofiele vergisting genoemd. Bij waterschappen staat de toepassing van thermofiele gisting (rond 55°C) in de belangstelling om de energiebalans van waterzuivering te verbeteren en op operationele lasten te besparen.

In 2012 heeft STOWA een business case gepubliceerd voor de toepassing van thermofiele gisting van communaal primair en secundair slib in Nederland. De business case liet zien dat de omschakeling van mesofiele gisting naar thermofiele gisting een daling van de specifieke slibverwerkingskosten op zou kunnen leveren. Voor een betere onderbouwing van de uitgangspunten van de business case is onderzoek op praktijkschaal uitgevoerd op rwzi Bath van Waterschap Brabantse Delta en is er labschaalonderzoek uitgevoerd ter bevestiging van de resultaten.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat thermofiele slibgisting een stabiel proces is met een hogere biogasopbrengst en drogestofafbraak dan mesofiele slibgisting. Tijdens het praktijkonderzoek is bij thermofiele slibgisting een grotere toename van stikstof in de retourstromen gemeten dan was voorspeld. Op basis van het praktijkonderzoek is de business case opnieuw doorgerekend. Hieruit bleek een langere terugverdientijd voor alle varianten dan in de oorspronkelijke business case. De berekende terugverdientijden van de beschouwde cases variëren tussen 4 en 12 jaar. De terugverdientijd van de thermofiele gisting in plaats van mesofiele gisting op een rwzi met een capaciteit van 490.000 i.e. bedraagt nu 8 jaar. De schaalgrootte en de mogelijkheid tot het vergisten van slib van andere locaties hebben hierop grote invloed. Ook de biologische capaciteit van de waterlijn om extra stikstof te verwijderen heeft een zeer belangrijk positief effect op de terugverdientijd.

Het concept biedt nog steeds kansen voor de waterschappen om doelmatig aan de Klimaatakkoorddoelstellingen en MJA-3 afspraken te voldoen. Met de werkgroep 'Energiefabriek van de 'Grondstoffenfabriek' wordt de toepassing van het concept daarom verder verkend en uitgewerkt.

Joost Buntsma,
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Bij waterschappen staat de toepassing van thermofiele gisting (ca. 55°C) in plaats van mesofiele gisting (33-35°C) in de belangstelling, om de energiebalans van waterzuivering te verbeteren en op operationele lasten te besparen.

In 2012 heeft STOWA een businesscase gepubliceerd voor de toepassing van thermofiele gisting van communaal primair en secundair slib in Nederland. De business case laat zien dat de omschakeling van mesofiele gisting naar thermofiele gisting een daling van de specifieke slibverwerkingskosten oplevert. Voor een betere onderbouwing van de uitgangspunten is onderzoek uitgevoerd op labschaal en op praktijkschaal op rwzi Bath ter bevestiging van de resultaten.

ONTWIKKELINGEN IN NEDERLAND

Sinds het afronden van de businesscase in 2012 zijn de volgende ontwikkelingen geweest rondom thermofiele slibgisting op rwzi Bath en op andere locaties in Nederland:

- op rwzi Leeuwarden (Wetterskip Fryslân) is pilotonderzoek uitgevoerd naar thermofiele vergisting van secundair slib in combinatie met thermische drukhydrolyse;
- op rwzi Echten (waterschap Reest en Wieden) is de eerste thermofiel-mesofiele slibvergister in Nederland opgestart;
- voorafgaand aan het praktijkonderzoek op rwzi Bath is pilotonderzoek uitgevoerd naar thermofiele slibgisting.

In alle gevallen heeft een stabiel thermofiel vergistingsproces plaatsgevonden.

PRAKTIJKONDERZOEK

Een volledig rapport van het praktijkonderzoek op rwzi Bath is opgenomen in de opgenomen in de Hydrotheek [ref. 10]. In het voorliggende STOWA-rapport zijn de belangrijkste bevindingen samengevat. Het praktijkonderzoek startte met een gelijkloop, waarbij beide gistingstanks onder mesofiele condities functioneerden. Uit de gelijkloop bleek dat de tanks gelijkwaardig draaien, er is dus een eerlijke vergelijking gemaakt.

Tijdens de opwarmingsfase is de temperatuur van de thermofiele gistingstank in 18 dagen verhoogd naar 52°C. Van dag 13 tot en met dag 18 is de voeding aan beide tanks tijdelijk stopgezet om de benodigde hoeveelheid warmte te beperken en verzuring te voorkomen. De temperatuur van 52°C kon door technische knelpunten niet worden vastgehouden. Tijdens het gehele onderzoek varieerde de temperatuur tussen 48°C en 52°C.

Na de opwarmingsfase volgde de aanpassingsfase. Theoretisch eindigt deze fase wanneer het proces weer in steady state is. Dit is onder meer meetbaar door een stabiele vetzuurconcentratie. Een stabiele vetzuurconcentratie is tijdens het onderzoek niet bereikt. De laatste vijf weken zijn aangehouden als vergelijkingsperiode, omdat de daling toen gering was. De conclusies over het verschil tussen mesofiele en thermofiele slibgisting zijn gebaseerd op deze periode.

Tijdens de vergelijkingsperiode was er een duidelijk verschil tussen de mesofiele en de thermofiele gistingstank. De biogasproductie van de thermofiele tank was 20% hoger dan die van de mesofiele tank. De afbraak van organisch drogestof was 12,9% hoger in de thermofiele tank dan in de mesofiele tank (51% respectievelijk 45%).

Tijdens het onderzoek is de ammoniumconcentratie in het centraat van het uitgegiste slib gemeten. Het verschil tussen de mesofiele en de thermofiele tank bleek groter dan verwacht. De concentratie in de thermofiele tank bleef onder de kritische grens, dus dit verschil is niet relevant voor de stabiliteit van de gisting. Wel geeft de grotere stikstofvracht effect op de dimensionering van de deelstroombehandeling. Een sluitende stikstofbalans kan op basis van het onderzoek niet worden opgesteld. Dit is wel nodig om verdere uitspraken te doen over het vrijkomen van stikstof.

Het methaangehalte van het biogas is voor beide gistingstanks gemeten. Tijdens de vergelijkingsperiode was er geen significant verschil. Het H₂S-gehalte bedroeg 80 ppm in het biogas uit de thermofiele tank en 68 ppm in dat uit de mesofiele tank. Deze gehalten zijn relatief laag. Het lage H₂S-gehalte kan worden verklaard doordat op rwzi Bath chemische P-verwijdering plaatsvindt door het doseren van ijzerzouten. In de gisting komt het ijzer vrij, waarna zwavel wordt vastgelegd in FeS. Hierdoor komt het niet vrij als H₂S.

De slibontwatering is niet uitgebreid onderzocht. Wel zijn enkele verkennende proeven op de zeefbandpersen uitgevoerd. De conditionering (type PE, menging, wachttijd et cetera) tijdens deze proeven was gelijk aan die voor mesofiel slib. Tijdens de ontwateringsproeven bleken de ontwateringseigenschappen van het thermofiele slib echter anders dan die van het mesofiele slib. De proeven op rwzi Bath wijzen in de richting van een afname van de ontwaterbaarheid na thermofiele slibgisting. Om het effect op ontwaterbaarheid met meer zekerheid te kunnen vaststellen is verder onderzoek nodig. Aandachtspunten hierbij zijn conditionering en full-scale ontwatering.

LABSCHAALONDERZOEK

In aanvulling op het praktijkonderzoek zijn labschaalproeven uitgevoerd door de TU Delft. Uit deze proeven kan worden geconcludeerd dat:

- het thermofiele slib een tweemaal zo hoge activiteit vertoont als het mesofiele slib;
- het slib na thermofiele vergisting verder gestabiliseerd is;
- het biogasproductiepotentieel voor beide slibben gelijk is.

BUSINESSCASE

Voor het uitvoeren van de businesscase is grotendeels gebruik gemaakt van de uitgangspunten uit de oorspronkelijke businesscase uit 2012. In de businesscase zijn de volgende varianten uitgewerkt:

- mesofiel: mesofiele vergisting bij 32°C en een verblijftijd van 24 dagen;
- thermofiel: thermofiele vergisting bij 55°C en een verblijftijd van 24 dagen;
- thermofiel+: thermofiele vergisting bij 55°C en een verblijftijd van 12 dagen, met toevoeging van extern slib;
- TSO/thermofiel+: thermofiele vergisting bij 55°C en een verblijftijd van 12 dagen, met toevoeging van extern slib en TSO (thermische slibontsluiting) als voorbehandeling.

De volgende zaken zijn aangepast:

- de biogasproductie is verhoogd op basis van de gegevens uit het praktijkonderzoek. De (organisch) drogestofafbraak is daaraan gerelateerd;
- de hoeveelheid stikstof die vrijkomt is aangepast aan de waarde gemeten in het praktijkonderzoek;

de energie- en warmtebalans voor de variant thermofiel+/TSO (thermische slibontsluiting) is opnieuw opgesteld op basis van nieuwe inzichten in TSO;

in de gevoeligheidsanalyse zijn de aspecten temperatuur, ods-afbraak en ontwaterbaarheid meegenomen.

De terugverdiertijden staan in onderstaande tabel. Hieruit blijkt dat de terugverdiertijd voor beide schaalgroottes het kortste is in de variant thermofiel+. Voor de kleine schaalgrootte is de terugverdiertijd voor de andere twee varianten ongeveer even lang. Voor de grote schaalgrootte levert de variant met TSO een kortere terugverdiertijd op dan de variant thermofiel.

TABEL

TERUGVERDIERTIJD (JAAR) PER VARIANT

schaalgrootte	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
150.000 i.e.	11,6	6,2	11,8
490.000 i.e.	8,0	3,8	7,4

CONCLUSIES

Concluderend kan worden gesteld dat thermofiele slibgisting een stabiel proces is met een hogere biogasopbrengst en drogestofafbraak dan mesofiele slibgisting. Dit blijkt uit de beschouwde pilotonderzoeken, full-scale toepassing en het full-scale onderzoek dat is uitgevoerd in het kader van dit STOWA-project. Omschakeling in korte tijd is mogelijk, mits de voeding tijdelijk kan worden stopgezet.

Tijdens het full-scale onderzoek is bij thermofiele slibgisting een grotere toename in de ammoniumconcentratie gemeten dan was voorspeld. De extra ammoniumvrucht moet worden verwijderd in een deelstroombehandeling. Door de hogere ammoniumconcentratie is ook meer geuroverlast te verwachten.

Op basis het full-scale onderzoek is de businesscase opnieuw doorgerekend. Hieruit bleek een langere terugverdiertijd voor alle varianten dan in de oorspronkelijke businesscase. De schaalgrootte en de mogelijkheid tot het vergisten van extern slib hebben hierop grote invloed. Ook de capaciteit van de waterlijn om extra stikstof te verwijderen is zeer belangrijk. Als er voldoende capaciteit is om stikstof te verwijderen in de waterlijn, is kostbare deelstroombehandeling niet nodig.

AANBEVELINGEN

Tijdens het praktijkonderzoek is meer ammonium vrijgekomen dan werd verwacht. Hiervoor biedt dit rapport geen verklaring. In een vervolgonderzoek moet aandacht worden besteed aan een stikstofbalans over de gisting bij thermofiele slibgisting.

Naar aanleiding van de labschaalproeven is gesuggereerd dat betere menging door verlaagde viscositeit de verhoogde biogasproductie (deels) zou kunnen verklaren. Het wordt dan ook aanbevolen in een eventueel vervolgonderzoek aandacht te besteden aan menging in de gistingstanks.

Tijdens het praktijkonderzoek is een relatief lange verblijftijd van 25 dagen aangehouden. Als ervoor wordt gekozen extern slib te gaan vergisten dient de werkelijke afbraak bij een kortere verblijftijd te worden aangetoond.

Het effect van thermofiele slibgisting op de ontwaterbaarheid is nog niet overtuigend aangetoond. Verkennende proeven wijzen op een verslechtering. Uitgebreidere proeven moeten dit bevestigen. Hierbij dient nadrukkelijk ook te worden gekeken naar de conditionering van het slib, zowel voor mesofiel als voor thermofiel vergist slib.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie. Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede van alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

SUMMARY

Dutch Water Boards are looking at thermophilic sludge digestion (ca. 55°C), as an alternative to mesophilic sludge digestion (33-35°C) to improve the energy balance of a wastewater treatment plant and to reduce operational costs.

STOWA published a business case in 2012, which dealt with the application of thermophilic digestion of primary and secondary sewage sludge in the Netherlands. This business case shows a reduction of sludge treatment costs when mesophilic digestion is replaced by thermophilic digestion. Research was executed at lab scale and full scale at Bath WWTP (water board Brabantse Delta, the Netherlands) to confirm the results.

DEVELOPMENT IN THE NETHERLANDS

The following developments related to thermophilic sludge digestion took place in the Netherlands after the business case was published in 2012:

- pilot research was performed at Leeuwarden WWTP (water board Fryslân, the Netherlands), focussing on thermophilic digestion of secondary sludge, combined with thermal pressure hydrolysis;
- the first full-scale thermophilic-mesophilic sludge digestion in the Netherlands was started up in Echten (water board Reest en Wieden, the Netherlands);
- pilot research into thermophilic sludge digestion was performed at Bath WWTP (water board Brabantse Delta) to prepare for the full scale research.

All cases resulted in stable operation of a thermophilic sludge digestion process.

FULL-SCALE RESEARCH

The complete report of the full scale research [ref. 10] can be found in the Hydrotheek (in Dutch). The current STOWA report summarizes the main findings. The research started with synchronization of both digestion tanks. This proved the tanks to operate similarly, so a good comparison can be made.

During the heating phase the temperature of the thermophilic tank was increased to 52°C over a period of 18 days. Feeding of both tanks was temporarily quitted from day 13 until day 18 to reduce the heating requirement and prevent acidification of the thermophilic tank. The temperature of 52°C could not be retained due to technical issues. During the research the temperature fluctuated between 48°C and 52°C.

The adaptation phase followed after the heating phase. Theoretically, this phase ends when the process reaches steady state. This is indicated by stabilization of the concentration of volatile fatty acids. A stable concentration of volatile fatty acids was not reached during the research. Still, the last five weeks of measurements were used for comparison, since the decrease was very small during that period. Conclusions about the differences between mesophilic and thermophilic digestion are based on this period.

There was a clear difference between the mesophilic and the thermophilic digestion tank during the comparison phase. The biogas production in the thermophilic tank was 20% higher than in the mesophilic tank. The reduction of organic matter was 12.9% higher in the thermophilic tank than in the mesophilic tank (51% and 45%, respectively).

The ammonia concentration in the reject water of the digested sludge was measured. The difference between the concentration in both tanks was larger than expected. The thermophilic tank was however below the critical level, so the difference is irrelevant for the stability of the digester. The higher ammonia load does however influence the dimensioning of the reject water treatment.

The methane content in the biogas was measured in both tank. No significant difference was shown. The level of hydrogen sulphide was relatively low in both tanks (thermophilic 80 ppm, mesophilic 68 ppm), due to the chemical phosphorus removal at Bath WWTP.

Sludge dewatering was not researched intensively. Some orientating experiments have been done using the existing belt presses. Conditioning (PE dosage, mixing, waiting time et cetera) during these tests was the same as used for mesophilic sludge. During these tests the dewatering properties turned out to be different for thermophilic sludge than for mesophilic sludge. The tests at Bath WWTP point in the direction of a deterioration of the dewaterability. Further experiments are required to confirm the effect on dewaterability with more accuracy.

LAB SCALE RESEARCH

Lab scale experiments were performed at Delft technical university in addition to the full scale research. The following can be concluded from these experiments:

- the activity of thermophilic sludge is twice as high as the activity of mesophilic sludge;
- sludge is stabilized further after thermophilic digestion;
- the biogas production potential is equal for both sludges.

BUSINESS CASE

The business case mainly used the same starting points as the business case prepared in 2012. The following scenarios were included in the business case:

- mesophilic: mesophilic digestion at 32°C and a sludge residence time of 24 days;
- thermophilic: thermophilic digestion at 55°C and a sludge residence time of 24 days;
- thermophilic+: thermophilic digestion at 55°C and a sludge residence time of 12 days, with addition of external sludge;
- TPH/thermophilic+: thermophilic digestion at 55°C and a sludge residence time of 12 days, with addition of external sludge and thermal pressure hydrolysis (TPH) as pre-treatment.

The following has been adjusted:

- The biogas production is increased based on the data of the full scale research. The reduction of organic matter is related to the biogas production;
- The amount of nitrogen released is adjusted according to the values measured in the full scale research;
- The heat and energy balance was for the scenario TPH/thermophilic+ was improved based on new insights in the TPH process;
- A sensitivity analysis was performed for the aspects temperature, organic matter reduction and dewaterability.

Payback times are presented in the table below. This table shows the payback time is shortest for the scenario thermophilic+ at both scales.

TABEL

PAYBACK TIME (YEAR) FOR EACH SCENARIO

scale	thermophilic	thermofilic+	TSO/thermofilic+
150.000 i.e.	11,6	6,2	11,8
490.000 i.e.	8,0	3,8	7,4

CONCLUSIONS

Thermophilic sludge digestion can be regarded as a stable process with a higher biogas production and organic matter reduction than mesophilic sludge digestion. This is shown by pilot research, full scale digestion and the full scale research performed for this STOWA project. Switching-over to thermophilic digestion in a short period is possible, if the feed can be quitted temporarily.

The increase in ammonia concentration measured during the full scale research was larger than expected. The extra ammonia load to be treated in reject water treatment will thus be higher. Also more smell is to be expected.

The business case has been recalculated based on the full scale research. Recalculation showed a longer payback time for all scenario's This is greatly influenced by the scale and the possibility the digest external sludge. Also the capacity to remove nitrogen in the WWTP itself is of importance. If the capacity is sufficient, costly reject water treatment is not necessary.

RECOMMENDATIONS

The research showed a higher release of ammonia than expected. This was not yet explained by the report. Further research should pay attention to a complete nitrogen balance over the sludge digestion.

Lab scale experiments suggest that improved mixing could (partially) explain the increased biogas production form thermophilic digestion. It is recommended to pay attention to mixing effects in further research.

The full scale research used a sludge retention time of 25 days, which is relatively long. When external sludge is treated, the retention time is shorter. The sludge reduction at shorter retention times is to be confirmed.

The effects of thermophilic sludge digestion on sludge dewaterability have not been demonstrated. Explorative experiments showed a deterioration. This is to be confirmed by further experiments. Attention should be paid to sludge conditioning, both of mesophilic and of thermophilic sludge.

STOWA IN BRIEF

STOWA (Foundation for Applied Water Research) is the knowledge centre of the regional water managers (mostly the Water Boards) in the Netherlands. Its mission is to develop, collect, distribute and implement applied knowledge, which the water managers need in order to adequately carry out the tasks that their work supports. This expertise can cover applied technical, scientific, administrative-legal or social science fields.

STOWA is a highly demand-driven operation. We carefully take stock of the knowledge requirements of the Water Boards and ensure that these are placed with the correct knowledge providers. The initiative for this mainly lies with the users of this knowledge, the water managers, but sometimes also with knowledge institutes and business and industry. This two-way flow of knowledge promotes modernisation and innovation.

Demand-driven operation also means that we are constantly looking for the 'knowledge requirements of tomorrow' – requirements that we dearly want to put on the agenda before they become an issue – in order to ensure that we are optimally prepared for the future.

We ease the burden of the water managers by assuming the tasks of placing the invitation to tender and supervising the joint knowledge projects. STOWA ensures that water managers remain linked to these projects and also retain 'ownership' of them. In this way, we make sure that the correct knowledge requirements are met. The projects are supervised by committees, which also comprise regional water managers. The broad research lines are spread out per field of practice and accounted for by special programme committees. The water managers also have representatives on these committees.

STOWA is not only a link between the users of knowledge and knowledge providers, but also between the regional water managers. The collaboration of the water managers within STOWA ensures they are jointly responsible for the programming, that they set the course, that several Water Boards are involved with one and the same project and that the results quickly benefit all Water Boards.

STOWA's fundamental principles are set out in our mission:

Defining the knowledge needs in the field of water management and developing, collecting, making available, sharing, strengthening and implementing the required knowledge or arranging for this together with regional water managers.

HAALBAARHEID VAN THERMOFIELE SLIBGISTING IN NEDERLAND

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
	SUMMARY	
	STOWA IN BRIEF	
	AFKORTINGEN	1
1	INLEIDING	2
	1.1 Achtergrond en probleemstelling	2
	1.2 Leeswijzer	2
2	PROJECTAANPAK	3
	2.1 Doelstelling	3
	2.2 Onderzoeksvragen en fasering	3
3	ONTWIKKELINGEN IN NEDERLAND	5
	3.1 Inleiding	5
	3.2 Pilotonderzoek rwzi Leeuwarden	5
	3.3 Thermofiel-mesofiele slibgisting rwzi Echten	6
	3.4 Pilotonderzoek rwzi Bath	8
	3.5 Vergelijking	9
4	RISICO'S EN ONZEKERHEDEN VAN THERMOFIELE SLIBGISTING	11
	4.1 Inleiding	11
	4.2 Benoemde risico's in business case	11
	4.3 Onderzochte risico's praktijkonderzoek	12

5	MATERIALEN EN METHODE PRAKTIJKONDERZOEK	13
5.1	Procesbeschrijving rwzi Bath	13
5.2	Onderzoeksplan	13
6	RESULTATEN PRAKTIJKONDERZOEK RWZI BATH	15
6.1	Leerpunten	15
6.1.1	Gelijkloop	15
6.1.2	Opwarmingsfase	15
6.1.3	Adaptatie en vergelijking	15
6.1.4	Gevolgen voor het onderzoek	16
6.1.5	Aanbevelingen voor andere rwzi's	16
6.2	Experimentele resultaten en analyse	16
6.2.1	Gelijkloop	16
6.2.2	Opwarmingsfase	17
6.2.3	Adaptatie	17
6.2.4	Vergelijkingsperiode	19
6.2.5	Vergelijking met pilotonderzoek	23
7	RESULTATEN LABONDERZOEK	25
8	AANPASSING BUSINESSCASE	27
8.1	Uitgangspunten	27
8.1.1	Berekening drogestofafbraak	27
8.1.2	Berekening stikstofvracht	30
8.1.3	Energie- en warmtebalans	31
8.1.4	Financieel-economische uitgangspunten	31
8.1.5	Gevoeligheidsanalyse	32
8.2	Resultaten	33
8.2.1	Warmte en energie	33
8.2.2	Bouw- en investeringskosten	33
8.2.3	Jaarlijkse kosten en baten	34
8.2.4	Netto contante waarde	36
8.2.5	Gevoeligheidsanalyse	38
9	BELANGRIJKSTE VERANDERINGEN	41
10	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	42
10.1	Ervaringen tijdens omschakeling	42
10.2	Verschillen tussen mesofiele en thermofiele slibvergisting	42
10.3	Effect op de businesscase	44
10.4	Conclusies	44
10.5	Aanbevelingen	45
11	REFERENTIES	46
	BIJLAGEN	
I	UITGANGSPUNTEN WARMTE- EN ENERGIEBALANS	47
II	KOSTENBEREKENING SCHAALGROOTTE 150.000 I.E.	49
III	KOSTENBEREKENING SCHAALGROOTTE 490.000 I.E.	51
IV	RESULTATEN WARMTE- ENERGIEBALANS	53
V	RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSE	65
VI	DIMENSIONERING SLIBLIJN	73
VII	NETTO CONTANTE WAARDEBEREKENING	77
VIII	RAPPORTAGE LABSCHAALPROEVEN	85

AFKORTINGEN

AWP	afvalwaterpersleiding
CZV	chemisch zuurstofverbruik
DEMON	deammonificatie
ds	drogestof
FOS	vluchtige organische Säuren (vluchtige vetzuren)
i.e.	inwonerequivalent
MAP	magnesiumammoniumfosfaat
ods	organische drogestof
PE	poly-elektrolyt
rwzi	rioolwaterzuiveringsinrichting
SNB	Slibverwerking Noord-Brabant
SRT	slibretentietijd
STOWA	Stichting Toepast Onderzoek Waterbeheer
TAC	totaler anorganischer Carbonatpuffer (buffercapaciteit)
TDH	thermische drukhydrolyse
TSO	thermische slibontsluiting
TVT	terugverdiëntijd
TZV	totaal zuurstofverbruik
VFA	volatile fatty acids (vluchtige vetzuren)
WBD	Waterschap Brabantse Delta
WKK	warmtekrachtkoppeling

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND EN PROBLEEMSTELLING

Om op operationele lasten te besparen is op veel rwzi's aandacht voor de optimalisatie van de vergisting van primair en secundair slib. Enerzijds wordt hierbij gekeken naar de voorbehandeling van slib. Anderzijds staat de toepassing van thermofiele gisting (ca. 55 °C) in plaats van mesofiele gisting (33-35 °C) in de belangstelling.

In opdracht van STOWA is een business case [ref. 1] opgesteld voor de toepassing van thermofiele gisting van communaal primair en secundair slib in Nederland. De business case laat zien dat de omschakeling van mesofiele gisting naar thermofiele gisting leidt tot daling van de specifieke slibverwerkingskosten. Voor een betere onderbouwing van de uitgangspunten is aanbevolen nader onderzoek uit te voeren op (semi) praktijkschaal. Dit onderzoek is uitgevoerd op rwzi Bath. Het praktijkonderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd door Colsen, Adviesburo voor Milieutechniek B.V. Ook is op de TU Delft labschaalonderzoek uitgevoerd met slib van rwzi Bath ter bevestiging van de resultaten. Witteveen+Bos heeft de resultaten verwerkt in de businesscase en deze gerapporteerd.

Daarnaast zijn er sinds het afronden van de businesscase ontwikkelingen geweest rondom thermofiele slibgisting op rwzi Bath en op andere locaties in Nederland. Zo is pilotonderzoek uitgevoerd naar thermofiele vergisting van secundair slib in combinatie met thermische drukhydrolyse op rwzi Leeuwarden (Wetterskip Fryslân). Ook is op rwzi Echten (Waterschap Reest en Wieden) de eerste thermofiel-mesofiele slibvergister in Nederland opgestart. Tenslotte is voorafgaand aan het praktijkonderzoek op rwzi Bath pilotonderzoek uitgevoerd naar thermofiele slibgisting. De belangrijkste aspecten van deze ontwikkelingen zijn opgenomen in deze rapportage.

1.2 LEESWIJZER

Over de opzet van dit onderzoek en de gestelde onderzoeksvragen leest u in hoofdstuk 2. Vervolgens omschrijft hoofdstuk 3 de huidige ontwikkelingen van thermofiele slibgisting in Nederland. Hoofdstuk 4 presenteert de risico's van thermofiele slibgisting die zijn benoemd of opgetreden. In hoofdstuk 5 wordt de aanpak van het praktijkonderzoek toegelicht, waarna hoofdstuk 6 de resultaten samenvat. In hoofdstuk 7 staat het labonderzoek aan de TU Delft omschreven. Vervolgens staat in hoofdstuk 8 de businesscase, die is aangepast op basis van het voorgaande. Hoofdstuk 9 presenteert de conclusies van het praktijkonderzoek en de businesscase. Hoofdstuk 10 sluit tenslotte af met een referentielijst.

2

PROJECTAANPAK

2.1 DOELSTELLING

Het praktijkonderzoek heeft tot doel:

- De knelpunten die optreden bij de omschakeling van mesofiele naar thermofiele slibgisting te achterhalen en hiervoor beheersmaatregelen aan te bevelen;
- De uitgevoerde businesscase thermofiele slibgisting beter te onderbouwen.

2.2 ONDERZOEKSVRAGEN EN FASERING

Het praktijkonderzoek is verdeeld in drie fases:

Fase I	Praktijkonderzoek op full-scale, monitoring en optimalisatie;
Fase II	Nader onderzoek en optimalisatie uitgaande van positieve business case;
Fase III	Uitbrengen ontwerpadvies thermofiele slibgisting en aanpassen gistingsmodel.

In dit rapport leest u de resultaten van fase I. In deze fase zijn de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

1. Welke aspecten zijn belangrijk bij de omschakeling van mesofiele naar thermofiele gisting?
 - Welk protocol dient gevolgd te worden?
 - Welke parameters en componenten dienen gemonitord te worden?
 - Welke risico's treden op?
 - Hoe kan worden ingeschat wanneer de omschakeling voltooid is?
2. Wat is het verschil in biogasproductie tussen mesofiele en thermofiele vergisting bij gelijke samenstelling van de ingaande stroom en gelijke verblijftijd?
3. Wat is het verschil in ontwaterbaarheid van mesofiel en thermofiel vergist slib bij gelijke samenstelling van de ingaande stroom en gelijke verblijftijd?
4. Zijn er wijzigingen in operationele aspecten bij omschakeling van mesofiele naar thermofiele gisting? Zoals:
 - menging;
 - schuimvorming;
 - remming door toxische effecten;
 - scaling en/of struvietvorming.
5. Wat is het verschil in stabiliteit (pH, temperatuur, vetzuurgehalte, ammoniumgehalte) tussen mesofiele en thermofiele vergisting?
6. Wat is het verschil in samenstelling van het biogas ($\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ /siloxaangehalte) tussen mesofiele en thermofiele vergisting?
7. Wat is het verschil in de hoeveelheid ammonium en fosfaat die vrijkomt bij mesofiele en thermofiele vergisting?
8. In hoeverre zijn de resultaten behaald met full-scale onderzoek te vergelijken met de resultaten van eerder uitgevoerd onderzoek op pilotschaal (60 liter)?

9. Wat is het verschil in maximale afbreekbaarheid van het slib bij mesofiele en thermofiele vergisting?
10. Wat is het effect op de warmtebalans van omschakeling van mesofiele naar thermofiele gisting?
11. In hoeverre veranderen de resultaten van het onderzoek op praktijkschaal de uitkomst van de businesscase?

3

ONTWIKKELINGEN IN NEDERLAND

3.1 INLEIDING

Verschillende Nederlandse waterschappen zijn geïnteresseerd in thermofiele slibgisting, omdat dit energetische of economische voordelen oplevert. Daarom wordt op de rwzi's Leeuwarden en Bath onderzoek verricht naar thermofiele slibgisting. Ook is op rwzi's Echten de eerste Nederlandse thermofiele slibgisting operationeel. Dit hoofdstuk beschrijft deze ontwikkelingen.

3.2 PILOTONDERZOEK RWZI LEEUWARDEN

Op rwzi Leeuwarden is in 2012 pilotonderzoek [ref. 2] uitgevoerd naar thermofiele slibgisting in combinatie met thermische slibontsluiting (TSO), ook wel thermische drukhydrolyse (TDH) genoemd. Er zijn twee vergisters op pilotschaal (3,5 m³) opgestart onder thermofiele omstandigheden (53°C). Tijdens dit onderzoek is alleen secundair slib behandeld.

Het secundaire slib werd eerst voorbehandeld in een rotorzeef om vezels te verwijderen. Vervolgens werd op een deel van het slib TSO toegepast met het Turbotec[®] proces (Sustec). Daarna werd één vergister gevoed met TSO-slib, de andere vergister diende als referentie. Beide vergisters zijn eerst 1,5 maand bedreven bij een slibretentietijd (SRT) van 21 dagen. Vervolgens werd de SRT van beide gistingstanks stapsgewijs verlaagd naar 12 dagen, waarna de vergisters nog ruim een maand op die SRT bedreven zijn.

De focus van dit onderzoek is thermofiele slibgisting, niet TSO-voorbehandeling. Daarom worden in tabel 3.1 de resultaten van thermofiele gisting zonder TSO gerapporteerd. Omdat er geen pilotvergister onder mesofiele omstandigheden is bedreven is er geen vergelijking tussen mesofiele en thermofiele omstandigheden mogelijk. De resultaten bevestigen de hypothese dat de afbraak bij een langere verblijftijd hoger is. De concentraties stikstof (ammonium, totaal en opgelost) en fosfaat (totaal en opgelost) zijn ongeveer gelijk bij beide verblijftijden.

De conclusie van het onderzoek op rwzi Leeuwarden was dat de combinatie van TSO en thermofiele slibgisting een hogere biogasproductie geeft dan thermofiele gisting alleen, maar dat de toename zeer beperkt is. Het verschil wordt pas zichtbaar bij verblijftijden korter dan 12 dagen.

Tijdens dit onderzoek is de ontwaterbaarheid gemeten door het drogestofgehalte van de slibkoek na labschaalontwatering (Marecopers) te bepalen. Dit is gedaan voor drie typen slib:

- mesofiel vergist slib (slibgisting rwzi Leeuwarden): 25,86% (± 0,48%);
- thermofiel vergist slib: 20,57% (± 1,30%);
- thermofiel vergist slib voorbehandeld met TSO: 32,88% (± 1,68%).

TABEL 3.1 GEMIDDELDE PRESTATIES BIJ EEN VERBLIJFTIJD VAN 21 EN 12 DAGEN BIJ 53 °C

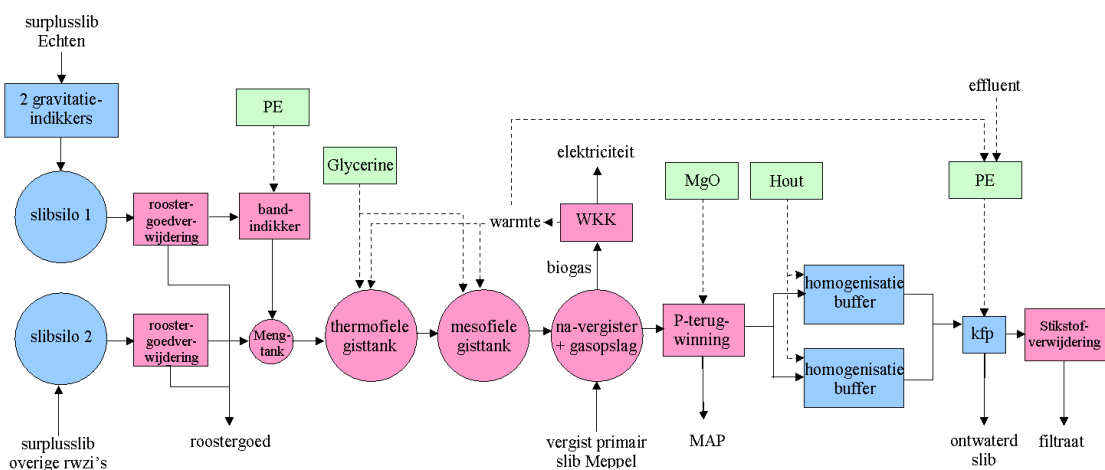
parameter	eenheid	SRT = 21 dagen	SRT = 12 dagen
ods-afbraak	%	40	34
ds-afbraak	%	31	25
specifieke biogasproductie	l biogas/kg ods ingaand	421 ± 45	352 ± 49
specifieke methaanproductie	l methaan/kg ods ingaand	269	222
VFA-concentratie	g/l	1,7	1,7
VFA/alkaliteit	-	0,2	0,2
ammoniumconcentratie	g N/l	1,5	1,5
totaal stikstofconcentratie	g N/l	3,38 ± 0,24	3,22 ± 0,12
opgelost stikstofconcentratie	g N/l	2,27 ± 0,17	1,95 ± 0,19
totaal fosfaatconcentratie	g P/l	1,51 ± 0,11	1,69 ± 0,08
opgelost fosfaatconcentratie	g P/l	0,70 ± 0,06	0,77 ± 0,04

Op rwzi Leeuwarden geldt dat met TSO voorbehandeld slib beter te ontwateren is dan mesofiel of thermofiel vergist slib. Thermofiel vergist slib was in dit geval minder goed te ontwateren dan mesofiel vergist slib. De polymeedosering tijdens deze proeven is niet bekend.

3.3 THERMOFIEL-MESOFIELE SLIBGISTING RWZI ECHTEN

Op rwzi Echten is in het voorjaar van 2013 een nieuwe slibgistinginstallatie opgestart die het slib afkomstig van de zeven zuiveringen in het beheergebied van Waterschap Reest en Wieden behandelt. In totaal wordt jaarlijks 193.000 m³ slib behandeld met een drogestofgehalte van 3,5% en een organisch drogestofgehalte van 67,5%. Het systeem bestaat uit een thermofiele gistingstank (verblijftijd 10 dagen, temperatuur 55 °C), een mesofiele gistingstank (verblijftijd 14 dagen, temperatuur 35 °C) en een navergister. Het uitgegiste slib wordt behandeld in een MAP-reactor voor fosfaatterugwinning. Vervolgens wordt het ontwaterd in de bestaande kamerfilterpers. Het filtraat wordt behandeld in een DEMON-installatie. Het gehele proces is weergegeven in het blokkenschema van afbeelding 3.1.

AFBEELDING 3.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE SLIBGISTING RWZI ECHTEN

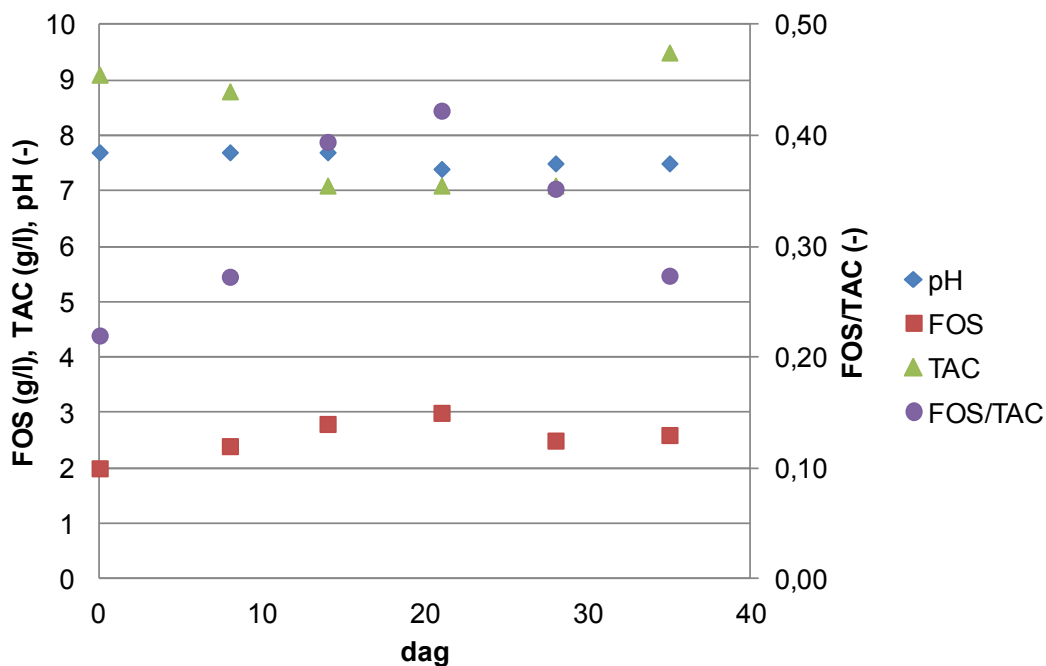


De keuze voor de combinatie van thermofiele en mesofiele vergisting is gebaseerd op onderzoek dat tussen 2009 en 2012 is uitgevoerd door PROCES Groningen [ref. 3]. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de vijf noordelijke waterschappen (Waterschappen Hunze en Aa's, Velt en Vecht, Noorderzijlvest, Reest en Wieden en Wetterskip Fryslân), ondersteund door de Provincies Groningen, Drenthe en Friesland. Het onderzoek richtte zich enerzijds op voorbehandelingstechnieken van slib en anderzijds op de combinatie van thermofiel en mesofiel vergisten. Ook is de ontwaterbaarheid onderzocht. De proeven zijn uitgevoerd op primair en secundair slib van de deelnemende waterschappen.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt onder meer dat het vergisten van secundair slib in twee in serie geschakelde thermofiele vergisters gevolgd door een mesofiele vergister leidt tot een 35-40% hogere biogasopbrengst per kg organische stof dan mesofiele vergisting van hetzelfde substraat. Het behandelen van een mix van primair en secundair slib in een thermofiele vergister gevolgd door een mesofiele vergister leidt tot een 20% hogere biogasopbrengst. Een vergelijking tussen thermofiel-mesofiele vergisting en thermofiele vergisting is niet gemaakt.

Op rwzi Echten heeft de leverancier van het systeem in de periode mei-juni 2013 garantiemetingen [ref. 4] uitgevoerd. Hierbij is onder andere de organische stofafbraak bepaald, afgeleid van de toegevoegde hoeveelheid organische stof en de biogasproductie (afgeleid van gebruik in WKK, biogasketel en fakkel). De organische stofafbraak is 44% bij de genoemde verblijftijden. Het uitgegiste slib wordt ontwaterd in de kamerfilterpers tot een drogestofgehalte van 26%. Het biogas heeft een methaangehalte van ongeveer 60% en bevat 0-50 ppm H_2S . Het H_2S -gehalte is relatief laag. Het handboek slibgisting geeft een gemiddelde waarde van 400 ppm en een range van 100-5000 ppm aan [ref. 5]. Het lage H_2S -gehalte zou kunnen komen door de aanvoer van ijzerhoudend slib. Het siloxaangehalte is onbekend.

AFBEELDING 3.2 CONCENTRATIES VAN FOS EN TAC EN PH IN DE VERGISTER



Tijdens de garantiemetingen is de stabiliteit bepaald met een pH-meting en een FOS/TAC-meting. Hierin staat FOS voor vluchtige vetzuren (Duits: flüchtige organische Säuren, uitgedrukt in g azijnzuur/l). TAC staat voor de buffercapaciteit of alkaliteit (Duits: totaler anorganischer Carbonatpuffer, uitgedrukt in g CaCO₃/l). De analyse van de FOS/TAC vindt plaats door een titratie met zwavelzuur [ref. 6]. Beide parameters worden dus tijdens dezelfde titratie bepaald. In dat opzicht wijkt de FOS/TAC-meting af van het meten van vluchtige vetzuren en alkaliteit, die in separate metingen worden bepaald. In principe zijn de resultaten vergelijkbaar.

De FOS/TAC-verhouding geeft een indicatie van de stabiliteit van de vergisting. Wanneer de FOS/TAC-verhouding groter is dan 0,5 treedt verzuring op en is de vergister overbelast. De resultaten zijn weergegeven in afbeelding 3.2. Hieruit blijkt dat de waarden redelijk stabiel zijn en de vergister niet overbelast is.

3.4 PILOTONDERZOEK RWZI BATH

In 2012 is op rwzi Bath pilotonderzoek [ref. 5] uitgevoerd naar thermofiele slibgisting. De doelstelling van dit onderzoek was om de potentie van thermofiele slibgisting aan te tonen en de risico's voor omschakeling in kaart te brengen. Het onderzoek is uitgevoerd in een pilotreactor met een inhoud van 60 liter. Deze werd geënt met mesofiel slib van de full-scale reactor op rwzi Bath en tweemaal per dag gevoed met een 1:1 mengsel van ingedikt primair slib en secundair slib. De samenstelling van de voeding was hiermee hetzelfde als die van de full-scale vergister. De verblijftijd in de pilotreactor was 20 dagen.

Het onderzoek was verdeeld in drie fases:

- 1 mesofiele (35°C) gelijkloop met full-scale vergister (7 dagen);
- 2 omschakeling naar thermofiele vergisting (52°C) (34 dagen);
- 3 'steady-state' thermofiele vergisting (20 dagen).

Tijdens het pilotonderzoek is de periode na opwarming waarin de pH en de vetzuurconcentratie stabiel waren beschouwd als steady-state. Om een werkelijke steady-state te bereiken is echter een periode van enkele slibleeftijden nodig. Kort na omschakeling van mesofiele naar thermofiele slibgisting kan de biogasproductie tijdelijk hoger zijn door de vergisting van afgestorven mesofiele organismen. De conclusies van de 'steady-state'-fase geven dus wel een indicatie van de potentie van thermofiele slibgisting, maar geen uitsluitsel.

Tijdens de eerste fase is de pilotreactor zo veel mogelijk vergelijkbaar met de full-scale reactor te bedienen. Wel was er een iets lagere belasting (full-scale 2,62 kg ODS/m³.dag, pilot 2,07 kg ODS/m³.dag) en een hogere ods-omzetting (full-scale 52%, pilot 73%) en biogasproductie in de pilotreactor. Ook de hoeveelheid ammonium en orthofosfaat die vrijkwam was hoger dan in de full-scale reactor.

In fase 2 is gekozen voor omschakeling in één stap. Deze is verdeeld over zeven dagen om de condities voor een full-scale installatie zo goed mogelijk na te bootsen. In de praktijk zal het opwarmen immers enige tijd in beslag nemen. Tijdens het opwarmen steeg de VFA-concentratie in eerste instantie tot 64 meq/l. Later daalde deze weer, om tijdens de 'steady state' stabiel te blijven. Deze stabiele waarde was wel hoger dan bij mesofiele condities.

Na de opwarming is in fase 3 de pilotreactor enkele weken in 'steady-state' bedreven. Daarbij is een vergelijking gemaakt met de mesofiele full-scale reactor. Deze vergelijking geeft zoals gezegd een indicatie van de potentie van thermofiele slibgisting. Hij heeft echter geen goede voorspelling voor de te verwachten toename in de praktijk, omdat er verschillen zijn tussen beide reactoren. De belangrijkste verschillen zijn de betere menging en het stabielere voedingsregime van de pilotinstallatie.

Uit de vergelijking bleek dat de ods-omzetting onder thermofiele omstandigheden relatief 25% hoger was dan onder mesofiele omstandigheden (toename van 41,6% naar 51,5%). De biogasproductie van de pilotinstallatie was tijdens de thermofiele 'steady state' 25% hoger dan tijdens de mesofiele gelijkloop (toename van 42,5 NI/dag naar 53,1 NI/dag). Dit getal is echter minder betrouwbaar, door een onnauwkeurige meting met een waterkolom. Er werd een hogere specifieke biogasproductie gemeten (van 686 l biogas/kg ods omgezet mesofiel naar 812 l/kg ods omgezet thermofiel) en een 8% hoger methaangehalte in het biogas (toename van $60\% \pm 5\%$ naar $65\% \pm 5\%$).

Door de hogere omzetting kwam meer ammoniumstikstof vrij. Dit gehalte nam toe van 1.000 mg/l (mesofiel) naar 1.400 mg/l (thermofiel). De concentratie orthofosfaat nam toe van 250 mg/l naar 560 mg/l. Deze toenames zijn groter dan verwacht wordt op basis van ods-afbraak en een vast percentage stikstof en fosfaat in de microbiële biomassa.

Onderdeel van het pilotonderzoek waren ontwateringsproeven met een minifilterpers (Marecopers). Het tot dan toe gebruikte PE bleek bij een dosering van 7 kg actief PE per ton ds echter niet tot vlokvorming te leiden. Ook bij hogere doseringen trad nauwelijks vlokvorming op. Daarop is besloten de ontwateringsproeven verder te staken. Op basis van deze proeven zijn dus geen uitspraken te doen over de ontwaterbaarheid. De proeven geven wel aan dat de polymeerkeuze heroverwogen moet worden bij het omschakelen van mesofiele naar thermofiele vergisting.

Dit oriënterende pilotonderzoek op rwzi Bath heeft laten zien dat er een hogere ods-afbraak en biogasproductie bereikt kunnen worden bij thermofiele slibgisting. Ook kwamen er meer nutriënten vrij dan verwacht. Over de ontwaterbaarheid kunnen nog geen conclusies worden getrokken.

3.5 VERGELIJKING

De resultaten van de pilotonderzoeken op rwzi Leeuwarden en rwzi Bath en de full-scale installatie op rwzi Echten variëren sterk. Hierdoor is geen objectieve vergelijking te maken. Wel staat vast dat in alle drie de gevallen een stabiel thermofiel proces heeft plaatsgevonden of plaatsvindt. De afbraak van organische stof onder thermofiele omstandigheden varieerde van 34% (Leeuwarden, SRT 12 dagen) tot 51,5% (Bath, SRT 20 dagen).

Van het gistingsproces op rwzi Echten zijn geen gegevens beschikbaar over nutriënten in het centraat. Het pilotonderzoek op rwzi Bath rapporteert een toename van ammoniumstikstof en orthofosfaat bij thermofiele omstandigheden. De ammoniumconcentratie van de onderzoeken op rwzi Leeuwarden en rwzi Bath komen overeen. De orthofosfaatconcentratie in het centraat van de pilot op rwzi Leeuwarden is hoger dan die op rwzi Bath. Het bio-P-proces op rwzi Leeuwarden en de chemische fosfaatverwijdering op rwzi Bath verklaren dit verschil. Er lijkt geen duidelijke relatie te zijn met de hoeveelheid afgebroken ods.

Naar struvietvorming is in de onderzoeken niet specifiek gekeken. Wel is in Leeuwarden en in Echten de pH gemeten. Deze was in Bath circa 7,7 en in Echten circa 7,5. In Leeuwarden is de pH onbekend. De optimale pH voor struvietvorming is 8,0. Een pH boven en een hoge fosfaatconcentratie brengt een risico op struvietvorming met zich mee. Omdat niet alle parameters op alle locaties bekend zijn, is hiervan geen vergelijking te maken.

Naar de ontwaterbaarheid is alleen vergelijkend onderzoek gedaan op rwzi Leeuwarden. Hier bleek thermofiel vergist slib slechter ontwaterbaar dan mesofiel vergist slib. Thermische drukhydrolyse leverde wel een verbetering op. Op rwzi Bath zijn de ontwateringsproeven voortijdig gestaakt.

4

RISICO'S EN ONZEKERHEDEN VAN THERMOFIELE SLIBGISTING

4.1 INLEIDING

De meeste slibvergisters in Nederland zijn ontworpen voor mesofiele bedrijfsvoering. Wanneer thermofiele slibvergisting grote voordelen biedt, valt te verwachten dat een deel van deze vergisters zal worden aangepast voor thermofiele bedrijfsvoering. Daarbij horen enkele risico's omdat deze vergisters hiervoor niet zijn ontworpen. In de businesscase [ref. 1] is een deel hiervan al benoemd. Die zijn hier samengevat. Daarnaast is specifiek voor het praktijkonderzoek op rwzi Bath gekeken naar de civieltechnische risico's van opwarming.

4.2 BENOEMDE RISICO'S IN BUSINESS CASE

HOGERE WARMTEBEHOEFTE

Bij thermofiele gisting is er een hogere warmtebehoefte ten opzichte van mesofiele gisting. Rwzi-specifieke omstandigheden bepalen of de geproduceerde warmte in de WKK voldoende is om het gistingproces op temperatuur te houden.

STABILITEIT THERMOFIELE GISTING

Lange tijd is gedacht dat de stabiliteit van het thermofiele gistingsproces lager is dan die van mesofiele gisting. Dit was dan ook een van de conclusies uit het rapport 'optimalisatie gistingsgasproductie' (STORA-1985-02). De lagere stabiliteit zou vooral veroorzaakt worden door een grotere gevoeligheid voor temperatuurschommelingen, een hogere ammoniakconcentratie (toxiciteit) en overbelasting. Recente literatuur laat echter zien dat het thermofiele gistingsproces wel stabiel is en dat er geen operationele problemen optreden.

MEER STIKSTOF EN FOSFAAT IN RETOURSTROMEN

Als gevolg van een verhoogde afbraak van organische stof komt meer stikstof (ammonium) en fosfaat vrij. Dit vereist aanpassingen in de deelstroombehandeling of rwzi om aan de effluent-eisen te kunnen blijven voldoen.

SILOXAANGEHALTE BIOGAS

Siloxanen komen voor in biogas en kunnen leiden tot slijtage van de eindgebruikersapparatuur, bijvoorbeeld gasmotoren. De invloed van temperatuur en ods-afbraak op het siloxaan-gehalte in biogas is onbekend. Daarom is ook niet bekend of dit meer of minder zal worden bij thermofiele gisting. Waarschijnlijk treedt bij een hogere temperatuur meer verdamping plaats, waardoor de vracht aan opgeloste siloxanen in de dampfase toeneemt.

TOENAME H₂S EN VOCHTGEHALTE VAN HET BIOGAS

Door de hogere temperatuur en de hogere afbraak neemt het vochtgehalte en het H₂S gehalte in het biogas toe.

4.3 ONDERZOCHE RISICO'S PRAKTIJKONDERZOEK

In de aanloop naar het praktijkonderzoek heeft Witteveen+Bos in opdracht van waterschap Brabantse Delta de constructieve effecten op de betonconstructie onderzocht [ref. 8 en 9]. Effecten op andere onderdelen, zoals voeg- en isolatiemateriaal, leidingwerk en appendages zijn hierbij buiten beschouwing gebleven.

De slibgistingstanks zijn oorspronkelijk ontworpen voor een temperatuur van 30°C. In de praktijk worden deze nu bedreven bij temperaturen tussen 32°C en 38°C. Hierbij treden voor zover bekend geen problemen op. In de constructieberekeningen is een opwarming tot 55°C doorgerekend.

Door het bedrijven van de gistingstanks bij een hogere temperatuur neemt de warmteflux door het beton toe. Dat kan leiden tot grotere spanningen in het materiaal. In het geval van rwzi Bath kan dit ertoe leiden dat reeds bestaande scheuren groter worden.

De belangrijkste knelpunten en aanbevelingen zijn:

in de oorspronkelijke ontwerpberekening is uitgegaan van een soortelijk gewicht¹ van het slib van 10 kN/m³. Nagegaan moet worden of dat uitgangspunt nog steeds klopt wanneer een hoger drogestofgehalte wordt toegepast;

de bodem en de wanden van de tanks zijn star met elkaar verbonden. Niet alle krachten op deze verbinding zijn in de originele berekening meegenomen. De toelaatbare spanningen door de hogere temperaturen in de vloer op het verbindingpunt worden met circa 20% overschreden;

door de hogere temperaturen wordt de grenstoestand van de bovenwapening in het dak met betrekking tot bezwijken met 10% overschreden. Deze wordt echter in de huidige situatie ook al overschreden. Dat betekent dat de scheuren iets groter kunnen worden. Het dak is vrij opgelegd, waardoor er meer uitzetting mogelijk is. Als bij inspectie blijkt dat het dak aan de bovenzijde in goede conditie is kan worden besloten dat de overschrijding acceptabel is.

Zowel voor toepassing van thermofiele slibgisting op rwzi Bath als op andere locaties is het van belang om de kwaliteit van de tanks en het beton te onderzoeken. Hiervoor dienen de tanks mogelijk te worden leeggezet. Met dit inzicht in de huidige situatie en eventuele haarscheurtjes en gebruikmakend van het oorspronkelijke ontwerp kan berekend worden of de gistingstanks geschikt zijn voor opwarming naar thermofiele omstandigheden. Ook kunnen aanbevelingen gedaan worden over eventuele reparaties of versterkingen.

¹ Er is uitgegaan van een soortelijke massa van slib van circa 1020 kg/m³. Het gewicht ($N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$) is de kracht die door een massa wordt uitgeoefend op de bodem en wordt berekend door de massa (kg) te vermenigvuldigen met de valversnelling (m/s^2). In Nederland bedraagt de valversnelling 9,81 m/s^2 .

5

MATERIALEN EN METHODE

PRAKTIJKONDERZOEK

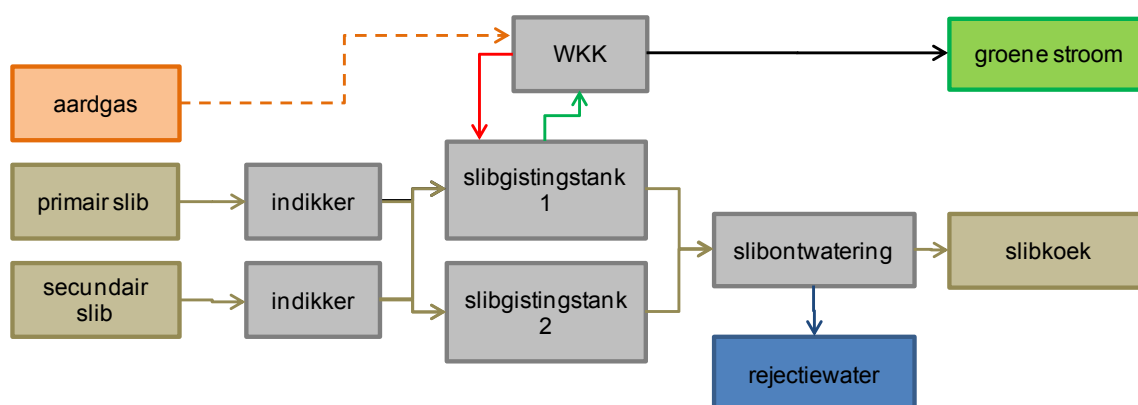
5.1 PROCESBESCHRIJVING RWZI BATH

De rwzi Bath zuivert het afvalwater dat wordt aangevoerd door de afvalwaterpersleiding Moerdijk-Bath (AWP) waarop een aantal woonkernen en industrieterreinen in westelijk Noord-Brabant zijn aangesloten. De waterlijn bestaat uit voorbezinktanks, beluchtingtanks, nabezinktanks en een effluentgemaal. De installatie heeft een totale ontwerpcapaciteit van 471.000 i.e. (70.720 kg TZV/dag) en 20.000 m³/h. Het gereinigde water wordt bij Waarde op de Westerschelde geloosd.

De slibverwerking van de rwzi Bath verwerkt het slib van de eigen rwzi en van de rwzi's Ossendrecht, Putte, Willemstad, Dinteloord, Nieuw Vossemeer en Halsteren. Het slib van de andere rwzi's wordt via de AWP aangevoerd naar de rwzi Bath. De slibbehandelingsinstallatie bestaat uit een voorindikker, vier bandindikers, twee gistingstanks, een slibvoorraadtank en een slibontwateringsinstallatie. De slibontwatering bestaat uit 4 zeefbandpersen, 2 schroeftransporteurs en 2 slibkoeksilo's. De slibkoek wordt afgevoerd naar de slibverbrander van SNB te Moerdijk.

De procesonderdelen van de slibgisting zijn schematisch weergegeven in afbeelding 5.1. Een uitgebreidere procesomschrijving staat in STOWA-rapport 2012-W15 [ref. 1].

AFBEELDING 5.1 PROCESSCHEMA SLIBLIJN RWZI BATH



5.2 ONDERZOEKSPLAN

Colsen heeft het praktijkonderzoek op rwzi Bath uitgevoerd en hierover een rapport opgesteld [ref. 10]. Hierin worden ook materialen en methode omschreven. Het rapport is te vinden in de Hydrotheek. Onderstaand worden de belangrijkste punten samengevat.

Het praktijkonderzoek is bij aanvang opgedeeld in vier periodes: gelijkloop, opwarming, adaptatie en vergelijking. Deze zijn toegelicht in tabel 5.1. Er is gekozen voor opwarming in één stap. Tijdens het onderzoek bleek de duur van de periodes af te wijken van de planning. Dat wordt toegelicht bij de resultaten.

TABEL 5.1 ONDERZOEKSPERIODEN

periode	naam	duur (oorspronkelijke planning)	duur (gerealiseerd)	omschrijving
1	gelijkloop	2 weken	13 dagen	beide gistingstanks worden gelijkwaardig bedreven om de vergelijkbaarheid van de mesofiele en thermofiele gistingstank te garanderen
2	opwarming	3 weken	18 dagen	een van de gistingstanks wordt opgewarmd naar thermofiele temperatuur (52°C)
3	adaptatie	4 weken	126 dagen (18 weken)	de biomassa in de thermofiele tank past zich aan de nieuwe omstandigheden aan
4	vergelijking	13 weken	35 dagen (5 weken)	metingen worden aan beide tanks verricht om inzicht te krijgen in verschillen

Tijdens het praktijkonderzoek zijn metingen gedaan aan vier slibstromen:

- Ingedikt primair slib;
- Ingedikt secundair slib;
- Uitgest gistingstank 1;
- Uitgest gistingstank 2.

Een overzicht van de metingen is weergegeven in tabel 5.2. Een uitgebreid analyseoverzicht is opgenomen in het rapport Thermofiele slibgisting rwzi Bath [ref. 10].

TABEL 5.2 UITGEVOERDE SLIBMETINGEN

stroom	type monster	type monster										
		indamprest	gloeïrest	pH	Kj-N	NH ₄ -N	P-totaal	P ₀	CZV-totaal	CZV-opgelost	VFA	alkaliteit
ingedikt primair slib	weekmengmonster	X	X		X		X		X			
ingedikt secundair slib	weekmengmonster	X	X		X		X		X			
inhoud gistingstank 1	steekmonster	X	X	X	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X	X ¹⁾	X	X
inhoud gistingstank 2	steekmonster	X	X	X	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X	X ¹⁾	X	X
slibkoek	weekmengmonster	X	X									
PE-dosering	weekmengmonster	X										

¹⁾ Meting uitgevoerd op concentraat van gecentrifugeerd monster

Dagelijks is de ingaande hoeveelheid primair en secundair slib (m³/dag) per gistingstank genoteerd. Daarnaast zijn de hoeveelheid en de samenstelling van het biogas online gemeten. De ontwaterbaarheid van thermofiel vergist slib is een belangrijk aspect in de businesscases. Om deze te bepalen zijn ontwateringstesten uitgevoerd met de zeefbandpersen van rwzi Bath. Details van de uitgevoerde metingen en analyses zijn te vinden in de eindrapportage van Colsen [ref. 10]

Tijdens het onderzoek is de wens ontstaan om inzicht te krijgen in de maximale biogasproductie van het slib van rwzi Bath. Daarom is labonderzoek verricht door de TU Delft. Dit is opgenomen als bijlage VIII en wordt besproken in hoofdstuk 7.

6

RESULTATEN PRAKTIJKONDERZOEK

RWZI BATH

6.1 LEERPUNTEN

Een van de doelen van dit onderzoek is om ervaring op te doen met thermofiele slibgisting. Daarom worden de knelpunten die zijn opgetreden beschreven, zodat hiermee in volgende projecten rekening gehouden kan worden.

6.1.1 GELIJKLOOP

De gelijkloop is uitgevoerd in december 2012. Tijdens deze periode zijn geen grote knelpunten opgetreden. Bij aanvang van de gelijkloop was de biogasmeting nog niet aangesloten op het beeldscherm, waardoor deze data niet konden worden afgelezen. Ook bleek de temperatuurmeting in de gistingstanks niet te kloppen, door aanwezigheid van vast materiaal op de bodem. Deze knelpunten zijn verholpen.

6.1.2 OPWARMINGSFASE

Voor aanvang van de opwarmingsfase traden onverwachts pieken op in de biogasdruk. Deze werden veroorzaakt door het aan- en uitschakelen van de voeding en de menging. De pieken leidden tot drukveranderingen in het gasleidingstelsel, waardoor een waterslot niet meer correct kon functioneren. Dit bracht veiligheids- en arborisico's met zich mee. Door de verwachte hogere biogasproductie bij thermofiele slibgisting zou dit knelpunt kunnen verergeren. Het probleem is opgelost met een zelfherstellend waterslot.

De bedrijfszekerheid van de twee WKK's daalt als er een verschil is in calorische waarde tussen het thermofiele en mesofiele biogas. Tijdens de opwarmingsfase zijn grote verschillen in het methaangehalte en daarmee in de calorische waarde gemeten.

Tijdens de opwarmingsfase traden onevenredig veel kleine storingen aan de WKK-installaties op. Deze werden relatief eenvoudig verholpen.

6.1.3 ADAPTATIE EN VERGELIJKING

Na de opwarmingsfase bleek het niet mogelijk de gisting op de gewenste temperatuur van 52°C te houden. Hiervoor zijn twee hoofdoorzaken aan te wijzen:

- De extra warmtewisselaar die voor de proef was geïnstalleerd bleek erg verstoppingsgevoelig. Het was nodig deze meerdere malen per dag te reinigen. Dit was logistiek onhaalbaar, dus is besloten de extra warmtewisselaar niet meer te gebruiken;
- De watertemperatuur van de WKK's naar de slibwarmtewisselaars was niet hoog genoeg, waardoor de warmteoverdracht naar het slib te laag was. Dit was een softwarematig probleem dat niet eenvoudig was op te lossen.

Daarnaast zijn er nog enkele kleinere knelpunten opgetreden:

- de temperatuurregeling van de gisting werkt tot 50°C, daarboven geldt handbediening;
- de gasdrukproblematiek uit de opwarmingsfase was niet geheel verholpen, waardoor het risico op gasspui bleef bestaan.

6.1.4 GEVOLGEN VOOR HET ONDERZOEK

De knelpunten hebben geleid tot vertraging, waardoor niet alle fases van het onderzoek konden worden uitgevoerd zoals gepland. Daarnaast hebben sommige knelpunten invloed op de resultaten. In de analyse van de onderzoeksgegevens is de biogasproductie de belangrijkste parameter. Tijdens de gelijkloop kon deze niet gemeten worden. Hierdoor is onbekend of er een verschil is tussen beide gistingstanks. De gemeten toename bij thermofiele vergisting is dus minder betrouwbaar. Op basis van de ods-afbraak die tijdens de gelijkloop nagenoeg gelijk was voor beide tanks kan echter verwacht worden dat ook de biogasproductie gelijk was.

De knelpunten tijdens de opwarmingsfase (gasproblematiek, storingsen aan WKK's) hebben waarschijnlijk geen invloed op de resultaten. Tijdens de adaptatie- en vergelijkingsfase was de temperatuur lager was dan gepland. Hierdoor wijken de resultaten waarschijnlijk af van thermofiele gisting bij hogere temperatuur.

6.1.5 AANBEVELINGEN VOOR ANDERE RWZI'S

Bij omschakeling naar een hogere gistingstemperatuur moeten het biogas- en warmtesysteem hierop zijn toegerust. Het is aan te bevelen om voorafgaand aan opwarming op de hoogte te zijn van de mogelijkheden en beperkingen van de bestaande installatie. Hierbij moet aandacht zijn voor de capaciteit van het biogassysteem en de aansturing van de WKK-installaties. Als een warmtewisselaar wordt geplaatst mag deze niet snel verstopten. Hiermee kan rekening worden gehouden door een juiste dimensionering en/of door een goede voorbehandeling voor het verwijderen of versnijden van grote delen.

Op rwzi Bath is het idee ontstaan om niet de retourslibstroom, maar de ingaande slibstroom te verwarmen voor een betere warmteoverdracht (hogere delta T). Dit zorgt ook voor een lagere temperatuur van de retourstroom naar de WKK-installatie. Dit kan ook op andere rwzi's een oplossing zijn.

6.2 EXPERIMENTELE RESULTATEN EN ANALYSE

Het volledige eindrapport van het praktijkonderzoek is opgenomen in de Hydrotheek. Naar analogie van het eindrapport worden de resultaten gepresenteerd per onderzoeksperiode.

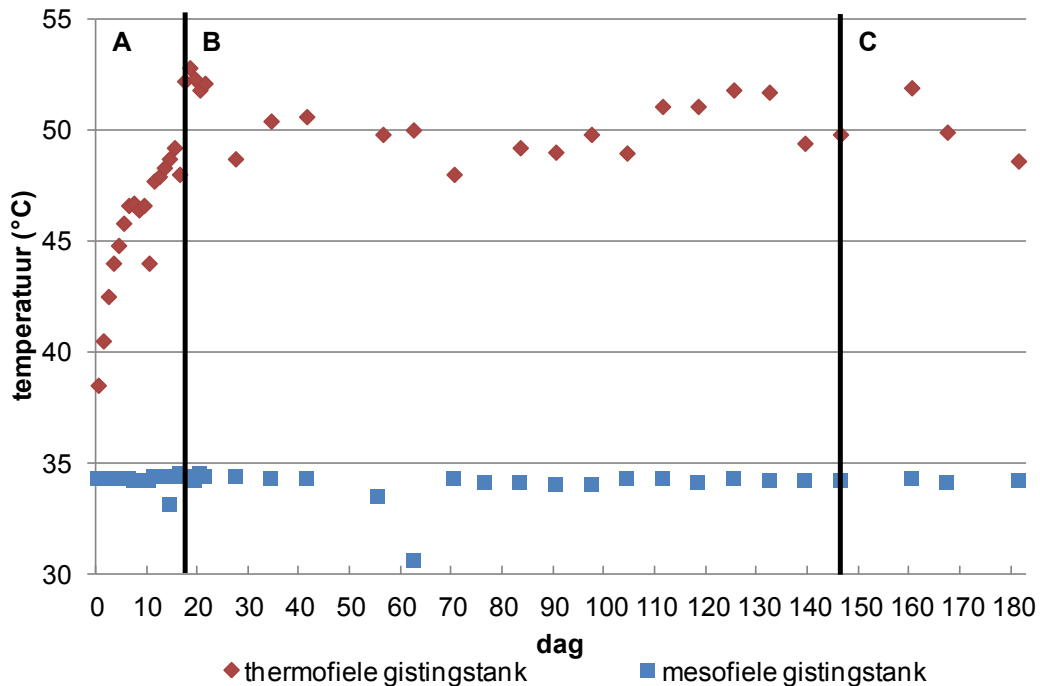
6.2.1 GELIJKLOOP

Bij aanvang van het onderzoek is een periode van 12 dagen gelijkloop aangehouden. Tijdens deze periode zijn beide gistingstanks mesofiel bedreven en zo gelijkmatig mogelijk gevoed met slib. Het verschil in voeding tussen beide tanks was kleiner dan 0,5%. Het verschil in organisch drogestofafbraak was kleiner dan 1,5%. De biogasproductie is tijdens de gelijkloop niet gemeten. Uit de ods-afbraak kan geconcludeerd worden dat de beide tanks vergelijkbaar functioneren. Er kan dus een goede vergelijking gemaakt worden wanneer één van de tanks wordt opgewarmd.

6.2.2 OPWARMINGSFASE

De temperatuur van de thermofiele gistingstank is in 18 dagen verhoogd naar 52°C. Overigens was de temperatuur in de thermofiele gistingstank bij aanvang van het opwarmen 38,5°C, wat hoger is dan de temperatuur in de mesofiele gistingstank (34°C). Van dag 13 tot en met dag 18 is de voeding aan beide tanks tijdelijk stopgezet om de benodigde hoeveelheid warmte te beperken en verzuring te voorkomen. Vier dagen na het bereiken van de temperatuur van 52°C is overgegaan op volledige voeding van beide gistingstanks. De temperatuur van 52°C kon door technische knelpunten niet worden vastgehouden. Tijdens het gehele onderzoek varieerde de temperatuur tussen 48°C en 52°C (gemiddeld 50°C, zie afbeelding 6.1).

AFBEELDING 6.1 TEMPERAATUURVERLOOP TIJDENS OPWARMING (A), AANPASSING (B) EN VERGELIJKINGSFASE (C)



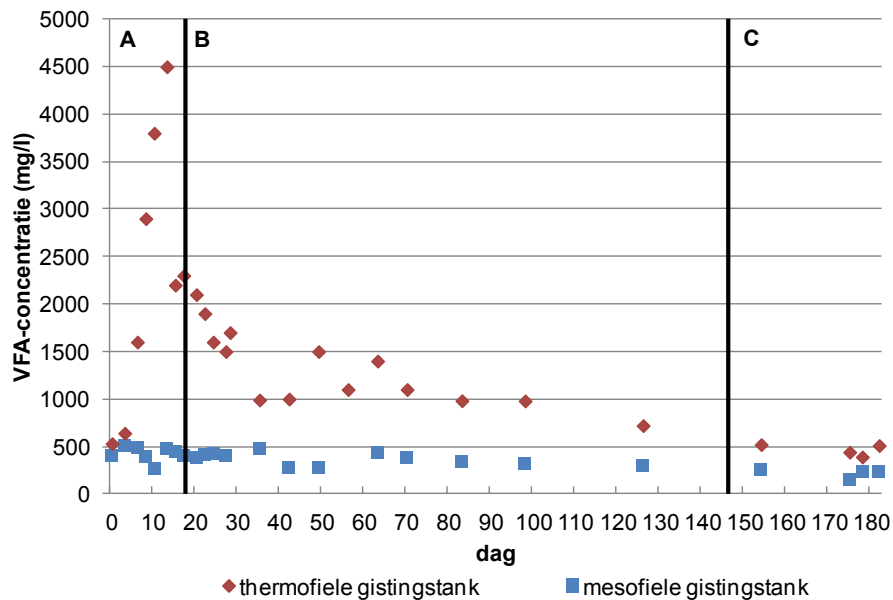
Tijdens het opwarmen van de thermofiele tank steeg de vetzuurconcentratie en daalde de alkaliniteit. Door de voeding tijdelijk te stoppen heeft dit niet tot verzuring van het gistingproces geleid. Tijdens de opwarmfase fluctueerde het methaangehalte in het biogas (35-70%), wat zorgde voor problemen met de bedrijfsvoering van de WKK.

6.2.3 ADAPTATIE

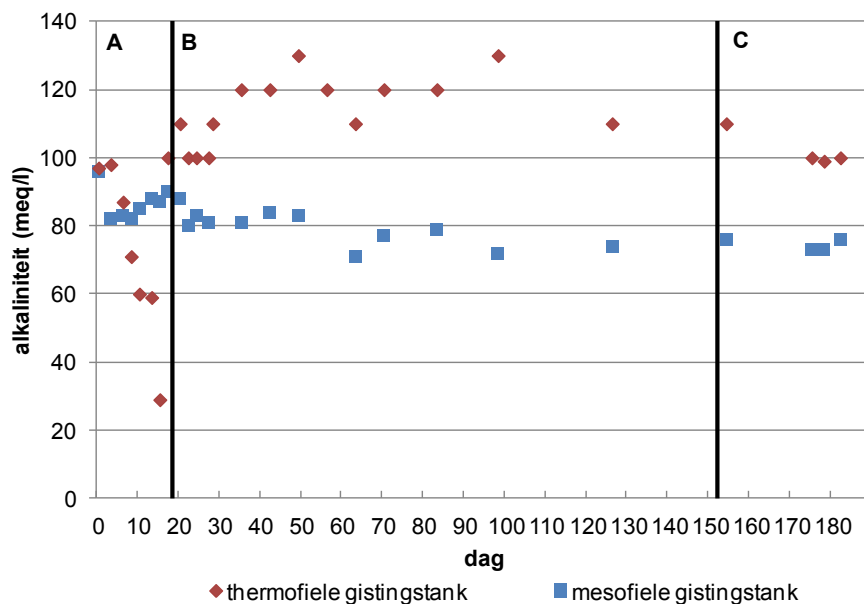
Bij aanvang is aangenomen dat een periode van twee sibleeftijden (ca. 50 dagen) voldoende zou zijn voor aanpassing van de gistingcultuur aan thermofiele omstandigheden. Tijdens het praktijkonderzoek bleek echter dat hiervoor meer tijd nodig was. Dit kan worden afgeleid uit de vetzuurconcentratie (afbeelding 6.2). Bij opwarming nam deze sterk toe, om vervolgens te gaan dalen. Vetzuren worden door methanogene micro-organismen omgezet in methaan. Bij hogere temperatuur kunnen mesofiele methanogene organismen niet overleven. Daardoor stijgt de vetzuurconcentratie. In een mesofiele gistingstank zijn echter ook lage aantallen thermofiele methanogene organismen aanwezig. Bij thermofiele omstandigheden krijgen deze de overhand. Door hun lagere groeisnelheid duurt het echter enige tijd voor een thermofiele gistingcultuur is ontstaan en de vetzuurconcentratie weer afneemt.

Parallel aan de vetzuurconcentratie is de alkaliniteit (afbeelding 6.3) gemeten. Deze geeft informatie over de buffercapaciteit van de oplossing. Tijdens de opwarming daalde de alkaliniteit in de thermofiele tank sterk, om daarna weer te gaan stijgen en vervolgens redelijk stabiel te blijven. Tijdens de aanpassingsfase en de vergelijkingsfase was de alkaliniteit in de thermofiele tank hoger dan in de mesofiele tank.

AFBEELDING 6.2 VFA-CONCENTRATIES TIJDENS OPWARMING (A), AANPASSING (B) EN VERGELIJKINGSFASE (C)

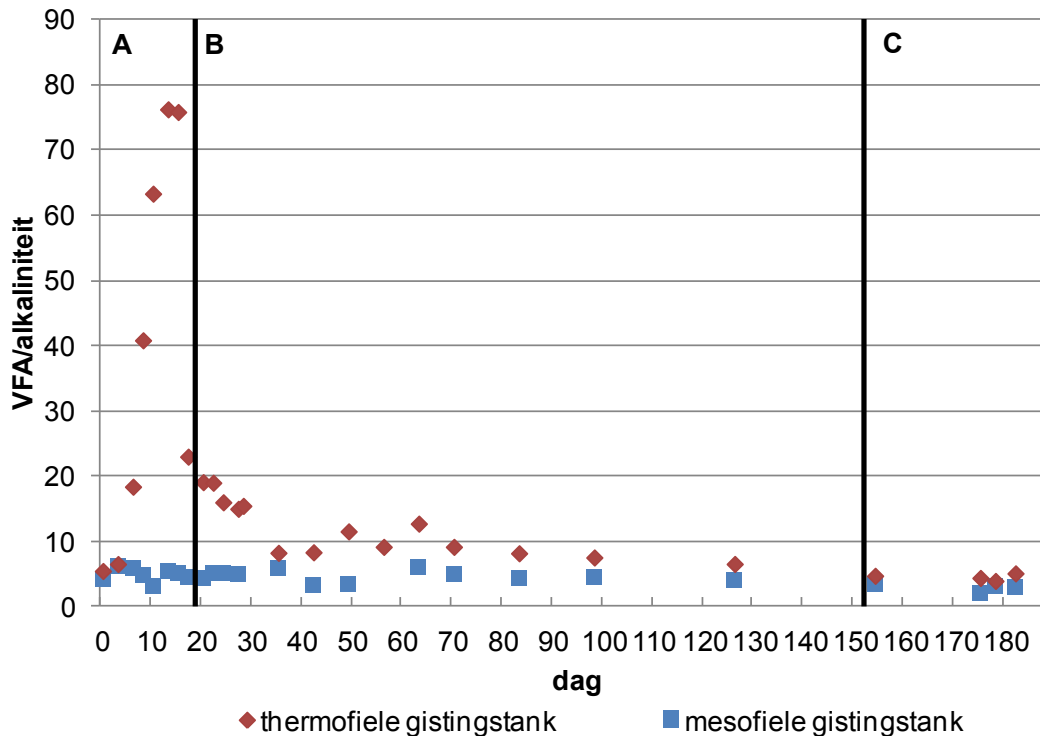


AFBEELDING 6.3 ALKALINITEIT TIJDENS OPWARMING (A), AANPASSING (B) EN VERGELIJKINGSFASE (C)



Met de gegevens uit bovenstaande grafieken is de verhouding tussen vetzuurconcentratie en alkaliniteit bepaald (afbeelding 6.4). Deze geeft een indicatie van de stabiliteit van de reactor. Een stabiel proces heeft een verhouding van circa 5,0. Uit Afbeelding 6.4 blijkt dat de verhouding in de thermofiele tank initieel sterk steeg, om gedurende het onderzoek de stabiele waarde steeds verder te benaderen.

AFBEELDING 6.4 VERHOUDING TUSSEN VETZUURCONCENTRATIE ALKALINITEIT TIJDENS OPWARMING (A), AANPASSING (B) EN VERGELIJKINGSFASE (C)



Aan het einde van de onderzoeksperiode was nog geen stabiele vetzuurconcentratie bereikt. Een stabiele vetzuurconcentratie wijst op een stabiel proces in de gisting en dus op een 'steady state'. Dat is tijdens dit onderzoek dus niet bereikt. Toch zijn de laatste vijf weken van het onderzoek gebruikt als vergelijkingsperiode omdat de vetzuurconcentratie relatief weinig daalde. De 18 weken tussen opwarming en vergelijkingsperiode worden beschouwd als aanpassingsperiode.

Tijdens de aanpassingsperiode namen de organisch drogestofafbraak en de biogasproductie in de thermofiele gistingstank toe. Het methaangehalte in het biogas uit de thermofiele gistingstank was iets lager dan uit de mesofiele tank.

Tijdens de aanpassingsperiode zijn geen problemen opgetreden die wijzen op een instabiel proces. De vetzuurconcentratie daalde na de opwarming en de alkaliniteit steeg en er trad geen schuimvorming op.

6.2.4 VERGELIJKINGSPERIODE

Tijdens de vergelijkingsperiode (vijf weken) was er een duidelijk verschil tussen de mesofiele en de thermofiele gistingstank, zie tabel 6.1. De biogasproductie van de thermofiele tank was 20% hoger dan die van de mesofiele tank (124.301 Nm^3 respectievelijk 103.618 Nm^3). Er werd aan de mesofiele tank iets meer drogestof gevoed dan aan de thermofiele tank. De afbraak van organisch drogestof was 12,9% hoger in de thermofiele tank dan in de mesofiele tank (51% respectievelijk 45%).

De gegevens uit de vergelijkingsperiode zijn samengevat in tabel 6.1.

TABEL 6.1 SAMENVATTING ODS-AFBRAAK EN BIOGASPRODUCTIE VERGELIJKINGSPERIODE

parameter	eenheid	thermofiele tank	mesofiele tank	thermofiel t.o.v. mesofiel
voeding drogestof	kg ds	424.884	435.458	-2,4%
voeding organisch drogestof	kg ods	270.904	277.422	-2,3%
uitgegist ds	kg ds	266.451	282.458	-5,7%
uitgegist ods	kg ods	134.002	153.252	-12,6%
omzetting drogestof	kg ds	158.433	153.000	3,6%
omzetting organisch drogestof	kg ods	136.903	124.170	10,3%
omzetting drogestof	%	37%	35%	6,1%
omzetting organisch drogestof	%	51%	45%	12,9%
productie biogas	Nm ³	124.301	103.618	20,0%
productie methaan	Nm ³	74.795	63.420	17,9%
specifieke biogasproductie	Nm ³ /kg ods afgebroken	0,91	0,83	8,8%
specifieke biogasproductie	Nm ³ /kg ods gevoed	0,28	0,23	20,8%

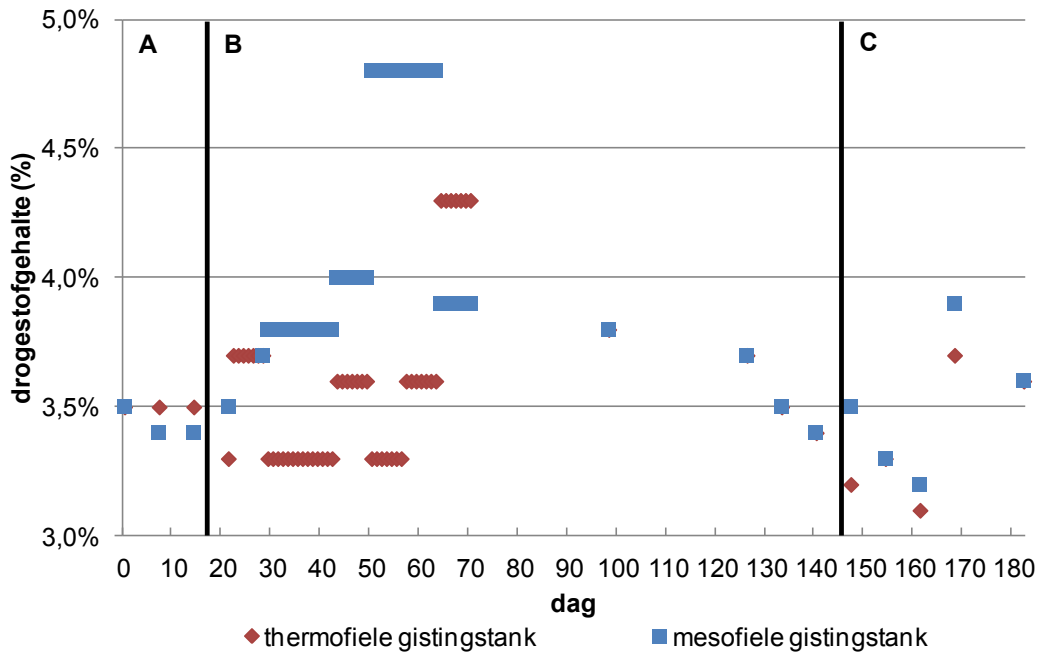
Volgens tabel 6.1 is de omgezette drogestofvracht groter dan de omgezette organisch drogestofvracht. Dit zou gelijk moeten zijn. Er lijkt dus een deel van de gloeirest verdwenen. Ook tijdens de rest van het onderzoek klopte de gloeirestbalans niet helemaal: in sommige periodes leek er gloeirest te verdwijnen, terwijl er in andere periodes meer gloeirest de gisting uit ging dan er werd gevoerd. Hierin is geen trend te onderscheiden. Het verschil kan mogelijk verklaard worden door (achteraf) onvoldoende bemonstering van het ingaande en uitgaande slib en meetfouten van de aangevoerde slibmonsters.

Theoretisch zou de toename van de organische drogestofafbraak gelijk moeten zijn aan de toename in biogasproductie. Dit is niet het geval. Doordat de gloeirestbalans niet klopt en niet verklaard kan worden, is de berekende omzetting van organische drogestof minder betrouwbaar. Voor het aanpassen van de businesscase is daarom de biogasproductie als uitgangspunt gehanteerd. De biogasmeting is een betrouwbare en continue meting.

Dat het verkrijgen van betrouwbare gegevens om een verbetering van de ods-afbraak vast te stellen een grote uitdaging is, bleek al eerder tijdens het STOWA-onderzoek slibdesintegratie [ref. 11]. Tijdens dat onderzoek bleek het aantonen van een significante verbetering van de organische drogestofafbraak met minder dan 10% onmogelijk. De frequentie van metingen en analyses en de variabiliteit van het ingaande slib speelden daarbij een belangrijke rol. Deze factoren hebben waarschijnlijk ook bij het praktijkonderzoek thermofiele slibgisting de betrouwbaarheid van de meetgegevens beïnvloed.

Door de afbraak van drogestof neemt het drogestofgehalte in de slibgisting af. Doordat er bij thermofiele slibgisting meer drogestof wordt afgebroken dan bij mesofiele slibgisting, wordt er in de thermofiele tank een lager drogestofgehalte verwacht. De drogestofgehalten in beide slibgistingstanks zijn weergegeven in afbeelding 6.5. Uit deze grafiek blijkt dat het ds-gehalte in de thermofiele tank gelijk of lager was dan dat in de mesofiele tank. Er is echter te veel variatie in de meetdata om een trend te kunnen waarnemen.

AFBEELDING 6.5 DROGESTOFGEHALTE IN HET UITGEGISTE SLIB TIJDENS OPWARMING (A), AANPASSING (B) EN VERGELIJKINGSFASE (C)



NUTRIËNTEN

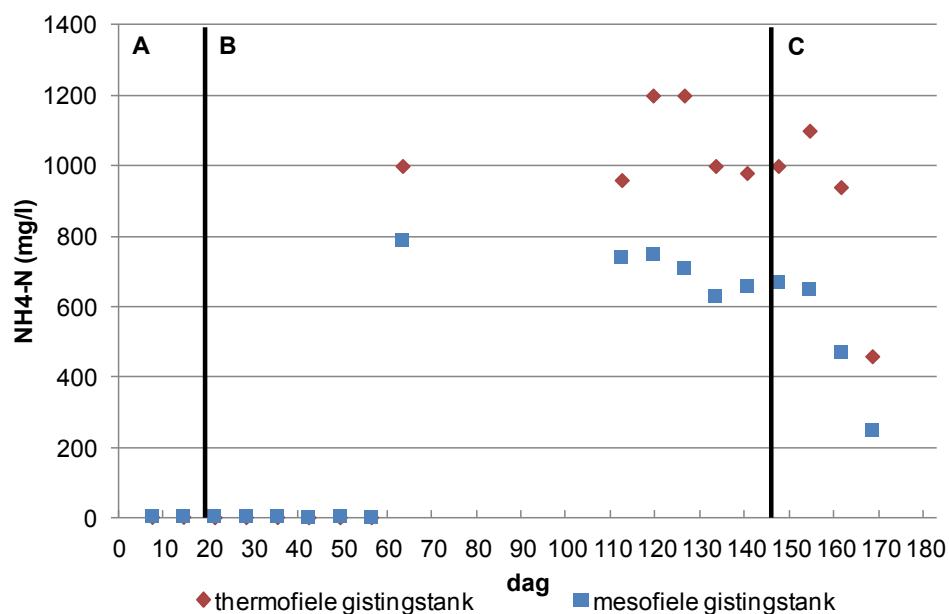
Tijdens het onderzoek is een aantal keer de ammoniumconcentratie in het centraat van het uitgegiste slib gemeten in een extern lab (afbeelding 6.6). Tijdens de vergelijkingsperiode was deze gemiddeld 875 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ bij thermofiele gisting en 510 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ bij mesofiele gisting. Het ammoniumgehalte in de thermofiele slibgisting was dus hoger dan in de mesofiele slibgisting. Een complete stikstofbalans kan echter niet worden gemaakt, omdat alleen het gehalte Kjeldahl-stikstof in het ingaande slib en de ammoniumconcentratie in het centraat bekend zijn.

Het verschil in stikstofconcentratie is groter dan op basis van de drogestofafbraak verwacht wordt. Volgens literatuur is het stikstofgehalte in drogestof 1,4 - 4% in primair slib en 2,5-5% in secundair slib [ref. 12]. Op basis van het stikstofgehalte en de gemeten drogestofafbraak kan worden berekend wat de te verwachten stikstofconcentratie is. Voor de situatie op rwzi Bath (1:1 verhouding primair:secundair slib) is een gemiddeld stikstofgehalte van 4% in de drogestof aangenomen. De resultaten staan in tabel 6.2. Deze tabel voorspelt in de thermofiele tank een lager gehalte (813 mg/l) en in de mesofiele tank een hoger gehalte (775 mg/l) stikstof in het centraat dan is gemeten tijdens het praktijkonderzoek. Hiervoor is niet direct een verklaring. Mogelijk worden bij thermofiele gisting eiwitten/aminozuren afgebroken die tijdens mesofiele gisting in oplossing blijven. Ook hier kan echter de minder betrouwbare meting van drogestof een rol spelen.

TABEL 6.2 VERWACHT STIKSTOFGEHALTE IN GISTINGSTANKS

parameter	eenheid	thermofiele tank	mesofiele tank	thermofiel t.o.v. mesofiel
stikstofgehalte	% van ds	4%	4%	
omzetting ds	kg ds	158.433	153.000	3,55%
stikstof vrijgekomen	kg N	6.337	6.120	
volume gevoed	m ³	7.793	7.897	-1,32%
stikstofconcentratie	mg/l	813	775	4,93%

AFBEELDING 6.6 AMMONIUM-STIKSTOFCONCENTRATIE TIJDENS OPWARMING (A), AANPASSING (B) EN VERGELIJKINGSFASE (C)



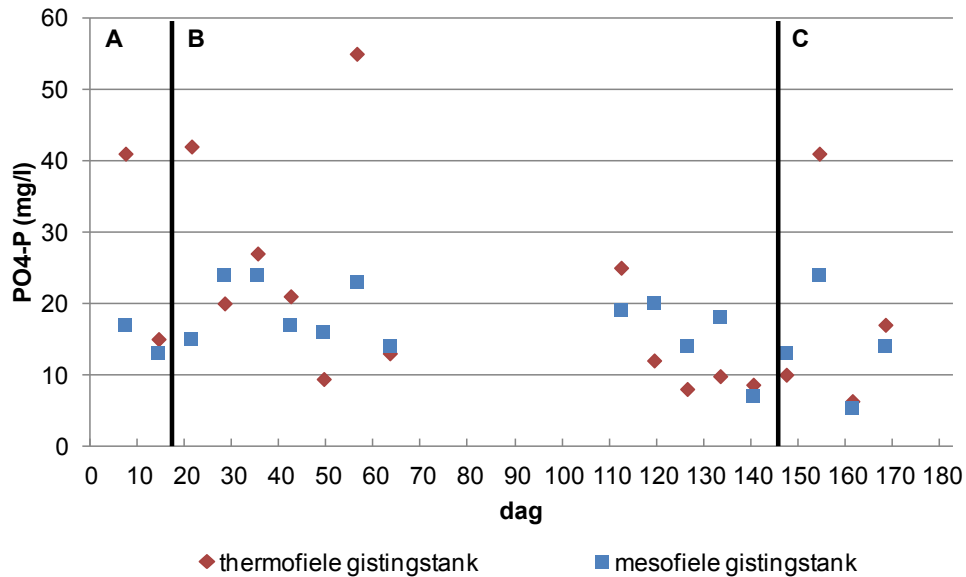
Tijdens het onderzoek zijn ook metingen verricht aan de orthofosfaatconcentratie in het centraat van het uitgegiste slib door een extern lab (afbeelding 6.7). Daarnaast hebben ook het waterschap en Colsen metingen verricht (niet weergegeven). Er waren grote verschillen tussen de metingen uitgevoerd door het waterschap zelf (range vergelijkbaar met extern lab), de metingen door een extern lab en de metingen uitgevoerd door Colsen (thermofiel gemiddeld 188 mg/l, mesofiel gemiddeld 67 mg/l). Daarom zijn geen uitspraken te doen over het vrijkomen van fosfaat en struvietvorming bij thermofiele slibgisting. Hoge concentraties orthofosfaat werden niet verwacht, omdat ijzer wordt gedoseerd op de hoofdzuivering.

BIOGASKWALITEIT

Het methaangehalte van het biogas is voor beide gistingstanks gemeten. Tijdens de vergelijkingsperiode was het methaangehalte in het gas uit de thermofiele tank gemiddeld 60,1% versus 61,2% in dat uit de mesofiele tank. Dit is geen significant verschil. Thermofiele slibgisting leidde in dit geval dus niet tot een hoger methaangehalte in het biogas.

Ook het H₂S-gehalte in het biogas is gemeten. Dit bedroeg 80 ppm in het biogas uit de thermofiele tank en 68 ppm in dat uit de mesofiele tank. Deze gehalten zijn relatief laag. Het handboek slibgisting geeft een gemiddelde waarde van 400 ppm en een range van 100-5000 ppm aan [ref. 5]. De lage H₂S-gehalten worden waarschijnlijk veroorzaakt door ijzerdosering in de hoofdzuivering. Ijzer kan zwavel vastleggen als ijzersulfaat, waardoor geen H₂S vrijkomt.

AFBEELDING 6.7 ORTHOFOSFAAT TIJDENS OPWARMING (A), AANPASSING (B) EN VERGELIJKINGSFASE (C)



SLIBONTWATERING

De slibontwatering is niet uitgebreid onderzocht. Wel zijn enkele verkennende proeven op de zeefbandpersen uitgevoerd. De conditionering voor ontwatering was gebaseerd op ervaringen met mesofiel slib. Zo is een PE gebruikt dat optimaal is voor mesofiel vergist slib. Tijdens de ontwateringsproeven bleken de ontwateringseigenschappen van het thermofiele slib anders dan die van het mesofiele slib. Een andere conditionering, zoals ander type PE, kan daarom andere resultaten geven. Bij een PE-dosering van 12,5 g/kg ds werd thermofiel slib ontwaterd tot een ds-gehalte 22-23%, terwijl het mesofiel slib bij deze dosering tot een ds-gehalte 24-25% ontwaterd wordt. Om een drogestofgehalte van 24% te bereiken met het thermofiele slib is een PE-dosering van 15,3 g/kg ds nodig.

Op basis van deze verkennende proeven kan nog geen conclusie worden getrokken over het effect van thermofiele slibgisting op de ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib. De proeven op rwzi Bath wijzen in de richting van een afname van de ontwaterbaarheid na thermofiele slibgisting. Ook op de rwzi Leeuwarden is een verslechtering van de ontwaterbaarheid geconstateerd. In beide gevallen gaat het echter om verkennende proeven. Om het effect op ontwaterbaarheid met meer zekerheid te kunnen vaststellen is verder onderzoek nodig. Aandachtspunten hierbij zijn conditionering en full-scale ontwatering.

6.2.5 VERGELIJKING MET PILOTONDERZOEK

Zoals omschreven in paragraaf 3.4 is voorafgaand aan het praktijkonderzoek pilotonderzoek uitgevoerd op rwzi Bath. Beide onderzoeken worden vergeleken in tabel 6.3. Opvallend is dat de verschillen in (organisch) drogestofomzetting in het pilotonderzoek groter waren dan in het praktijkonderzoek. Ook was het methaangehalte tijdens het pilotonderzoek hoger bij thermofiele vergisting. Dit is tijdens het praktijkonderzoek niet bevestigd. Tijdens het pilotonderzoek is een hogere ammoniumconcentratie gemeten in beide tanks dan tijdens het praktijkonderzoek. Het relatieve verschil tussen mesofiele en thermofiele vergisting was vergelijkbaar.

TABEL 6.3 VERGELIJKING PILOTONDERZOEK EN PRAKTIJKONDERZOEK

parameter	eenheid	pilotonderzoek, thermofiel	pilotonderzoek, mesofiel	praktijkonderzoek, thermofiel	praktijkonderzoek, mesofiel
temperatuur	°C	52	35	50 (48-52)	34
drogestofomzetting	%	40,8	26,9	37,3	35,1
organisch drogestofomzetting	%	51,5	39,0	50,5	44,8
methaangehalte in biogas	%	65	60	60,1	61,2
specifieke biogasproductie	Nm ³ /kg ods	0,81	0,78	0,91	0,83
ammoniumconcentratie	mg/l	1.430	811	875	510
orthofosfaatconcentratie	mg/l	501	80	-	-

7

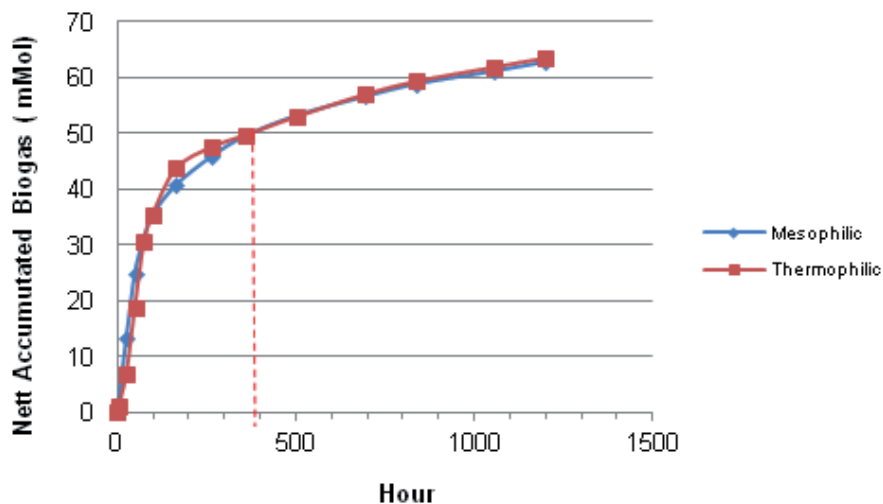
RESULTATEN LABONDERZOEK

Tijdens het praktijkonderzoek zijn aanvullend enkele proeven op labschaal uitgevoerd aan de TU Delft. Hier is een meting van de specifieke methanogene activiteit (SMA) en van het biomethaanpotentieel (BMP) uitgevoerd. De rapportage van deze proeven is toegevoegd in bijlage VIII. De uitkomsten zijn hier samengevat.

Tijdens de SMA-proef werd aan het mesofiele en aan het thermofiele slib een bekende hoeveelheid azijnzuur (substraat) toegevoegd. Ook werd een blanco zonder substraat ingezet. Vervolgens werd de methaanproductie per gram drogestof per dag gemeten. Uit de analyse bleek dat de activiteit van het thermofiele slib ongeveer twee maal zo groot was als die van het mesofiele slib. Daarnaast bleek dat het mesofiele slib nog niet volledig gestabiliseerd was, omdat ook de blanco nog relatief veel gas produceerde.

Tijdens de BMP-proef werd een batch-test ingezet met thermofiel en mesofiel slib. Hieraan werd als substraat een mengsel van primair en secundair slib toegevoegd. Vervolgens is de biogasproductie als functie van tijd gemeten bij 55°C (thermofiel) en 37°C (mesofiel). Uit deze proef bleek dat zowel de totale hoeveelheid biogas als de productiesnelheid gelijk was onder mesofiele en thermofiele omstandigheden, zie afbeelding 7.1.

AFBEELDING 7.1 BIOGASPRODUCTIE PER FLES, GEMIDDELDE VAN 3 METINGEN



Uit deze proeven kan worden geconcludeerd dat:

- het thermofiele slib een tweemaal zo hoge activiteit vertoont als het mesofiele slib;
- het slib na thermofiele vergisting verder gestabiliseerd is;
- het biogasproductiepotentieel voor beide slibben gelijk is.

De verwachte hoeveelheid biogas bij thermofiele vergisting is op basis van deze proeven niet hoger dan bij mesofiele vergisting. In de praktijk wordt echter wel een hogere biogasproductie waargenomen. Ook blijkt het thermofiele slib verder gestabiliseerd. Dit kan mogelijk worden verklaard door de hogere activiteit van het thermofiele slib en door de lagere viscositeit, waardoor betere menging plaatsvindt. Tijdens de BMP-proef waren beide slibben goed gemengd en was er geen verschil in biogasproductiesnelheid meetbaar.

8

AANPASSING BUSINESSCASE

In 2012 is de eerste businesscase thermofiele slibgisting gepubliceerd [ref. 1]. Hierin werd aanbevolen om nader onderzoek uit te voeren om de uitgangspunten voor biogasproductie, ods-afbraak en ontwaterbaarheid bij thermofiele slibgisting te toetsen. Daarom wordt met de resultaten van het praktijkonderzoek de oorspronkelijke businesscase beoordeeld en waar nodig aangepast.

8.1 UITGANGSPUNTEN

Nagenoeg alle uitgangspunten van de oorspronkelijke businesscase kunnen gehandhaafd blijven. De organische drogestofafbraak en resulterende biogasproductie vereisen aanpassing. Dit wordt toegelicht in paragraaf 8.1.1. Ook de extra stikstofvracht door thermofiele slibgisting is aangepast. Dit wordt toegelicht in paragraaf 8.1.2. De uitgangspunten voor ontwaterbaarheid zijn niet aangepast. De ontwaterbaarheid van het slib lijkt weliswaar af te nemen, maar de proeven waren slechts verkennend. Een verslechtering van de ontwaterbaarheid bij thermofiele slibgisting is wel meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.

8.1.1 BEREKENING DROGESTOFAFBRAAK

De uitgangspunten van de slibstromen in de verschillende varianten zijn weergegeven in tabel 8.1. De varianten zijn gelijk aan die in de oorspronkelijke businesscase [ref. 1]. Mesofiele slibgisting geldt als nulsituatie.

In de oorspronkelijke businesscase werd de drogestofafbraak voorspeld met het Chen & Hashimoto-model [ref. 11]. Dit model is opgesteld voor mesofiele condities. Het voorspelt de organische drogestofafbraak van slib en daarmee biogasproductie tijdens gisting op basis van temperatuur en verblijftijd. Een aanpassing van het model voor thermofiele slibgisting is gewenst. Deze aanpassing kan nu helaas nog niet gedaan worden. Tijdens het praktijkonderzoek is namelijk alleen de biogasproductie voldoende betrouwbaar vastgesteld. Op basis van die waarneming kan een aanpassing van het model voor thermofiele condities nog niet voldoende worden onderbouwd.

Het Chen & Hashimoto-model voorspelt een toename in de drogestofafbraak van 13% bij omschakeling van mesofiele naar thermofiele gisting. Uit het praktijkonderzoek blijkt dat een relatieve toename van 10-20% te verwachten is. Voor de aangepaste businesscase wordt uitgegaan van een relatieve toename van 20% van de biogasproductie. Dit is gemeten tijdens de vergelijkingsfase van het praktijkonderzoek. De biogasproductie bleek de meest betrouwbare parameter om de verandering van de slibgisting te meten. Een toename van 20% in de biogasproductie betekent ook een 20% hogere organisch drogestofafbraak. Tijdens de gevoeligheidsanalyse wordt ook de terugverdientijd bij een relatieve toename in de organisch drogestofafbraak van 10% berekend.

TABEL 8.1 OVERZICHT UITGANGSPUNTEN BIJ DE VERSCHILLENDE VARIANTEN

variant	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO / thermofiel+
aanvoer extern slib	nee	nee	ja	ja
verblijftijd (d)	24	24	12	12
temperatuur (°C)	32	55	55	55
primaïr slib (% ds)/(%) ods)	5,4/ 66,6	5,4/ 66,6	5,4/ 66,6	5,4/ 66,6
secundair slib (% ds) ¹ /(%) ods)	6,0/ 63,5	6,0/ 63,5	7,0/ 63,5	7,0/ 63,5
extern secundair slib (% ds) ¹ /(%) ods)	-	-	7,0/ 65	7,0/ 65
totaal naar TSO (% ds)	-	-	-	7
totaal naar gisting (% ds)	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%
organische stof naar gisting (% van ds)	59,4%	59,4%	62,5%	62,3%
minimale SLT	2,7	-	-	-
maximale afbreekbaarheid SS/PS	38/58	-	-	-
afbraaksnelheid SS/PS	1,5/1	-	-	-
ontwaterd slib concentratie (% ds)	21,6	21,6	21,6	28,1
verhouding primaïr/secundair (ds)	1	1	0,3	0,3

Toelichting:

Het ds-gehalte van secundair slib in de varianten zonder extern slib is gebaseerd op de huidige indikgraad van de bandindickers op rwzi Bath. In de variant thermofiel+ is uitgegaan van een maximale aanvoer van extern slib en maximale ds-belasting van de slibgisting. Hiertoe is gerekend met een (maximale) indikgraad van 7 % ds. Als gevolg van de hogere indikgraad is een verhoging van het specifieke PE-verbruik van 1 g/kg ds gehanteerd.

Door toepassing van stoominjectie voor opwarming van het TSO-proces daalt het drogestofgehalte. Hierbij is uitgegaan van een watertoevoeging (gecondenseerde stoom) van 10 % van de ingaande stroom (opgave Sustec Consulting & Contracting).

De organische drogestofafbraak van extern secundair slib is gelijk gesteld aan die van secundair slib van rwzi Bath. In tabel 8.2 staan de afbraakrendementen van de oorspronkelijke businesscase en in tabel 8.3 die van de aangepaste businesscase. In alle gevallen is de afbraak toegenomen, al is dat door afronding niet altijd zichtbaar.

TABEL 8.2 (ORGANISCH) DROGESTOFAFBRAAK IN OORSPRONKELIJKE BUSINESSCASE

parameter	eenheid	mesofiel ds	mesofiel ods	thermofiel ds	thermofiel ods	thermofiel+ ds	thermofiel+ ods	TSO/thermofiel+ ds	TSO/thermofiel+ ods
primaïr slib	%	32	49	37	56	36	55	36	55
secundair slib	%	18	34	19	36	18	35	24	46
extern secundair slib	%	-	-	-	-	23	35	30	46
totaal (o)ds afbraak	%	25	42	28	48	25	39	30	48

TABEL 8.3 (ORGANISCH) DROGESTOFAFBRAAK IN AANGEPASTE BUSINESSCASE

parameter	eenheid	mesofiel ds	mesofiel ods	thermofiel ds	thermofiel ods	thermofiel+ ds	thermofiel+ ods	TSO/thermofiel+ ds	TSO/thermofiel+ ods
primaair slib	%	32	49	40	60	39	58	39	58
secundair slib	%	18	34	20	38	19	35	24	47
extern secundair slib	%	-	-	-	-	23	35	30	47
totaal (o)ds afbraak	%	25	42	30	51	25	41	31	49

Met de organische drogestofafbraak (tabel 8.3) zijn drogestofbalansen opgesteld voor beide schaalgroottes (tabel 8.4 en tabel 8.5).

TABEL 8.4 DROGESTOFBALANS SCHAALGROORTE 150.000 I.E.

parameter	eenheid	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/ thermofiel+
slibvracht naar gisting					
primaair slib	kg/d	4.342	4.342	4.342	4.342
secundair slib	kg/d	4.378	4.378	4.378	4.378
extern secundair slib	kg/d			11.111	9.703
totaal	kg/d	8.720	8.720	19.830	18.422
slib naar ontwatering					
vracht	kg/d	6.539	6.105	14.787	12.741
debiet	m ³ /d	153	153	302	302
ds-gehalte	% ds	4,3	4,0	4,9	4,2
ontwaterd slib					
ds gehalte	%	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%
hoeveelheid	m ³ /d	30	28	68	45
besparing t.o.v. huidige situatie					
slibafvoer rwzi	m ³ /d	30	30	30	30
slibafvoer extern slib	m ³ /d	0	0	51	45
totale slibafvoer	m ³ /d	0	30	82	75
reductie slibafzet	m ³ /d	0	2	13	30
reductie slibafzet	ton nat slib /jr	0	734	4.837	10.883

TABEL 8.5 DROGESTOFBALANS SCHAALGROORTE 490.000 I.E.

parameter	eenheid	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/ thermofiel+
slibvracht naar gisting					
primair slib	kg/d	13.025	13.025	13.025	13.025
secundair slib	kg/d	13.134	13.134	13.134	13.134
extern secundair slib	kg/d			33.332	29.108
totaal	kg/d	26.159	26.159	59.491	55.267
slib naar ontwatering					
vracht	kg/d	19.616	18.314	44.361	38.223
debiet	m ³ /d	460	460	905	905
gehalte	% ds	4,3	4,0	4,9	4,2
ontwaterd slib					
ds gehalte	%	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%
hoeveelheid	m ³ /d	91	85	205	136
besparing t.o.v. huidige situatie					
slibafvoer rwzi	m ³ /d	91	91	91	91
slibafvoer extern slib	m ³ /d	0	0	154	135
totale slibafvoer	m ³ /d	91	91	245	226
reductie slibafzet	m ³ /d	-	6	40	89
reductie slibafzet	ton nat slib /jr	-	2.201	14.511	32.650

8.1.2 BEREKENING STIKSTOFVRACHT

In de oorspronkelijke businesscase is de hoeveelheid ammonium in het rejectiewater gerelateerd aan de drogestofafbraak. Hierbij werd uitgegaan van een stikstofgehalte van 5% in de drogestof. De metingen tijdens het praktijkonderzoek kwamen niet met deze aanname overeen. De gemeten stikstofconcentratie in de mesofiele gistingstank was lager dan verwacht, terwijl deze in de thermofiele tank hoger was dan verwacht. Daarom is voor deze aangepaste businesscase het stikstofgehalte in het rejectiewater berekend op basis van de gemeten waarden. Hierbij is de hoeveelheid stikstof die vrijkomt gerelateerd aan de hoeveelheid drogestof die wordt afgebroken. De uitkomsten staan in tabel 8.6 en tabel 8.7.

TABEL 8.6 BEREKENING TOENAME STIKSTOFVRACHT IN REJECTIEWATER (150.000 I.E.)

parameter	eenheid	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
gemeten NH ₄ -N-concentratie in rejectiewater (praktijkonderzoek)	mg N/l	510	875		
N-vracht in rejectiewater (praktijkonderzoek)	kg N/d	78	134		
ds-afbraak	kg ds/d	2.181	2.615	5.043	5.681
N vrijgekomen per kg ds	kg N/kg ds	0,0359	0,0513		
N-vracht in rejectiewater (berekend)	kg N/d			259	292
toename t.o.v. mesofiel	kg N/d		56	181	213

TABEL 8.7 BEREKENING TOENAME STIKSTOFVRACHT IN REJECTIEWATER (490.000 I.E.)

parameter	eenheid	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
gemeten NH ₄ -N-concentratie in rejectiewater (praktijkonderzoek)	mg N/l	510	875		
N-vracht in rejectiewater (praktijkonderzoek)	kg N/d	235	403		
ds-afbraak	kg ds/d	6.543	7.845	15.130	17.044
N vrijgekomen per kg ds	kg N/kg ds	0,0359	0,0513		
N-vracht in rejectiewater (berekend)	kg N/d			776	875
toename t.o.v. mesofiel	kg N/d		168	542	640

8.1.3 ENERGIE- EN WARMTEBALANS

De energiebalans is berekend met het door Witteveen+Bos ontwikkelde warmte- en energie-model, evenals in de oorspronkelijke businesscase. Dit model presenteert de warmtebalans op maandniveau, uitgaande van de beschikbare energie uit biogasproductie en de warmtebehoefte van de slibgisting. De warmtebehoefte wordt berekend op basis van maandgemiddelde temperaturen van slib, omgeving en bodem. De uitgangspunten en kengetallen die gehanteerd zijn in de berekening van de afzonderlijke warmtestromen zijn opgenomen in bijlage I en de resultaten in bijlage IV.

Voor de variant TSO/thermofiel+ is de berekening aangepast ten opzichte van de oorspronkelijke businesscase door nieuwe inzichten in TSO. Uitgangspunt hierbij is dat zoveel mogelijk stoom geproduceerd wordt uit de rookgassen van de WKK-installaties. Als in de rookgassen niet genoeg warmte beschikbaar is, wordt een deel van het biogas rechtstreeks verstoofd in een stoomketel voor stoomproductie. Er wordt dan dus minder biogas naar de WKK's gestuurd.

8.1.4 FINANCIËEL-ECONOMISCHE UITGANGSPUNTEN

De uitgangspunten en rekenwaarden voor de berekening van de jaarlijkse kosten zijn niet veranderd. Een overzicht staat in tabel 8.8.

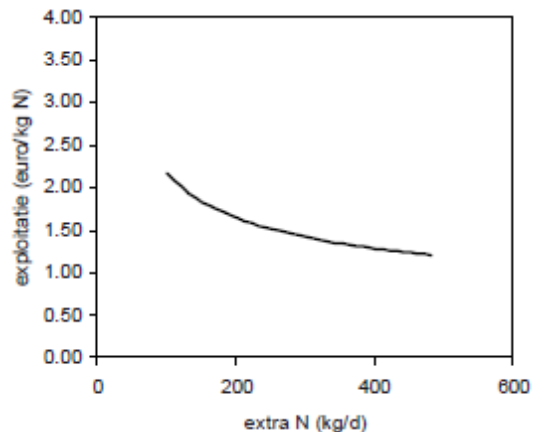
TABEL 8.8 OVERZICHT FINANCIËLE EN ECONOMISCHE UITGANGSPUNTEN

parameter	waarde	eenheid
energieprijs	0,125 ¹⁾	EUR/kWh
aardgasprijs	0,5	EUR/m ³
polymeerkosten	3,5	EUR/kg actief PE
variabele kosten slibeindverwerking	30	EUR/ton ontw. slib
all-in kosten behandeling toegenomen N-vracht	afbeelding 8.1	EUR/ kg N
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	4	EUR/draaiuur
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	6	EUR/draaiuur
onderhoudskosten TSO	2	% van bouwkosten
personeel	45.000	EUR/fte
reële rente	4,75 %	%
afschrijving civiel	40	jaar
annuïteit civiel	0,0563	-
afschrijving werktuigbouw	15	jaar
annuïteit werktuigbouw	0,0947	-
afschrijving elektrotechnisch	15	jaar
annuïteit elektrotechnisch	0,0947	-
staartkostenfactor (BTW, bijkomende kosten en 10 % onvoorzien)	1,5	-

1. Deze prijs is de inkoopprijs. Extra elektriciteitsproductie is verrekend als vermeden inkoop.

Bij de afbraak van slib komt stikstof vrij als ammonium. De mate waarin dit gebeurt wordt toegelicht in paragraaf 8.1.2. Om ammonium uit de deelstroom te verwijderen is deelstroombehandeling nodig. De kosten van deelstroombehandeling hangen af van de schaalgrootte. Afbeelding 8.1 presenteert de exploitatiekosten voor de deelstroombehandeling als functie van de extra stikstofvracht. Dit betreft zowel de operationele lasten als de kapitaallasten. Hieruit zijn de investeringskosten en de operationele lasten afgeleid. Er is van uitgegaan dat de waterlijn de huidige stikstofvracht vanuit de slibgisting kan behandelen, maar dat voor de extra hoeveelheid stikstof door thermofiele slibgisting deelstroombehandeling nodig is.

AFBEELDING 8.1 EXPLOITATIEKOSTEN VOOR DE BEHANDELING VAN DE STIKSTOFVRACHT IN EEN EENTRAPS ANAMMOX REACTOR ALS FUNCTIE VAN DE VRACHT [REF. 14]



8.1.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE

In de businesscase is aangenomen dat de organische drogestofafbraak toeneemt met 20% bij een temperatuurstijging van 32°C naar 55°C. Het praktijkonderzoek liet een toename in de biogasproductie van 20% zien bij een verhoging van de temperatuur van 34°C naar 50°C. De gemeten toename in organische drogestofafbraak bedroeg circa 10%. Daarnaast lieten verkennende proeven een slechtere ontwaterbaarheid van thermofiel vergist slib zien. Om de gevoeligheid voor deze aspecten te toetsen zijn drie gevoeligheidsanalyses uitgevoerd:

De extra toename in biogasproductie bij thermofiele gisting bij 55°C in plaats van 50°C is bepaald. Dit is gedaan door de modelmatig voorspelde toename bij 50°C te correleren aan 20% gemeten toename en dezelfde relatieve toename toe te passen bij 55°C.

Een toename in biogasproductie en organische drogestofafbraak van 10% is gehanteerd.

Er is een afname van de ontwaterbaarheid van thermofiel vergist slib van 10% toegepast. De ontwaterbaarheid neemt af van 21,6% naar 19,4% ds in slibkoek bij een gelijke PE-dosering. De ontwaterbaarheid van TSO voorbehandeld slib is niet aangepast.

8.2 RESULTATEN

De gedetailleerde resultaten van de uitwerking van de varianten en bijhorende kostenramingen zijn opgenomen in bijlage II en III. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste resultaten samengevat.

8.2.1 WARMTE EN ENERGIE

Tabel 8.9 geeft de energiebalans op hoofdlijnen weer, evenals de periodiek benodigde inkoop van aardgas en de elektriciteitsproductie uit biogas. De uitgebreide balans is opgenomen in bijlage IV. Uit Tabel 8.9 blijkt dat op beide schaalgroottes in alle varianten voldoende biogas geproduceerd wordt om te kunnen voorzien in de warmtebehoefte. Ook voor stoomproductie in de variant TSO/thermofiel+ is genoeg warmte uit biogas beschikbaar. Wel wordt een deel van het biogas verstoekt in een stoomketel om voldoende stoom te kunnen genereren. Voor de productie van stoom is geen inkoop van aardgas nodig.

TABEL 8.9 WARMTE- EN ENERGIEBALANS PER SCHAALGROOTTE

onderdeel	eenheid	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/ thermofiel+
schaalgrootte 150.000 i.e.					
biogasproductie	m ³ /jr	697.000	835.000	1.611.000	1.815.000
energie-inhoud biogas	TJ/jr	16,0	19,2	37,0	41,7
warmtebehoefte	TJ/jr	9,5	10,0	17,9	3,1
energiebehoefte voor stoomopwekking	TJ/jr				13,9
energie-inhoud restbiogas	TJ/jr	6,5	9,2	19,1	24,8
aardgas voor stoomopwekking	m ³ /jr	-	-	-	0
elektriciteitopbrengst uit bestaande wkk	MWh/jr	1.514	1.814	3.378	2.632
elektriciteitopbrengst uit nieuwe wkk	MWh/jr		-	123	0
toegenomen opbrengsten	MWh/jr		300	1.864	1.117
schaalgrootte 490.000 i.e.					
biogasproductie	m ³ /jr	2.090.000	2.506.000	4.833.000	5.444.000
energie-inhoud biogas	TJ/jr	48,0	57,6	111,1	125,1
warmtebehoefte	TJ/jr	27,8	28,3	52,0	7,5
energiebehoefte voor stoomopwekking	TJ/jr				41,8
energie-inhoud restbiogas	TJ/jr	20,3	29,3	59,1	75,9
aardgas voor stoomopwekking	m ³ /jr	-	-	-	0
elektriciteitopbrengst uit bestaande WKK	MWh/jr	4.540	5.444	10.133	7.876
elektriciteitopbrengst uit nieuwe WKK	MWh/jr		-	367	0
toegenomen opbrengsten	MWh/jr		904	5.593	3.336

8.2.2 BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN

De dimensionering van de meeste onderdelen is gelijk gebleven. Hierdoor zijn ook de bouw- en investeringskosten niet gewijzigd. De deelstroombehandeling en WKK-installaties vormen hierop een uitzondering. Door de hogere afbraak van organische drogestof wordt meer biogas geproduceerd en komt meer stikstof vrij. Hierdoor zijn de kosten voor WKK-installaties en deelstroombehandeling hoger. In de variant met TSO wordt minder biogas verstoekt in de WKK's en meer in de stoomketel. Hierdoor wordt niet geïnvesteerd in een nieuwe WKK.

Tabel 8.10 geeft een overzicht van de bouw- en investeringskosten per schaalgrootte.

TABEL 8.10 BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN PER SCHAALGROOTTE (EUR)

onderdeel	thermofiel	thermofiel+	TSO/ thermofiel+
schaalgrootte 150.000 i.e.	(EUR)	(EUR)	(EUR)
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	300.000	300.000
aanpassingen t.b.v. warmteterugwinning	100.000	150.000	150.000
thermische slibontsluiting ¹⁾	-	-	1.704.000
wkk ²⁾	-	21.000	-
voorzieningen ontvangst- en ontwatering extern slib	-	200.000	200.000
deelstroombehandeling ³⁾	255.000	577.000	622.000
totaal bouwkosten	355.000	1.248.000	2.976.000
investeringskosten	532.500	1.872.000	4.464.000
schaalgrootte 490.000 i.e.			
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	600.000	600.000
aanpassingen voor thermofiele gisting	250.000	400.000	400.000
thermische slibontsluiting ¹⁾	-	-	3.408.000
wkk ²⁾	-	63.000	-
voorzieningen ontvangst en ontwatering extern slib	-	400.000	400.000
deelstroombehandeling ³⁾	554.000	1.183.000	1.281.000
totaal bouwkosten	804.000	2.646.000	6.089.000
investeringskosten	1.026.000	3.969.000	9.133.500

1. Dit betreft een pakketprijs voor de TSO en randapparatuur zoals een stoomketel. Wegens recente ervaringen met TSO is de prijs uit de oorspronkelijke businesscase met 20% verhoogd.
2. In de oorspronkelijke businesscase was in de variant TSO/thermofiel+ extra WKK-capaciteit nodig om al het biogas te verbranden. Door het aanpassen van de berekening van deze variant wordt een deel van het biogas verstoekt in een stoomketel voor stoomproductie, waardoor geen extra WKK niet meer nodig is. Door de grotere toename in biogasproductie is in de aangepaste businesscase in de variant thermofiel+ juist wel een extra WKK nodig. Om de noodzaak van een extra WKK te bepalen is de biogasproductie per uur berekend op basis van de gemiddelde jaarproductie en de productiefactor per maand.
3. De hoeveelheid stikstof die moet worden behandeld in de deelstroomreactor is significant hoger dan in de oorspronkelijke businesscase werd ingeschat op basis van drogestofafbraak en een vast stikstofgehalte (5% van de ds-vracht). De gemeten hoeveelheid NH₄-stikstof na mesofiele vergisting was lager dan verwacht, terwijl de hoeveelheid NH₄-stikstof na thermofiele vergisting juist lager was. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 8.1.2.

8.2.3 JAARLIJKSE KOSTEN EN BATEN

Tabel 8.11 en tabel 8.12 presenteren de jaarlijkse kosten en baten ten opzichte van de huidige situatie (zie bijlage II en bijlage III) voor de gedetailleerde berekeningen).

De belangrijkste kostenposten zijn het polymeerverbruik, de kosten voor deelstroombehandeling en de kapitaalslasten voor thermische slibontsluiting. De elektriciteitsproductie uit biogas levert de belangrijkste besparing. Maar ook de verminderde afzetkosten van uitgegist en ontwaterd slib leveren een forse besparing.

TABEL 8.11 JAARLIJKSE KOSTEN EN BATEN VOOR SCHAALGROOTTE 150.000 I.E. (EUR/JAAR)

kostenpost	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
kosten				
kapitaalslasten extra voorindik- en ontwateringsapparatuur	-	-	43.000	43.000
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	-	14.000	21.000	21.000
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	-	-	-	242.000
kapitaalslasten investeringen WKK	-	-	2.000	-
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	-	-	11.000	11.000
kapitaalslasten deelstroombehandeling	-	34.000	77.000	83.000
bedrijfskosten deelstroombehandeling	-	17.000	38.000	42.000
polymeerdosering ¹⁾	65.000	62.000	67.000	61.000
extra personeel	-	-	5.000	18.000
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	-	-	-	34.000
onderhoud nieuwe WKK	-	-	48.000	-
aardgas inkoop voor o.a. warmtetekort en stoomopwekking	-	-	-	-
totaal jaarlijkse kosten	65.000	127.000	312.000	555.000
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	65.000	79.000	158.000	155.000
opbrengsten				
opbrengsten elektriciteitsproductie	189.000	227.000	438.000	329.000
opbrengsten verminderde slibafzet	-	22.000	145.000	327.000
totaal opbrengsten	189.000	249.000	583.000	656.000
totaal netto opbrengsten (excl. kapitaalslasten)	124.000	170.000	425.000	501.000
Besparing t.o.v. mesofiel		46.000	301.000	377.000
Terugverdientijd (jaar) ²⁾		11,6	6,2	11,8

1 Dit zijn zowel de kosten van polymeerdosering bij extra voorindikking als bij de ontwatering van uitgegist slib. Voor slibontwatering is een dosering van 5,1 g PE/kg ds aangehouden, evenals in de oorspronkelijke businesscase. Gezien de recente ervaringen zal in de praktijk waarschijnlijk een hogere dosering nodig zijn. Voor vergelijkbaarheid van beide businesscases is dit niet aangepast.

2 De terugverdientijd is bepaald door de investering te delen door de jaarlijkse besparing (exclusief kapitaallasten). Deze methode wordt onder meer door Waterschap Reest en Wieden toegepast. Wanneer de kapitaallasten zouden worden meegerekend zou de terugverdientijd oplopen 12,7 jaar voor de variant thermofiel+. De varianten thermofiel en TSO/thermofiel+ zouden een negatieve terugverdientijd hebben, en dus vanuit financieel oogpunt niet meer interessant zijn.

TABEL 8.12 JAARLIJKSE KOSTEN EN BATEN VOOR SCHAALGROOTTE 490.000 I.E. (EUR/JAAR)

kostenpost	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
kosten				
kapitaalslasten extra voorindik- en ontwateringsapparatuur	-	-	85.000	85.000
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	-	36.000	57.000	57.000
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	-	-	-	484.000
kapitaalslasten investeringen WKK	-	-	8.000	-
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	-	-	23.000	23.000
kapitaalslasten deelstroombehandeling	-	74.000	158.000	171.000
bedrijfskosten deelstroombehandeling	-	37.000	79.000	86.000
polymeerdosering ¹⁾	196.000	187.000	200.000	182.000
extra personeel	-	-	5.000	18.000
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	-	-	1.000	68.000
onderhoud nieuwe WKK	-	-	48.000	-
aardgas inkoop voor o.a. warmte tekort en stoomopwekking	-	-	-	-
totaal jaarlijkse kosten	196.000	334.000	664.000	1.174.000
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	196.000	224.000	333.000	354.000
opbrengsten				
opbrengsten elektriciteitsproductie	567.000	680.000	1.312.000	984.000
opbrengsten verminderde slibafzet	-	66.000	435.000	980.000
totaal opbrengsten	567.000	746.000	1.747.000	1.964.000
totaal netto opbrengsten (excl. kapitaalslasten)	371.000	522.000	1.414.000	1.610.000
Besparing t.o.v. mesofiel		151.000	1.043.000	1.239.000
Terugverdientijd (jaar) ²⁾		8,0	3,8	7,4

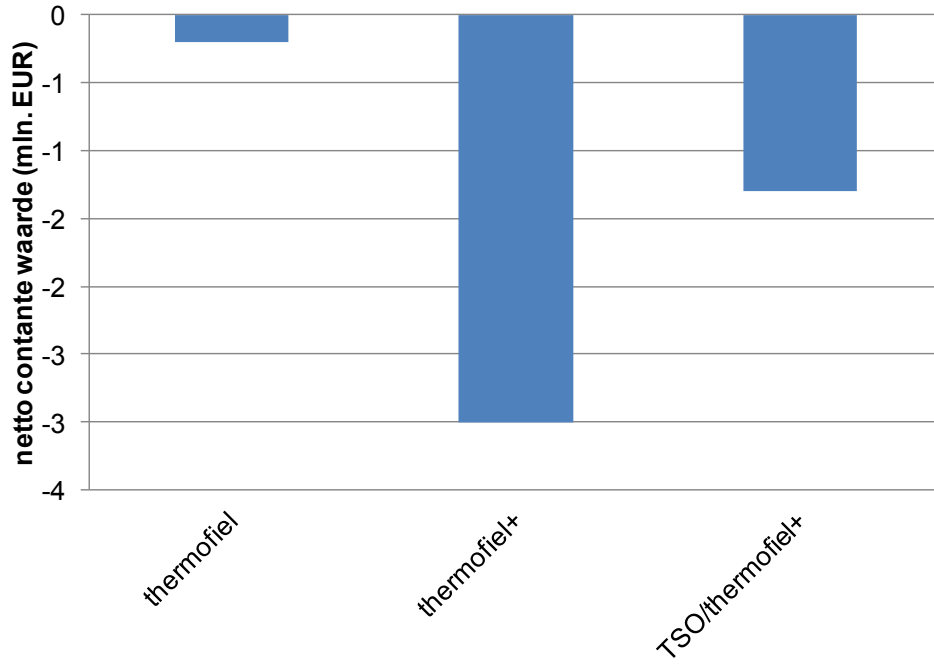
1 Dit zijn zowel de kosten van polymeerdosering bij extra voorindikking als bij de ontwatering van uitgegist slib. Voor slibontwatering is een dosering van 5,1 g PE/kg ds aangehouden, evenals in de oorspronkelijke businesscase. Gezien de recente ervaringen zal in de praktijk waarschijnlijk een hogere dosering nodig zijn. Voor vergelijkbaarheid van beide businesscases is dit niet aangepast.

2 Wanneer de kapitaallasten zouden worden meegerekend zou de terugverdientijd oplopen tot 29,4, 5,6 en 21,8 jaar voor respectievelijk de varianten thermofiel, thermofiel+ en TSO/thermofiel+.

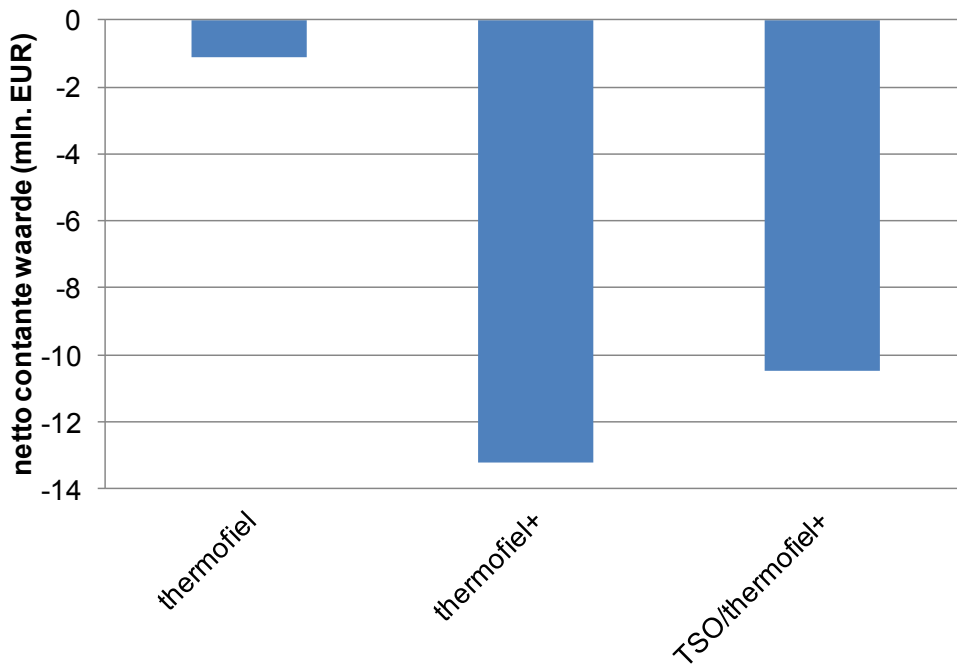
8.2.4 NETTO CONTANTE WAARDE

Om een volledig beeld te schetsen is naast de terugverdientijd ook de netto contante waarde (NCW) berekend. De netto contante waarde kan, evenals de terugverdientijd, worden gebruikt om varianten ten opzichte van elkaar te vergelijken. In een NCW-berekening worden zowel de (her)investeringskosten als de operationele kosten meegerekend. In dit geval is de NCW berekend voor de varianten thermofiel, thermofiel+ en TSO/thermofiel+ ten opzichte van de variant mesofiel. Er is een looptijd van 30 jaar gehanteerd. De berekening staat in bijlage VII. In afbeelding 8.2 en afbeelding 8.3 staan de resultaten van de NCW-berekening voor beide schaalgroottes. In alle gevallen is de netto contante waarde negatief, omdat de besparingen groter zijn dan de investering, gerekend over de gehele looptijd.

AFBEELDING 8.2 NCW BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 150.000 I.E.



AFBEELDING 8.3 NCW BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 490.000 I.E.



8.2.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE

In de businesscase is aangenomen dat de organische drogestofafbraak toeneemt met 20% bij een temperatuurstijging van 32°C naar 55°C. Het praktijkonderzoek liet een toename in de biogasproductie van 20% zien bij een verhoging van de temperatuur van 34°C naar 50°C. De gemeten toename in organische drogestofafbraak bedroeg circa 10%. Daarnaast lieten verkennende proeven een slechtere ontwaterbaarheid van thermofiel vergist slib zien. Om de gevoeligheid voor deze aspecten te toetsen zijn drie gevoeligheidsanalyses uitgevoerd:

1. De extra toename in biogasproductie bij thermofiele gisting bij 55°C in plaats van 50°C is bepaald. Dit is gedaan door de modelmatig voorspelde toename bij 50°C te correleren aan 20% gemeten toename en dezelfde relatieve toename toe te passen bij 55°C.
2. Een toename in biogasproductie en organische drogestofafbraak van 10% is gehanteerd.
3. Er is een afname van de ontwaterbaarheid van thermofiel vergist slib van 10% toegepast. De ontwaterbaarheid neemt af van 21,6% naar 19,4% ds in slibkoek. De ontwaterbaarheid van TSO voorbehandeld slib is niet aangepast.

In tabel 8.13 tot en met tabel 8.15 is de organisch drogestofafbraak in de basisvariant en in de gevoeligheidsanalyses berekend.

TABEL 8.13 (ORGANISCH) DROGESTOFAFBRAAK IN AANGEPASTE BUSINESSCASE - BASISVARIANT

parameter	eenheid	mesofiel ds	mesofiel ods	thermofiel ds	thermofiel ods	thermofiel+ ds	thermofiel+ ods	TSO/thermofiel+ ds	TSO/thermofiel+ ods
primair slib	%	32	49	40	60	39	58	39	58
secundair slib	%	18	34	20	38	19	35	24	47
extern secundair slib	%	-	-	-	-	23	35	30	47
totaal (o)ds afbraak	%	25	42	30	51	25	41	31	49

TABEL 8.14 ORGANISCH DROGESTOFAFBRAAK IN AANGEPASTE BUSINESSCASE - EXTRA TOENAME BIJ 55°C

parameter	eenheid	mesofiel ods	thermofiel ods	thermofiel+ ods	TSO/thermofiel+ ods
primair slib	%	49	65	59	59
secundair slib	%	34	39	36	48
extern secundair slib	%	-	-	36	48
totaal (o)ds afbraak	%	42	54	42	51

TABEL 8.15 ORGANISCH DROGESTOFABRAAK IN Aangepaste BUSINESSCASE - 10% MEER DS-AFBRAAK

parameter	eenheid	mesofiel ods	thermofiel ods	thermofiel+ ods	TSO/thermofiel+ ods
primair slib	%	49	55	53	53
secundair slib	%	34	36	35	46
extern secundair slib	%	-	-	35	46
totaal (o)ds afbraak	%	42	46	39	47

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn samengevat in tabel 8.16 en tabel 8.17. (zie bijlage V voor de gedetailleerde berekeningen). Afbeelding 8.4 en afbeelding 8.5 geven de resultaten grafisch weer.

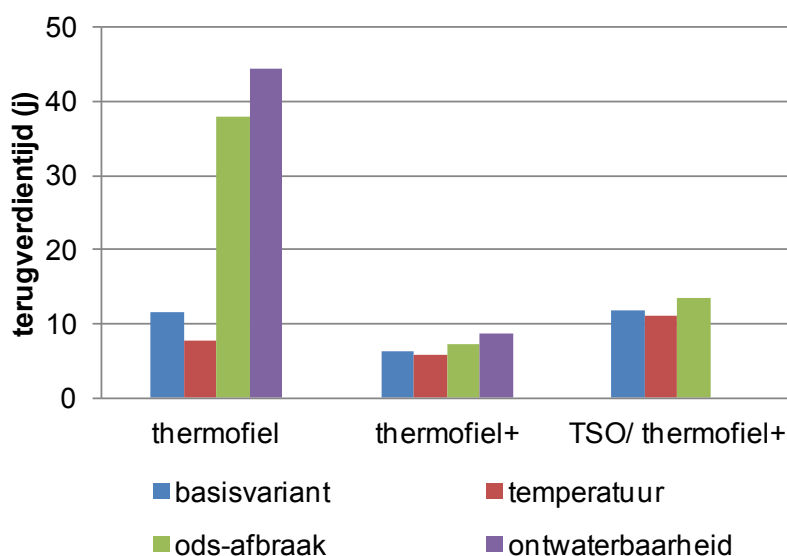
TABEL 8.16 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR DE SCHAALGROOTTE 150.000 I.E., UITGEDRUKT IN TERUGVERDIENTTIJD (TVT) EN JAARLIJKSE BESPARING

Variant	waarde	thermofiel		thermofiel+		TSO/ thermofiel+	
		TVT (jaar)	besparing (EUR/jaar)	TVT (jaar)	besparing (EUR/jaar)	TVT (jaar)	besparing (EUR/jaar)
basisvariant		11,6	46.000	6,2	301.000	11,8	377.000
temperatuur	55°C	7,6	70.000	5,7	323.000	11,0	401.000
ods-afbraak	10%	38,0	14.000	7,2	267.000	13,5	336.000
ontwaterbaarheid	19,4%	44,4	12.000	8,6	218.000	-	-

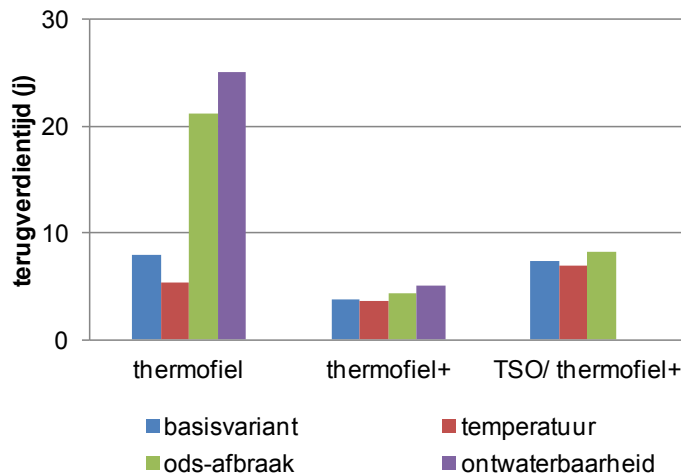
TABEL 8.17 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR DE SCHAALGROOTTE 490.000 I.E., UITGEDRUKT IN TERUGVERDIENTTIJD (TVT) EN JAARLIJKSE BESPARING

Variant	waarde	thermofiel		thermofiel+		TSO/ thermofiel+	
		TVT (jaar)	besparing (EUR/jaar)	TVT (jaar)	besparing (EUR/jaar)	TVT (jaar)	besparing (EUR/jaar)
basisvariant		8,0	151.000	3,8	1.043.000	7,4	1.239.000
temperatuur	55°C	5,3	224.000	3,5	1.104.000	6,9	1.309.000
ods-afbraak	10%	21,2	57.000	4,3	946.000	8,3	1.118.000
ontwaterbaarheid	19,4%	25,1	48.000	5,0	793.000	7,4	1.239.000

AFBEELDING 8.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR SCHAALGROOTTE 150.000 I.E.



AFBEELDING 8.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR SCHAALGROOTTE 490.000 I.E.



De afbeeldingen geven een vergelijkbaar beeld voor beide schaalgroottes, alhoewel de terugverdiëntijd bij een kleinere schaalgrootte langer is. Uit de tabellen en afbeeldingen blijkt dat de variant thermofiel veel gevoeliger is voor de onderzochte aspecten dan de varianten waarin extern slib wordt vergist. Voor alle varianten geldt dat de terugverdiëntijd korter is wanneer een nog hogere afbraak wordt aangenomen bij 55°C dan bij 50°C. Dit effect is het sterkst bij de variant thermofiel. De verklaring is dat in deze variant relatief meer primair slib wordt vergist, waarvoor de afbraak hoger is¹. Bij een lagere ods-afbraak is de terugverdiëntijd langer, omdat opbrengsten uit biogas lager zijn en er meer slib afgezet moet worden.

Een verminderde ontwaterbaarheid bij thermofiele slibgisting zonder TSO resulteert in een langere terugverdiëntijd. Bij de variant thermofiel is de toename het grootst, doordat de opbrengsten van verminderde slibafvoer relatief het grootst zijn. Bij de variant thermofiele slibgisting met extern slib is de bijdrage van de extra elektriciteitsproductie groter. Ook is er in de variant thermofiel+ wel een reductie van de hoeveelheid slib, omdat extern slib wordt vergist dat anders direct zou worden afgezet. In de variant thermofiel moet door de slechtere ontwatering juist meer slib worden afgezet dan in de mesofiele variant.

1 Volgens het Chen & Hashimoto-model is de toename van de afbraak ten opzichte van mesofiele vergisting bij 50°C 7%, terwijl deze bij 55°C 15% bedraagt. Voor secundair slib is de toename 5% respectievelijk 8%.

9

BELANGRIJKSTE VERANDERINGEN

Het aanpassen van de businesscase heeft geleid tot een aantal veranderingen. De meest opvallende is de langere terugverdientijd in de aangepaste businesscase. In tabel 9.1 zijn de terugverdientijden weergegeven in de oorspronkelijke en aangepaste businesscase.

De terugverdientijd is van veel effecten afhankelijk. Doordat de ods-afbraak in het praktijkonderzoek hoger was dan aangenomen in de oorspronkelijke businesscase werd een kortere terugverdientijd verwacht. De hoeveelheid vrijgekomen stikstof per gram drogestof was echter ook hoger dan aangenomen, waardoor er een meer investerings- en operationele kosten zijn voor deelstroombehandeling. Dit effect is het grootst bij de variant thermofiel, omdat de kosten per kilogram stikstof die verwijderd wordt hoger zijn bij een kleinere hoeveelheid stikstof.

Daarnaast stegen in de variant thermofiel+ bij een schaalgrootte van 150.000 i.e. de kosten door het onderhoud van de nieuwe WKK. In de oorspronkelijke businesscase was deze niet nodig. In de varianten met TSO stegen de kosten door verbeterd inzicht in de investeringskosten voor een TSO-installatie.

In de variant TSO/thermofiel+ zijn enerzijds de kosten lager doordat geen extra WKK en geen aardgasinkoop nodig is. De opbrengsten zijn echter ook lager doordat er minder biogas naar de bestaande WKK gaat. Dit heeft te maken met verbeterde inzichten in de warmtebehoefte voor stoomproductie de TSO en niet met de uitkomsten van het praktijkonderzoek.

TABEL 9.1

TERUGVERDIENTTIJD (JAAR) IN DE OORSPRONKELIJKE EN AANGEPASTE BUSINESSCASE

schaalgrootte	businesscase	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
150.000 i.e.	oorspronkelijk	7,0	5,2	10,1
150.000 i.e.	aangepast	11,6	6,2	11,8
490.000 i.e.	oorspronkelijk	5,6	3,5	5,8
490.000 i.e.	aangepast	8,0	3,8	7,4

10

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

10.1 ERVARINGEN TIJDENS OMSCHAKELING

Tijdens het praktijkonderzoek is relatief snel omschakeld van mesofiele naar thermofiele omstandigheden. In 18 dagen is de temperatuur verhoogd met 18°C. Dit is dus een gemiddelde stijging van 1°C per dag. Tijdens deze snelle omschakeling zijn geen operationele problemen (overmatige verzuring, schuimvorming) opgetreden. Wel is tijdelijk de voeding gestopt. Voor toekomstige projecten wordt een snelle omschakeling met 1°C aanbevolen, mits het mogelijk is de reactor tijdelijk niet of beperkt te voeden. Tijdens de opwarming moeten de vetzuurconcentratie en de alkaliniteit gemeten worden. Een stijging van de vetzuurconcentratie en een daling van de alkaliniteit wijst op verzuring. De voeding moet dan worden stopgezet of beperkt.

Een stabiele vetzuurconcentratie wijst op een stabiel proces, dus een voltooide omschakeling van mesofiele naar thermofiele omstandigheden. De vetzuurconcentratie aan het eind van het onderzoek was gelijk aan die van het begin en nog maar 10% van de maximale waarde die is voorgekomen. Toch wordt gesteld dat stabiliteit tijdens het praktijkonderzoek (23 weken) niet is bereikt omdat de concentratie in de mesofiele reactor op ca 50% lag van de thermofiele tank.

Tijdens de omschakeling zijn grote fluctuaties in het methaangehalte van het biogas uit de thermofiele tank waargenomen. Hierdoor kon de WKK niet goed functioneren. Met dit aspect moet tijdens de omschakeling rekening worden gehouden. Ook bleek de toegepaste warmte-wisselaar te verstoppingsgevoelig.

10.2 VERSCHILLEN TUSSEN MESOFIELE EN THERMOFIELE SLIBVERGISTING

Tijdens het onderzoek is er in de thermofiele tank geen steady-state bereikt, omdat de onderzoeksduur hiervoor te kort was. Wel kan de stabiliteit van beide tanks worden vergeleken. Beide gistingstanks draaiden stabiel.

- De schommeling in pH was in beide tanks vergelijkbaar. In de thermofiele tank varieerde de pH tussen 7,4 en 7,8. In de mesofiele tank lag de pH tussen 7,0 en 7,4.
- De schommeling in temperatuur was in de thermofiele tank groter dan in de mesofiele tank. In de thermofiele tank schommelde de temperatuur tussen 48°C en 52°C. In de mesofiele tank lag deze stabiel rond 34°C.
- Het vetzuurgehalte in de thermofiele tank (390-4.500 mg/l) was hoger dan dat in de mesofiele tank (150-530 mg/l). In beide gistingstanks bleef het gehalte dalen tijdens de onderzoeksperiode. Hiervoor is geen verklaring. De daling in de thermofiele tank was sterker dan die in de mesofiele tank.
- Het ammoniumgehalte in de thermofiele tank lag structureel hoger (875 mg/l) dan dat in de mesofiele tank (510 mg/l).
- Gevoeligheid voor temperatuurschommeling is niet waargenomen. Deze is vooral te verwachten bij een te grote stijging in de temperatuur bij thermofiele slibgisting.

In aanvulling op het praktijkonderzoek zijn labschaalproeven uitgevoerd door de TU Delft. Uit deze proeven kan worden geconcludeerd dat:

- het thermofiele slib een tweemaal zo hoge activiteit vertoont als het mesofiele slib;
- het slib na thermofiele vergisting verder gestabiliseerd is;
- het biogasproductiepotentieel voor beide slibben gelijk is.

De biogasproductie van thermofiele slibgisting (50°C) was tijdens het praktijkonderzoek 20% hoger dan die van mesofiele slibgisting (34°C) bij een gelijke ingaande stroom en verblijftijd (25 dagen). Deze hogere biogasproductie is niet te correleren aan een gelijke toename in de organische drogestofafbraak, door onnauwkeurigheid in de drogestofmetingen. Bij een kortere verblijftijd is het verwachte verschil in biogasopbrengst tussen mesofiele en thermofiele slibgisting groter.

Tijdens de vergelijkingsperiode was er een minimaal verschil tussen het methaangehalte van het biogas uit beide gistingstanks. Het methaangehalte in de thermofiele tank was gemiddeld 60,1%. In de mesofiele tank was dit 61,2%. Thermofiele slibgisting leidt dus niet tot een hoger methaangehalte in het biogas. Het H₂S-gehalte in het biogas bedroeg 80 ppm in de thermofiele tank en 68 ppm in de mesofiele tank. Dit is waarschijnlijk zo laag doordat ijzer gedoseerd wordt op de waterlijn. Naar siloxanen zijn geen metingen verricht.

Tijdens de vergelijkingsperiode was ammoniumconcentratie 875 mg N/l in het centraat van thermofiele slib en 510 mg N/l in dat van het mesofiele slib. De concentratie in de thermofiele tank was dus 72% hoger dan die in de mesofiele tank. Dit is een groter verschil dan werd verwacht op basis van drogestofafbraak.

Tijdens het onderzoek is meer geur waargenomen dan tijdens reguliere mesofiele bedrijfsvoering. Waarschijnlijk is dit een verhoogde uitstoot van ammoniak.

Het effect op de ontwaterbaarheid is tijdens het praktijkonderzoek beperkt onderzocht. Hierover kunnen dus nog geen conclusies worden getrokken. Wel is duidelijk geworden dat de ontwateringseigenschappen veranderen. In dit geval is een verslechtering waargenomen van de ontwaterbaarheid bij gelijke PE-dosering en een gelijk PE-type als bij mesofiele vergisting. Nader onderzoek is nodig om uitspraken te kunnen doen over de ontwaterbaarheid van thermofiel vergist slib. Hierbij moet zowel het type polymeer als de dosering worden onderzocht.

Verzuring door overbelasting, hoge H₂S-concentraties in het biogas, hoge orthofosfaatconcentraties in de vergister en een te krappe warmtewisselaar zijn benoemd als risico's van thermofiele slibgisting.

Tijdens het onderzoek zijn geen problemen met schuimvorming, remming door toxische effecten en scaling of struvietvorming waargenomen. Toxiciteit van ammonium is te verwachten bij een concentratie hoger dan 4 g/l. Deze is tijdens het onderzoek niet voorgekomen. De orthofosfaatmetingen zijn te onbetrouwbaar om conclusies te trekken over het risico op ongewenste struvietvorming. Ook is de periode te kort om scaling te kunnen vaststellen. Doordat op rwzi Bath ijzer gedoseerd wordt om orthofosfaat vast te leggen is de concentratie naar verwachting laag. Tijdens het praktijkonderzoek was de verblijftijd in de gistingstanks 25 dagen. Dit is relatief lang. Bij een kortere verblijftijd zouden mogelijk meer problemen kunnen optreden.

Tijdens het full-scale onderzoek is het effect van menging niet onderzocht. Wel is naar aanleiding van de proeven bij de TU Delft het vermoeden ontstaan dat de menging bij thermofiele slibgisting beter is, doordat de viscositeit afneemt. Mogelijk is de mesofiele tank minder goed gemengd. Dit zou de hogere biogasproductie in de thermofiele tank deels kunnen verklaren.

Als onderdeel van de businesscase is een warmte- en energiebalans opgesteld. Bij het omschakelen van mesofiele naar thermofiele gisting nemen de verliezen via dak, wand en bodem van de gistingstank toe. Daar staat tegenover dat een deel van de warmte uit het uitgegiste slib kan worden teruggewonnen. Hierdoor is per saldo minder warmte nodig. Voorwaarde is wel dat er een goed werkende slibwarmtewisselaar wordt geplaatst. Bij TSO wordt een groot deel van het biogas ingezet voor stoomproductie. Hier is geen aardgas voor nodig. Omdat het slib tijdens TSO al wordt verwarmd is nauwelijks slibverwarming nodig.

10.3 EFFECT OP DE BUSINESSCASE

Het onderzoek op praktijkschaal laat een hogere biogasproductie zien dan is aangenomen in de businesscase. Ook is de drogestofafbraak groter, waardoor slibafzet lager en de biogasproductie hoger is. Dit zou leiden tot een kortere terugverdientijd. Uit het praktijkonderzoek bleek echter ook dat het verschil in de hoeveelheid vrijgekomen ammonium tussen mesofiele en thermofiele slibgisting groter was dan verwacht. Daardoor is de terugverdientijd in alle varianten langer dan in de oorspronkelijke businesscase (tabel 10.1). Voor alle schaalgroottes is de terugverdiend het kortst voor de variant thermofiel+. Naast de terugverdientijd is de netto contante waarde bepaald. Deze geeft een vergelijkbaar beeld.

TABEL 10.1 TERUGVERDIENTIJD (JAAR) IN DE OORSPRONKELIJKE EN AANGEPASTE BUSINESSCASE

schaalgrootte	businesscase	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
150.000 i.e.	oorspronkelijk	7,0	5,2	10,1
150.000 i.e.	aangepast	11,6	6,2	11,8
490.000 i.e.	oorspronkelijk	5,6	3,5	5,8
490.000 i.e.	aangepast	8,0	3,8	7,4

10.4 CONCLUSIES

Het praktijkonderzoek heeft de hogere biogasproductie bij thermofiele slibgisting bevestigd. De biogasproductie bleek zelfs hoger dan de modelleringen voorspellen. De biogasproductie is niet gerelateerd aan de (organisch) drogestofafbraak, omdat de bemonstering en meting hiervan te onnauwkeurig was.

Een verbetering van de ontwaterbaarheid van thermofiel vergist slib is niet bevestigd. Verkennde proeven met een PE gebruikt voor mesofiel vergist slib wijzen op een verslechtering van de ontwaterbaarheid bij gelijke dosering. Bij een hogere PE-dosering zijn vergelijkbare resultaten behaald voor mesofiel en thermofiel slib. En optimalisatie van de conditionering kan tot betere ontwatering leiden.

Tijdens het onderzoek is een grotere toename in de ammoniumconcentratie gemeten dan was voorspeld. De ammoniumconcentratie in het centraat was bij mesofiele slibgisting lager, en bij thermofiele slibgisting hoger dan verwacht. Dit verschil moet worden verwijderd in een deelstroombehandeling. Door de hogere ammoniumconcentratie is ook meer geuroverlast te verwachten.

Op basis van deze gegevens is de businesscase opnieuw doorgerekend. Dit leidde tot een langere terugverdientijd voor alle varianten dan in de oorspronkelijke businesscase. De schaal-grootte en de mogelijkheid tot het vergisten van extern slib hebben hierop grote invloed. Ook de capaciteit van de waterlijn om extra stikstof te verwijderen is zeer belangrijk. Als er voldoende capaciteit is om stikstof te verwijderen in de waterlijn, is kostbare deelstroom-behandeling niet nodig.

Voor beide schaalgroottes is de variant thermofiele vergisting met extern slib nog steeds het meest interessant. Dit is echter afhankelijk van de afbraak bij een kortere verblijftijd. Dit is niet getest tijdens het praktijkonderzoek. Bij het vergisten van extern slib is een kostbare deelstroombehandeling vaak niet te voorkomen.

10.5 AANBEVELINGEN

Tijdens het praktijkonderzoek is een grote hoeveelheid vrijgekomen ammonium vastgesteld. Hiervoor biedt dit rapport geen verklaring. De stijging van de ammoniumconcentratie moet worden bevestigd door een stikstofbalans over de slibgisting. Hieraan zou in een vervolgonderzoek aandacht besteed moeten worden. Zowel literatuur als praktijkonderzoek kan inzicht geven in het vrijkomen van stikstof bij thermofiele slibgisting.

Op basis van het labonderzoek is naar gesuggereerd dat betere menging door lagere viscositeit de verhoogde biogasproductie bij thermofiele slibgisting (deels) zou kunnen verklaren. Het wordt dan ook aanbevolen in een eventueel vervolgonderzoek aandacht te besteden aan menging in de gistingstanks.

Tijdens het praktijkonderzoek is een relatief lange verblijftijd van 25 dagen aangehouden. Als ervoor wordt gekozen extern slib te gaan vergisten dient de werkelijke afbraak bij een kortere verblijftijd te worden aangetoond. Bij een kortere verblijftijd zijn de voordelen van thermofiele slibgisting naar verwachting groter.

Het effect van thermofiele slibgisting op de ontwaterbaarheid is nog niet overtuigend aangetoond. Verkennende proeven wijzen op een verslechtering. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat een verslechtering van de ontwaterbaarheid met 10% leidt tot een langer terugverdientijd, vooral in de variant thermofiel. Uitgebreidere proeven moeten het effect op de ontwaterbaarheid bevestigen. Hierbij dient nadrukkelijk ook te worden gekeken naar slibconditionering.

11

REFERENTIES

1. STOWA (2012), Businesscase thermofiele slibgisting, rapport 2012-W15, Amersfoort, STOWA
2. Van der Molen J.J. en Smiech, K (2012) Pilot study: thermal pressure hydrolysis followed by thermophilic anaerobic digestion of secondary sludge, Leeuwarden, WageningenUR/Noordelijke Hogeschool Leeuwarden/ Wetterskip Fryslan
3. Proces-Groningen B.V. (2012) Onderzoek naar innovatieve methoden voor de voorbehandeling en het vergisten van spuislib, samenvattend eindrapport
4. HoSt B.V. (2013) Oplevering werking conform garantievoorwaarden (tweede oplevering), Gisting Echten Waterschap Reest en Wieden
5. STOWA (2011), Handboek slibgisting, rapport 2011-16, Amersfoort, STOWA
6. FNR(2013), Leitfaden Biogas, Von der Gewinnung zur Nutzung, Gülzow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
7. Gelderland, N (2012) Thermofiele slibgisting op rwzi Bath, onderzoek naar optimalisatie van het slibgistingproces, Vlissingen, Hogeschool Zeeland/Colsen B.V.
8. Slob, T (2012) Proef thermofiele gisting rwzi Bath, Constructieve consequenties hogere temperaturen in de slibgistingstanks (memo), kenmerk 12IT025501
9. Witteveen+Bos (2012) constructieve consequenties van hogere gistingstemperatuur slib, Deventer, referentie BR668-8/koem3/001
10. Colsen B.V. (2013) Thermofiele slibgisting rwzi Bath, eindrapport pilotonderzoek, Hulst
11. STOWA (2008), Slibdesintegratie, eindrapportage van ervaringen met slibdesintegratie op de rwzi's Bath, Enschede en Nieuwgraaf, rapport 2008-1, Amersfoort, STOWA
12. Metcalf & Eddy, (2003). Waste water engineering treatment and reuse (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
13. Chen Y. R. en Hashimoto, A.G. (1980) Substrate utilization model for biological treatment systems. Biotechnology & Bioengineering 22: 2081-2095.
14. STOWA (2008), Sharon-Anammox-Systemen, rapport 2008-18, Amersfoort, STOWA

BIJLAGE I

UITGANGSPUNTEN WARMTE- EN ENERGIEBALANS

De warmtebalans is als volgt samengevat in formulevorm:

$$Q_{\text{beschikbaar uit wkk}} + Q_{\text{CV-ketel}} = (Q_{\text{slibopwarming}} - Q_{\text{terugwinning}}) + Q_{\text{verliezen (wand, dak en bodem)}} + Q_{\text{rest}} \text{ [kW]}$$

In de varianten met TSO worden de rookgassen van de WKK gebruikt voor stoomopwekking. Dit is warmte die anders verloren zou gaan. Als de rookgassen te weinig warmte bevatten wordt een deel van het biogas direct verstoofd in een stoomketel. $Q_{\text{beschikbaar uit wkk}} + Q_{\text{CV-ketel}}$ is dan dus lager.

Tabel I.1 en Tabel I.2 presenteren de uitgangspunten en kengetallen die gehanteerd zijn in de berekening van de afzonderlijke warmtestromen.

TABEL I.1 UITGANGSPUNTEN EN REKENWAARDEN WARMTE- EN ENERGIEBALANS

uitgangspunt	eenheid	waarde
Rendement (bestaande) cv-installatie	%	95
E-Rendement WKK	%	34
W- Rendement WKK	%	46
waarvan rendement motorkoeler	%	27
waarvan rendement rookgassen	%	19
Rendement stoomketel	%	90
Omrekeningsfactor Mj->kW	-	0,278
Methaangehalte biogas	%	65
Calorische waarde biogas	MJ/m ³	23
Warmte doorgangscoefficiënt wand	W/m ² .K	0,4
Warmte doorgangscoefficiënt dak	W/m ² .K	0,4
Warmte doorgangscoefficiënt bodem	W/m ² .K	0,3
Soortelijke massa slib	kg/m ³	1.000
Warmtecapaciteit slib	kJ/kg.K	4,2
Warmteterugwinning	%	60

TABEL I.2 MAANDGEMIDDELTE TEMPERATUUR VAN OMGEVING, GROND EN SLIB EN HET VERLOOP VAN DE BIOGASPRODUCTIE

	temperaturen (oC)			factor biogasproductie1)
	Omgeving	Grond	Slib	
Januari	5,0	6,0	10,0	1,0
Februari	8,0	10,0	11,0	1,0
Maart	11,0	11,0	12,0	1,0
April	13,0	15,0	14,0	1,1
Mei	15,0	16,0	16,0	1,1
Juni	18,0	17,0	17,0	1,1
Juli	20,0	18,0	18,0	0,9
Augustus	19,0	17,0	19,0	0,9
September	16,0	16,0	18,0	0,9
Oktober	14,0	16,0	17,0	0,9
November	10,0	10,0	15,0	1,1
December	6,0	8,0	13,0	1,0

1. De biogasproductie fluctueert per maand. Deze factor wordt gebruikt om een gemiddelde waarde gebaseerd op de jaarproductie te corrigeren voor de productie in de betreffende maand. De factor is opgegeven door Waterschap Brabantse Delta

BIJLAGE II

KOSTENBEREKENING SCHAALGROOTTE

150.000.I.E.

rwzi 150.000 i.e. - basis					
versie: 21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
elektriciteitskosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slibverwerking	EUR/ton ontw. slib	30			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	3,00			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	2,25			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	1,80			
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	% van bouwkosten	2,00			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit W		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staartkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
	variant	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
	type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel
	verbliftijd	24	24	12	12
	extern slib	nee	nee	ja	ja
	TSO	nee	nee	nee	ja
	% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%
	aanvoer PS (kg ds/d)	4.342	4.342	4.342	4.342
	aanvoer SS (kg ds/d)	4.378	4.378	4.378	4.378
	aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	11.111	9.703
	totaal aanvoer (kg ds/d)	8.720	8.720	19.830	18.422
	biogasproductie (Nm ³ /d)	1.909	2.288	4.414	4.972
	% ds slibkoek	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%
	slibafzet (ton slib/d)	30	28	68	45
	reductie slibafzet (ton slib/d)	0	2	13	30
Bouw- en investeringskosten		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Bouwkosten					
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	-	-	300.000	300.000
aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting	-	-	100.000	150.000	150.000
thermische slibontsluiting	-	-	-	-	1.704.000
WKK	-	-	-	21.000	-
voorzieningen ontvangst extern slib	-	-	-	200.000	200.000
deelstroombehandeling	-	-	255.000	577.000	622.000
totaal bouwkosten	-	-	355.000	1.248.000	2.976.000
investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))	-	-	532.500	1.872.000	4.464.000
Berekening jaarlijkse eenheden		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
energieproductie van bestaande WKK (kWh _a)	kWh/jaar	1.512.349	1.813.423	3.377.846	2.631.507
extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _a)	kWh/jaar	0	0	123.125	0
nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	kWe	0	0	14	0
ontwaterd slib	ton/jaar	11.049	10.316	24.987	16.561
polymeerverbruik ¹	kg/jaar				
		18.660	17.852	19.009	17.308
extra inzet personeel	fte	0	0	0,1	0,4
toegenomen N-vracht deelstroombehandeling	kg N/j	0	20.432	65.918	77.865
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slib					
Berekening jaarlijkse kosten		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Parameter	eenheid				
kosten					
kapitaalslasten extra voorindik- en ontwateringsapparatuur	EUR/jaar	-	-	43.000	43.000
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	EUR/jaar	-	14.000	21.000	21.000
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	EUR/jaar	-	-	-	242.000
kapitaalslasten investeringen WKK	EUR/jaar	-	-	2.000	-
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	EUR/jaar	-	-	11.000	11.000
kapitaalslasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	34.000	77.000	83.000
bedrijfskosten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	17.000	38.000	42.000
polymerdosering	EUR/jaar	65.000	62.000	67.000	61.000
extra personeel	EUR/jaar	-	-	5.000	18.000
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	EUR/jaar	-	-	-	34.000
onderhoud nieuwe WKK	EUR/jaar	-	-	48.000	-
aardgas inkoop voor o.a. warmtekort en stoomopwekking	EUR/jaar	-	-	-	-
totaal jaarlijkse kosten	EUR/jaar	65.000	127.000	312.000	555.000
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	EUR/jaar	65.000	79.000	158.000	155.000
opbrengsten					
opbrengsten elektriciteitsproductie	EUR/jaar	189.000	227.000	438.000	329.000
opbrengsten verminderde slibafzet	EUR/jaar	-	22.000	145.000	327.000
totaal opbrengsten	EUR/jaar	189.000	249.000	583.000	656.000
totaal netto opbrengsten	EUR/jaar	124.000	170.000	425.000	501.000
Besparing t.o.v. mesofiel			46.000	301.000	377.000
Terugverdientijd	jaar		11,6	6,2	11,8

BIJLAGE III

KOSTENBEREKENING SCHAALGROOTTE

490.000 I.E.

rwzi 490.000 i.e. - basis					
versie:21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
energiekosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slibverwerking	EUR/ton ontw. slib	30			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	% bouwkosten TSO	2			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit W		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staartkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
	variant	0	1	2	3
	type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel
	verblijftijd	24	24	12	12
	extern slib	nee	nee	ja	ja
	TSO	nee	nee	nee	ja
	% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%
	aanvoer PS (kg ds/d)	13.025	13.025	13.025	13.025
	aanvoer SS (kg ds/d)	13.134	13.134	13.134	13.134
	aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	33.332	29.108
	totaal aanvoer (kg ds/d)	26.159	26.159	59.491	55.267
	biogasproductie (m ³ /d)	5.725	6.865	13.240	14.915
	% ds slibkoek	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%
	slibafzet (ton slib/d)	91	85	205	136
	reductie slibafzet (ton slib/d)	0	6	40	89
Bouw- en investeringskosten					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Bouwkosten					
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit		-	-	600.000	600.000
aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting		-	250.000	400.000	400.000
thermische slibontsluiting (TurboTec)		-	-	-	3.408.000
WKK		-	-	63.000	-
voorzieningen ontvangst extern slib		-	-	400.000	400.000
deelstroombehandeling		-	554.000	1.183.000	1.281.000
totaal bouwkosten		-	804.000	2.646.000	6.089.000
investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))		-	1.206.000	3.969.000	9.133.500
Berekening jaarlijkse eenheden					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
energieproductie van bestaande WKK (kWh _e)	kWh/jaar	4.536.940	5.440.141	10.133.397	7.875.694
extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _e)	kWh/jaar	-	-	366.506	0
nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	kWe	-	-	42	0
ontwaterd slib	ton/jaar	33.148	30.947	74.961	49.684
polymeerverbruik ¹	kg/jaar	55.981	53.556	57.027	51.924
extra inzet personeel	fte	-	-	0,1	0,4
toegenomen N-wracht deelstroombehandeling	kg N/j	-	61.297	197.755	233.595
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slib					
Berekening jaarlijkse kosten					
Parameter	eenheid	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
kosten					
kapitaalslasten extra indik- en ontwateringscapaciteit	EUR/jaar	-	-	85.000	85.000
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	EUR/jaar	-	36.000	57.000	57.000
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	EUR/jaar	-	-	-	484.000
kapitaalslasten investeringen WKK	EUR/jaar	-	-	8.000	-
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	EUR/jaar	-	-	23.000	23.000
kapitaalslasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	74.000	158.000	171.000
deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	37.000	79.000	86.000
polymeerdosering	EUR/jaar	196.000	187.000	200.000	182.000
extra personeel	EUR/jaar	-	-	5.000	18.000
onderhoud thermische slibontsluiting	EUR/jaar	-	-	1.000	68.000
onderhoud nieuwe WKK	EUR/jaar	-	-	48.000	-
aardgas inkoop voor o.a. warmte tekort en stoomopwekking	EUR/jaar	-	-	-	-
totaal jaarlijkse kosten	EUR/jaar	196.000	334.000	664.000	1.174.000
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	EUR/jaar	196.000	224.000	333.000	354.000
opbrengsten					
opbrengsten elektriciteitsproductie	EUR/jaar	567.000	680.000	1.312.000	984.000
opbrengsten verminderde slibafzet	EUR/jaar	-	66.000	435.000	980.000
totaal opbrengsten	EUR/jaar	567.000	746.000	1.747.000	1.964.000
totaal netto opbrengsten	EUR/jaar	371.000	522.000	1.414.000	1.610.000
Besparing t.o.v. mesofiel	EUR/jaar		151.000	1.043.000	1.239.000
Terugverdientijd	jaar		8,0	3,8	7,4

BIJLAGE IV

RESULTATEN WARMTE- ENERGIEBALANS

WARMITE- EN ENERGIEBALANS schaalrootte 150.000 i.e. mesofiel		UITGANGSPUNTEN											
Basisgegevens silbgisting													
Aantal tanks		2											
Tank hoogte	10,4 [m]	Warmte biogas: - Totaal beschikbaar											
Tank diameter	14,9 [m]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas 696.604 [m ³ /jaar]											
Buitenoppervlak tank (dak + wand)	1.322 [m ²]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas 4.450.523 [kWh/jaar]											
Oppervlakte bodem	349 [m ²]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas 16.021.881 [MJ/jaar]											
Warmte doorgangcoëfficiënt wand	0,4 [W/m ² .K]	- Aantal dagen 365 [dagen/jaar]											
Warmte doorgangcoëfficiënt dak	0,4 [W/m ² .K]	- Jaargemiddelde per dag 12.193 [kWh/dag]											
Warmte doorgangcoëfficiënt bodem	0,3 [W/m ² .K]	0,04 [TJ/dag]											
Temperatuur silbgistingstank	32 [°C]	6,39 [kWh/m ³]											
Soortelijke massa silb	1.000 [kg/m ³]	23,0 [MJ/m ³]											
Warmtecapaciteit silb	4,2 [kJ/Kg.K]												
Silbcapaciteit	0,0018 [m ³ /s]												
Thermisch rendementWKK -installatie	46% [%]												
Elektrisch rendementWKK -installatie	34% [%]												
Warmtemodel													
Verklaring bij verwijzing van items a t/m h:													
a	Warmtebehoefte voor het opwarmen van silb met temperatuur x naar de gewenste temperatuur. Berekend o.b.v. debiet, soortelijke massa en warmtecapaciteit van silb.												
b	Reductie (-) van de warmtebehoefte voor het opwarmen van silb als gevolg van toepassen van een silb-silb warmtewisselaars. Berekend o.b.v. een percentage van de warmtebehoefte.												
c	Warmtebehoefte voor het compenseren van warmteverliezen via dak en wand van de silbgistinginstallatie. Berekend o.b.v. de specifieke warmtebehoefte en het specifieke oppervlak.												
d	Warmtebehoefte voor het compenseren van warmteverliezen via de bodem van de silbgistinginstallatie. Berekend o.b.v. de specifieke warmtebehoefte en het specifieke oppervlak.												
e	Toegepaste factor voor berekening van de gemiddelde biogasproductie in maand x ten opzichte van de jaargemiddelde biogasproductie in m ³ /j.												
f	Benodigde energie voor opwarming en op temperatuur houden van de silbgisting (kWh/m ³). Berekend o.b.v. de totale warmtebehoefte (kW). de maandfactor en het warmerendement van de WKK - installatie.												
g	Beschikbare energie uit biogasproductie (kWh/m ³). Berekend o.b.v. de biogasproductie (m ³ /j) en de calorische waarde van biogas (kWh/m ³).												
h	Berekend als het verschil tussen energie productie en energiebehoefte. Bij een negatieve waarde is er sprake van energietekort voor opwarming en dient een externe energiebron (aardgas) aangesproken te worden.												
Temperaturen [°C]		Warmtebehoefte [kw]		Energiebalans [kWh/m ³]									
Buiten	Grond	Silb voorverwarming	Silb	Bodem	Totaal	maandfactor	Dagen	Energie benodigd voor opwarming	Beschikbare energie uit biogas	Restenergie			
		a	b	c	d	e	f	g	h				
		verwijzing											
Januari	5,0	6,0	10,0	164	0	14	3	181	31	1	292.781	377.990	85.209
Februari	8,0	10,0	11,0	157	0	13	2	172	28	1	250.626	341.410	90.784
Maart	11,0	11,0	12,0	149	0	11	2	162	31	1	262.685	377.990	115.305
April	13,0	15,0	14,0	134	0	10	2	146	30	1,1	228.562	402.376	173.814
Mei	15,0	16,0	16,0	119	0	9	2	130	31	1,1	210.184	415.789	205.605
Juni	18,0	17,0	17,0	112	0	7	2	121	30	1,1	189.087	402.376	213.289
Juli	20,0	18,0	18,0	104	0	6	1	112	31	0,9	181.451	340.191	158.740
Augustus	19,0	17,0	19,0	97	0	7	2	105	31	0,9	170.417	340.191	169.773
September	16,0	16,0	18,0	104	0	8	2	115	30	0,9	179.237	329.217	149.980
Oktober	14,0	16,0	17,0	112	0	10	2	123	31	0,9	198.981	340.191	141.210
November	10,0	10,0	15,0	127	0	12	2	141	30	1,1	220.195	402.376	182.181
December	6,0	8,0	13,0	142	0	14	3	158	31	1	255.412	377.990	122.578
								2.639.616	4.448.084	1.808.468	kWh/jaar		
								9,5	16,0	6,5	TJ/jaar		

WARMTE- EN ENERGIEBALANS schaalgrootte 150.000 i.e. thermofiel													
UITGANGSPUNTEN													
Basisgegevens slibgisting:													
Aantal tanks	2								Warmte biogas:				
Tank hoogte	10,4 [m]								- Totaal beschikbaar 835.282 [m3/jaar]				
Tank diameter	14,9 [m]								- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas 5.336.521 [kWh/jaar]				
Buitenoppervlak tank (dak + wand)	1.322 [m2]								- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas 19.211.477 [MJ/jaar]				
Oppervlakte bodem	349 [m2]								19,2 [TJ/jaar]				
Warmte doorgangcoëfficiënt wand + dak	0,4 [W/m2.K]								365 [dagen/jaar]				
Warmte doorgangcoëfficiënt bodem	0,3 [W/m2.K]								14,621 [kWh/dag]				
Temperatuur slibgistingstank	55 [°C]								0,05 [TJ/dag]				
Soortelijke massa slib	1.000 [kg/m3]								6,4 [kWh/m3]				
Warmtecapaciteit slib	4,2 [kJ/kg.K]								23,0 [MJ/m3]				
Thermisch rendementWKK -installatie	46% [%]								60% % van slibverwarming				
Elektrisch rendementWKK -installatie	34% [%]												
Warmtemodel													
Temperaturen [°C]													
Buiten	Grond	Slib	Warmtebehoefte [kw]				Energiebalans [kW/mnd]						
			Slib	Slib voorverwarming	Wand+ dak	Bodem	Gebouw	Totaal	Dagen	maand-factor	Energie benodigd voor opwarming	Beschikbare energie uit biogas	Restenergie
Januari	5,0	6,0	335	201-	26	5	-	166	31	1	268.116	453.239	185.123
Februari	8,0	10,0	328	197-	25	5	-	161	28	1	234.883	409.377	174.494
Maart	11,0	11,0	321	192-	23	5	-	156	31	1	252.490	453.239	200.748
April	13,0	15,0	306	183-	22	4	-	149	30	1,1	232.699	482.480	249.781
Mei	15,0	16,0	291	174-	21	4	-	142	31	1,1	228.929	498.563	269.634
Juni	18,0	17,0	283	170-	20	4	-	137	30	1,1	214.229	482.480	268.251
Juli	20,0	18,0	276	166-	19	4	-	133	31	0,9	214.666	407.915	193.248
Augustus	19,0	17,0	268	161-	19	4	-	130	31	0,9	210.868	407.915	197.047
September	16,0	16,0	276	166-	21	4	-	135	30	0,9	211.381	394.756	183.375
Oktober	14,0	16,0	283	170-	22	4	-	139	31	0,9	224.961	407.915	182.954
November	10,0	10,0	298	179-	24	5	-	148	30	1,1	231.334	482.480	251.146
December	6,0	8,0	313	188-	26	5	-	156	31	1	252.452	453.239	200.786
											2.777.010	5.333.597	2.556.587
											10,00	19,2	9,2
													kWh/jaar
													TJ/jaar

WARMTE- EN ENERGIEBALANS schaaftgrootte 150.000 i.e. thermofieft														
UITGANGSPUNTEN														
Basisgegevens slibgisting (zie tabblad "Slibgisting"):														
Aantal tanks		2							Warme biogas:					
Tank hoogte	10.4 [m]								- Totaal beschikbaar	1.610.944 [m3/jaar]				
Tank diameter	14.9 [m]								- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas	10.292.142 [kWh/jaar]				
Buitenopervlak (dak + wand)	1.322 [m2]								- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas	37.051.711 [MJ/jaar]				
Oppervlakte bodem	349 [m2]								- Aantal dagen	37,1 [Tj/jaar]				
Warme doorgangcoefficient wand	0.4 [W/m2.K]								- Jaargemiddelde per dag	365 [dagen/jaar]				
Warme doorgangcoefficient dak	0.4 [W/m2.K]								- Jaargemiddeld	28.198 [kWh/dag]				
Warme doorgangcoefficient bodem	0.3 [W/m2.K]								- Calorische waarde biogas	0,10 [Tj/dag]				
Temperatuur slibgistingstank	55 [°C]								- Calorische waarde biogas	6,39 [kWh/m3]				
Soortelijke massa slib	1.000 [kg/m3]								- Calorische waarde biogas	23,0 [MJ/m3]				
Warmtecapaciteit slib	4.2 [kJ/kg.K]									60% van slibverwarming				
Slibcapaciteit	0,0035 [m3/s]													
Thermisch rendementWKK -installatie	46% [%]													
Elektrisch rendementWKK -installatie	34% [%]													
Warmtemodel														
Temperaturen [°C]		Slib		Warmebehoefte [kw]		Totaal		MJ/dag		maand-factor		Energiebalans [kWh/mmd]		
Buiten	Grond	Slib	Slib	Slib voorverwarming	Wand+ dak	Bodem	Gebouw	Dagen	Dagen	MJ/dag	maand-factor	Energie benodigd voor opwarming	Beschikbare energie uit biogas	Restenergie
5.0	6.0	10.0	660	-396	26	5	-	296	31	25.534	1	477.991	874.127	396.136
8.0	10.0	11.0	645	-387	25	5	-	288	28	24.854	1	420.235	789.534	369.299
11.0	11.0	12.0	631	-378	23	5	-	280	31	24.201	1	453.038	874.127	421.089
13.0	15.0	14.0	601	-361	22	4	-	267	30	23.060	1,1	417.750	930.522	512.772
15.0	16.0	16.0	572	-343	21	4	-	254	31	21.946	1,1	410.821	961.540	550.719
18.0	17.0	17.0	557	-334	20	4	-	246	30	21.293	1,1	385.740	930.522	544.783
20.0	18.0	18.0	543	-326	19	4	-	239	31	20.686	0,9	387.230	786.714	399.484
19.0	17.0	19.0	528	-317	19	4	-	234	31	20.234	0,9	378.768	786.714	407.947
16.0	16.0	18.0	543	-326	21	4	-	242	30	20.886	0,9	378.378	761.337	382.958
14.0	16.0	17.0	557	-334	22	4	-	249	31	21.485	0,9	402.189	786.714	384.525
10.0	10.0	15.0	587	-352	24	5	-	263	30	22.735	1,1	411.872	930.522	518.651
6.0	8.0	13.0	616	-370	26	5	-	277	31	23.950	1	448.336	874.127	425.791
											4.972.348	10.286.502	5.314.155	
											17,90	37,0	19,1	
													kWh/jaar	Tj/jaar

WARMTE- EN ENERGIEBALANS schaalgrootte 150.000 i.e. TSO/thermotiefel+												
UITGANGSPUNTEN												
Basisgegevens slibgisting (zie tabelblad "Slibgisting"):												
Aantal tanks												
Tank hoogte	10,4 [m]											
Tank diameter	14,9 [m]											
Buitenoppervlakte tank (dak + wand)	1.322 [m ²]											
Oppervlakte bodem	349 [m ²]											
Warmte doorgangscoefficient wand + dak	0,4 [W/m ² .K]											
Warmte doorgangscoefficient bodem	0,3 [W/m ² .K]											
Temperatuur slibgistingstank	55 [°C]											
Soortelijke massa slib	1.000 [kg/m ³]											
Warmtecapaciteit slib	4,2 [kJ/kg.K]											
Enthalpie stoom (8 bar, 175 °C)	2772 [kJ/kg]											
Slibcapaciteit totaal	0,0035 [m ³ /s]											
Slibcapaciteit PS	0,000931 [m ³ /s]											
Slibcapaciteit SS+ES	0,0023281 [m ³ /s]											
Capaciteit TSO-water	0,0002328 [m ³ /s]											
Thermisch rendement motorcooler WKK-installatie	27% [%]											
Thermisch rendement rookgassen WKK-installatie	19% [%]											
Elektrisch rendement WKK-installatie	34% [%]											
Warmtemodel												
Temperaturen [°C]												
Buiten	Grond	Slib	Warmebehoefte [kw]				Energiebalans [kWh/mnd]					
			Slib	Wand+ dak	Bodem	Gebouw	Totaal	Dagen maandfact or conform WBD	Energie benodigd voor opwarming	Beschikbare energie uit biogas	Energie voor stoomproductie	Restenergie
Januari	5,0	6,0	-	26	5	-	32	31	87.004	984.671	897.667	
Februari	8,0	10,0	-	25	5	-	30	28	73.593	889.380	815.787	
Maart	11,0	11,0	-	23	5	-	28	31	76.817	984.671	907.854	
April	13,0	15,0	-	22	4	-	26	30	70.402	1.048.198	977.796	
Mei	15,0	16,0	-	21	4	-	25	31	69.545	1.083.138	1.013.593	
Juni	18,0	17,0	-	20	4	-	24	30	62.791	1.048.198	985.407	
Juli	20,0	18,0	-	19	4	-	22	31	61.681	886.204	824.523	
Augustus	19,0	17,0	-	19	4	-	23	31	63.427	886.204	822.777	
September	16,0	16,0	-	21	4	-	25	30	65.891	857.616	791.725	
Oktober	14,0	16,0	-	22	4	-	26	31	71.003	886.204	815.201	
November	10,0	10,0	-	24	5	-	29	30	76.028	1.048.198	972.169	
December	6,0	8,0	-	26	5	-	31	31	84.969	984.671	899.701	
									863.151	11.587.350	10.724.199	
									3,11	41,7	13,9	24,8
												Tu/jaar

Stoomproductie														
	dagen #	productie-factor	productie biogas m3/maand	biogas naar WKKs m3/maand	biogas naar WKK1 m3/maand	biogas naar WKK2 m3/maand	biogas naar WKK3 m3/maand	stoom uit WKKs kg/maand	biogas naar ketel m3/maand	stoom uit ketel kg/maand	stoom-productie kg/maand	stoom-behoefte kg/maand	stoomtekort kg/maand	aardgas nodig m3/maand
Januari	31	1	154.122	103.011	68.200	34.811	-	238.986	51.111	383.333	622.319	622.319	-	-
Februari	28	1	139.207	93.042	61.600	31.442	-	215.859	46.165	346.236	562.095	562.095	-	-
Maart	31	1	154.122	103.011	68.200	34.811	-	238.986	51.111	383.333	622.319	622.319	-	-
April	30	1,1	164.066	121.284	66.000	55.284	-	281.378	42.782	320.866	602.244	602.244	-	-
Mei	31	1,1	169.535	125.326	68.200	57.126	-	290.757	44.208	331.562	622.319	622.319	-	-
Juni	30	1,1	164.066	121.284	66.000	55.284	-	281.378	42.782	320.866	602.244	602.244	-	-
Juli	31	0,9	138.710	80.696	68.200	12.496	-	187.215	58.014	435.104	622.319	622.319	-	-
Aug.	31	0,9	138.710	80.696	68.200	12.496	-	187.215	58.014	435.104	622.319	622.319	-	-
September	30	0,9	134.236	78.093	66.000	12.093	-	181.176	56.142	421.068	602.244	602.244	-	-
Oktober	31	0,9	138.710	80.696	68.200	12.496	-	187.215	58.014	435.104	622.319	622.319	-	-
November	30	1,1	164.066	121.284	66.000	55.284	-	281.378	42.782	320.866	602.244	602.244	-	-
December	31	1	154.122	103.011	68.200	34.811	-	238.986	51.111	383.333	622.319	622.319	-	-
									602.237	m3/jaar				
									13.851.443	MJ/jaar				
									13,9	T/Jjaar				

WARMTE- EN ENERGIEBALANS schaalrootte 490.000 i.e. mesofiel															
UITGANGSPUNTEN															
Basisgegevens slibgisting:															
Aantal tanks	2	Warmte biogas:													
Tank hoogte	15,0 [m]	- Totaal beschikbaar													
Tank diameter	21,5 [m]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas													
Buitenoppervlak tank (dak + wand)	2.752 [m ²]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas													
Oppervlakte bodem	726 [m ²]	- Aantal dagen													
Warmte doorgangcoëfficiënt wand	0,4 [W/m ² K]	- Jaargemiddelde per dag													
Warmte doorgangcoëfficiënt dak	0,4 [W/m ² K]	- Calorische waarde biogas													
Warmte doorgangcoëfficiënt bodem	0,3 [W/m ² K]	- Calorische waarde biogas													
Temperatuur slibgistingstank	32 [°C]														
Soortelijke massa slib	1.000 [kg/m ³]														
Warmtecapaciteit slib	4,2 [kJ/kg.K]														
Slibcapaciteit	0,0053 [m ³ /s]														
Thermisch rendement WKK-installatie	46% [%]														
Elektrisch rendement WKK-installatie	34% [%]														
Warmtemodel															
Temperaturen [°C]															
Buiten	Grond	Slib	Slib voor- verwarming			Wand+ Bodem			Totaal	Dagen	maand-factor	MJ/dag	Energiebalans [kWh/mmd]	Beschikbare energie uit biogas	Restenergie
			a	b	c	d	e	f	g	h					
Januari	5,0	6,0	Verwijzing:	492	0	30	6	527	31	1	45,571	853,085	1.133,942	280,857	
Februari	8,0	10,0		470	0	26	5	501	28	1	43,278	731,757	1.024,206	292,449	
Maart	11,0	11,0		447	0	23	5	475	31	1	41,042	768,290	1.133,942	365,652	
April	13,0	15,0		403	0	21	4	427	30	1,1	36,911	688,680	1.207,100	538,420	
Mei	15,0	16,0		358	0	19	3	380	31	1,1	32,837	614,706	1.247,336	632,630	
Juni	18,0	17,0		335	0	15	3	354	30	1,1	30,601	554,358	1.207,100	652,742	
Juli	20,0	18,0		313	0	13	3	329	31	0,9	28,459	532,748	1.020,548	487,800	
Augustus	19,0	17,0		291	0	14	3	308	31	0,9	26,641	498,707	1.020,548	521,841	
September	16,0	16,0		313	0	18	3	334	30	0,9	28,877	523,138	987,627	464,489	
Oktober	14,0	16,0		335	0	20	3	359	31	0,9	31,000	580,312	1.020,548	440,236	
November	10,0	10,0		380	0	24	5	409	30	1,1	35,358	640,547	1.207,100	566,553	
December	6,0	8,0		425	0	29	5	459	31	1	39,641	742,075	1.133,942	391,867	
Verklaring bij verwijzing van items a t/m h:										7.708.403	27,75	13.343.940	5.635.537	20,3	
a	Warmtebehoefte voor het opwarmen van slib met temperatuur x naar de gewenste temperatuur. Berekend o.b.v. debiet, soortelijke massa en warmtecapaciteit van slib.										48,0				
b	Reductie (-) van de warmtebehoefte voor het opwarmen van slib als gevolg van toepassen van een slib-slib warmtewisselaars. Berekend o.b.v. een percentage van de warmtebehoefte.														
c	Warmtebehoefte voor het compenseren van warmteverliezen via dak en wand van de slibgistinginstallatie. Berekend o.b.v. de specifieke warmteovergangcoëfficiënt en het specifieke oppervlak.														
d	Warmtebehoefte voor het compenseren van warmteverliezen via de bodem van de slibgistinginstallatie. Berekend o.b.v. de specifieke warmteovergangcoëfficiënt en het specifieke oppervlak.														
e	Toegepaste factor voor berekening van de gemiddelde biogasproductie in maand x ten opzichte van de jaargemiddelde biogasproductie in m ³ /d.														
f	Benodigde energie voor opwarming en op temperatuur houden van de slibgisting (kWh/mmd). Berekend o.b.v. de totale warmtebehoefte (kW), de maandfactor en het warmterendement van de WKK-installatie.														
g	Beschikbare energie uit biogasproductie (kWh/mmd). Berekend o.b.v. de biogasproductie (m ³ /r) en de calorische waarde van biogas (kWh/m ³).														
h	Berekend als het verschil tussen energie productie en energiebehoefte. Bij een negatieve waarde is er sprake van energietekort voor opwarming en dient een externe energiebron (aardgas) aangesproken te worden.														

WARMTE- EN ENERGIEBALANS schaalgrootte 490.000 i.e. thermofiel									
UITGANGSPUNTEN									
Basisgegevens slibgisting:									
Aantal tanks	2	Warmte biogas:							
Tank hoogte	15,0 [m]	- Totaal beschikbaar							
Tank diameter	21,5 [m]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas							
Buitenoppervlak tank (dak + wand)	2.752 [m ²]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas							
Oppervlakte bodem	726 [m ²]	- Aantal dagen							
Warmte doorgangscoefficient wand + dak	0,4 [W/m ² .K]	- Jaargemiddelde per dag							
Warmte doorgangscoefficient bodem	0,3 [W/m ² .K]	- Calorische waarde biogas							
Temperatuur silbgingstank	55 [°C]	- Calorische waarde biogas							
Soortelijke massa silb	1.000 [kg/m ³]	warmteterugwinning							
Warmtecapaciteit silb	4,2 [kJ/kg.K]								
Slibcapaciteit	0,0053 [m ³ /s]								
Thermisch rendement WKK-installatie	46% [%]								
Elektrisch rendement WKK-installatie	34% [%]								
Warmte mode I									
Temperaturen [°C]					Warmtebehoefte [kw]				
Buiten	Grond	Slib	Slib voorverwarming	Wand+ dak	Bodem	Gebouw	Totaal	Dagen	maand-factor
Januari	5,0	6,0	10,0	604-	55	11	468	31	1
Februari	8,0	10,0	11,0	590-	52	10	455	28	1
Maart	11,0	11,0	12,0	577-	48	10	443	31	1
April	13,0	15,0	14,0	550-	46	9	422	30	1,1
Mei	15,0	16,0	16,0	523-	44	8	401	31	1,1
Juni	18,0	17,0	17,0	510-	41	8	389	30	1,1
Juli	20,0	18,0	18,0	497-	39	8	378	31	0,9
Augustus	19,0	17,0	19,0	483-	40	8	370	31	0,9
September	16,0	16,0	18,0	497-	43	8	382	30	0,9
Oktober	14,0	16,0	17,0	510-	45	8	394	31	0,9
November	10,0	10,0	15,0	537-	50	10	417	30	1,1
December	6,0	8,0	13,0	564-	54	10	440	31	1
									Energie balans [kW/mnd]
									Energie benodigd voor opwarming
									Beschikbare energie uit biogas
									Restenergie
									602.239
									563.125
									643.625
									787.262
									846.357
									838.569
									612.968
									625.305
									585.620
									587.110
									794.390
									648.134
									8.134.705 kWh/jaar
									16.000.415 kWh/jaar
									57,6 T/Jjaar
									29,3 T/Jjaar

WARMTE- EN ENERGIEBALANS schaaagrootte 490.000 i.e. thermofiel+												
UITGANGSPUNTEN												
Basisgegevens slibgisting:												
Aantal tanks												
Tank hoogte	15,0 [m]											
Tank diameter	21,5 [m]											
Buitenoppervlak (dak + wand)	2.752 [m ²]											
Oppervlakte bodem	726 [m ²]											
Warmte doorgangscoefficient wand	0,4 [W/m ² .K]											
Warmte doorgangscoefficient dak	0,4 [W/m ² .K]											
Warmte doorgangscoefficient bodem	0,3 [W/m ² .K]											
Temperatuur slibgistingstank	55 [°C]											
Soortelijke massa slib	1.000 [kg/m ³]											
Warmtecapaciteit slib	4,2 [kJ/kg.K]											
Soortelijke massa slib	0,0105 [m ³ /s]											
Thermisch rendement WKK-installatie	46% [%]											
Elektrisch rendement WKK-installatie	34% [%]											
Warmtemodel												
Temperaturen [°C]												
Buiten	Grond	Slib	Slib	Slib voorverwarming	Wand+ dak	Bodem	Gebouw	Totaal	Dagen	maandfactor	Energie benodigd voor opwarming	Restenergie
Januari	5,0	6,0	10,0	-1188	55	11	-	858	31	1	1.387.070	1.235.256
Februari	8,0	10,0	11,0	-1161	52	10	-	836	28	1	1.221.032	1.147.520
Maart	11,0	11,0	12,0	-1135	48	10	-	815	31	1	1.317.701	1.304.625
April	13,0	15,0	14,0	-1082	46	9	-	776	30	1,1	1.215.298	1.576.211
Mei	15,0	16,0	16,0	-1029	44	8	-	739	31	1,1	1.194.971	1.689.588
Juni	18,0	17,0	17,0	-1003	41	8	-	718	30	1,1	1.123.369	1.668.140
Juli	20,0	18,0	18,0	-977	39	8	-	698	31	0,9	1.128.439	1.231.655
Augustus	19,0	17,0	19,0	-950	40	8	-	681	31	0,9	1.102.111	1.257.983
September	16,0	16,0	18,0	-977	43	8	-	703	30	0,9	1.099.613	1.184.349
Oktober	14,0	16,0	17,0	-1003	45	8	-	722	31	0,9	1.168.290	1.191.804
November	10,0	10,0	15,0	-1056	50	10	-	763	30	1,1	1.194.629	1.596.880
December	6,0	8,0	13,0	-1109	54	10	-	803	31	1	1.299.200	1.323.126
											14.451.722	16.407.138
											52,03	59,1
											111,1	T/Jjaar
											30.888.860	16.407.138
												T/Jjaar

WARMTE - EN ENERGIEBALANS schaalgrootte 490.000 i.e. TSOthermofiel+											
UITGANGSPUNTEN											
Basisgegevens slibgisting:											
Aantal tanks	2	Warme biogas:									
Tank hoogte	15.0 [m]	- Totaal beschikbaar									
Tank diameter	21.5 [m]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas	5.443.837	[m3/jaar]							
Buitenopwakt tank (dak + wand)	2.752 [m2]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas	34.780.388	[kWh/jaar]							
Oppervlakte bodem	726 [m2]	- Jaargemiddeld beschikbare energie biogas	125.2	[TJ/jaar]							
Warme doorgangcoëfficiënt wand + dak	0.4 [W/m2.K]	- Aantal dagen	365	[dagen/jaar]							
Warme doorgangcoëfficiënt bodem	0.3 [W/m2.K]	- Jaargemiddelde per dag	95.289	[kWh/dag]							
Temperatuur slibgistingstank	55 [°C]	- Calorische waarde biogas	0.34	[TJ/dag]							
Soortelijke massa slib	1.000 [kg/m3]	- Calorische waarde biogas	6.4	[kWh/m3]							
Warmtecapaciteit slib	4.2 [kJ/kg.K]	- Warmterugwinning	23.0	[MJ/m3]							
Enthalpie stoom (8 bar, 175°C)	2772 [kJ/kg]	- % van warmtebehoefte slibopwarming	60%								
Slibcapaciteit totaal	0.0105 [m3/s]	stoomopwekking in WKK (rookgassen)	2.32	[kg stoom/m3 biogas]							
Slibcapaciteit PS	0.002782 [m3/s]	dichtheid water	1.000	[kg/m3]							
Slibcapaciteit SS+ES	0.006984 [m3/s]	stoomopwekking uit biogas (direct)	7.5	[kg stoom/m3 biogas]							
Capaciteit TSO-water	0.000688 [m3/s]	stoomopwekking uit aardgas (direct)	11.4	[kg stoom/m3 aardgas]							
Thermisch rendement motorcooler WKK-installatie	27%										
Thermisch rendement rookgassen WKK-installatie	19%										
Elektrisch rendement WKK-installatie	34%										
Warmtemodel											
Temperaturen [°C]											
Buiten	Grond	Slib na opmengen	Slib voorverwarming	Wand+ dak	Bodem	Totaal	Dagen maandfactor	Energie benodigd voor opwarming	Beschikbare energie uit biogas stoomproductie	Energie voor Restenergie	
Januari	5.0	53.3	73	55	11	-	31	382.117	2.953.951	2.571.833	
Februari	8.0	54.3	32	52	10	-	28	232.556	2.668.085	2.435.528	
Maart	11.0	55.2	-	48	10	-	31	159.897	2.953.951	2.794.053	
April	13.0	57.1	-	46	9	-	30	146.544	3.144.528	2.997.984	
Mei	15.0	58.9	-	44	8	-	31	144.761	3.249.346	3.104.585	
Juni	16.0	59.9	-	41	8	-	30	130.703	3.144.528	3.013.826	
Juli	17.0	60.8	-	39	8	-	31	128.392	2.658.556	2.550.164	
Augustus	18.0	61.7	-	40	8	-	31	132.026	2.658.556	2.526.530	
September	19.0	60.8	-	43	8	-	30	137.155	2.572.796	2.435.640	
Oktober	16.0	59.9	-	45	8	-	31	147.795	2.658.556	2.510.761	
November	10.0	58.0	-	50	10	-	30	158.256	3.144.528	2.986.272	
December	6.0	56.1	-	54	10	-	31	176.867	2.953.951	2.777.084	
									2.077.069	34.781.330	32.684.261
									7.5	125.1	75.9
									41,8		kWh/jaar
											TJ/jaar

Stoomproductie													
dagen #	productiefactor	productie biogas m3/maand	biogas naar WKKs m3/maand	biogas naar WKK1 m3/maand	biogas naar WKK2 m3/maand	biogas naar WKK3 m3/maand	stoom uit WKKs kg/maand	biogas naar ketel m3/maand	stoom uit ketel kg/maand	stoomproductie kg/maand	stoombehoefte kg/maand	stoomtekort kg/maand	aardgas nodig m3/maand
Januari	31	462.358	308.298	204.600	103.698	-	715.251	154.060	1.155.448	1.870.699	1.870.699	-	-
Februari	28	417.613	278.463	184.800	93.663	-	646.033	139.151	1.043.630	1.689.663	1.689.663	-	-
Maart	31	462.358	308.298	204.600	103.698	-	715.251	154.060	1.155.448	1.870.699	1.870.699	-	-
April	30	492.187	363.137	198.000	165.137	-	842.478	129.050	967.876	1.810.354	1.810.354	-	-
Mei	31	508.593	375.241	204.600	170.641	-	870.560	133.352	1.000.138	1.870.699	1.870.699	-	-
Juni	30	492.187	363.137	198.000	165.137	-	842.478	129.050	967.876	1.810.354	1.810.354	-	-
Juli	31	416.122	241.354	204.600	36.754	-	559.942	174.768	1.310.757	1.870.699	1.870.699	-	-
Aug.	31	416.122	241.354	204.600	36.754	-	559.942	174.768	1.310.757	1.870.699	1.870.699	-	-
September	30	402.698	233.569	198.000	35.569	-	541.879	169.130	1.268.475	1.810.354	1.810.354	-	-
Oktober	31	416.122	241.354	204.600	36.754	-	559.942	174.768	1.310.757	1.870.699	1.870.699	-	-
November	30	492.187	363.137	198.000	165.137	-	842.478	129.050	967.876	1.810.354	1.810.354	-	-
December	31	462.358	308.298	204.600	103.698	-	715.251	154.060	1.155.448	1.870.699	1.870.699	-	-
								1.815.265	m3/jaar				
								41.751.088	MJ/jaar				
								42	TJ/jaar				

BIJLAGE V

RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSE

rwzi 150.000 i.e. - temperatuur					
versie: 21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
electriciteitskosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slibverwerking	EUR/ton ontw. slib	30			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	3,00			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	2,25			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	1,80			
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	% van bouwkosten	2,00			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit W		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staartkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
	variant	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
	type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel
	verblijftijd	24	24	12	12
	extern slib	nee	nee	ja	ja
	TSO	nee	nee	nee	ja
	% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%
	aanvoer PS (kg ds/d)	4.342	4.342	4.342	4.342
	aanvoer SS (kg ds/d)	4.378	4.378	4.378	4.378
	aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	11.111	9.703
	totaal aanvoer (kg ds/d)	8.720	8.720	19.830	18.422
	biogasproductie (Nm ³ /d)	1.909	2.435	4.513	5.083
	% ds slibkoek	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%
	slibafzet (ton slib/d)	30	27	68	45
	reductie slibafzet (ton slib/d)	0	3	14	30
Bouw- en investeringskosten					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Bouwkosten					
	extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	-	300.000	300.000
	aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting	-	100.000	150.000	150.000
	thermische slibontsluiting	-	-	-	1.704.000
	WKK	-	-	31.000	-
	voorzieningen ontvangst extern slib	-	-	200.000	200.000
	deelstroombehandeling	-	255.000	547.000	592.000
	totaal bouwkosten	-	355.000	1.228.000	2.946.000
	investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))	-	532.500	1.842.000	4.419.000
Berekening jaarlijkse eenheden					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
	energieproductie van bestaande WKK (kWh _a)	1.512.349	1.929.861	3.428.081	2.759.126
	extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _a)	0	0	178.218	0
	nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	0	0	20	0
	ontwaterd slib	11.049	10.032	24.794	16.396
	polymeerverbruik ¹	18.660	17.539	18.797	17.071
	extra inzet personeel	0	0	0,1	0,4
	toegenomen N-vracht deelstroombehandeling	0	20.432	62.226	73.681
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slib					
Berekening jaarlijkse kosten					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Parameter					
kosten					
	kapitaalslasten extra voorindik- en ontwateringsapparatuur	-	-	43.000	43.000
	kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	-	14.000	21.000	21.000
	kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	-	-	-	242.000
	kapitaalslasten investeringen WKK	-	-	4.000	-
	kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	-	-	11.000	11.000
	kapitaalslasten deelstroombehandeling	-	34.000	73.000	79.000
	bedrijfskosten deelstroombehandeling	-	17.000	36.000	39.000
	polymeerdosering	65.000	61.000	66.000	60.000
	extra personeel	-	-	5.000	18.000
	onderhoudskosten thermische slibontsluiting	-	-	-	34.000
	onderhoud nieuwe WKK	-	-	48.000	-
	aardgas inkoop voor o.a. warmtetekort en stoomopwekking	-	-	-	-
	totaal jaarlijkse kosten	65.000	126.000	307.000	547.000
	totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	65.000	78.000	155.000	151.000
opbrengsten					
	opbrengsten electriciteitsproductie	189.000	241.000	451.000	345.000
	opbrengsten verminderde slibafzet	-	31.000	151.000	331.000
	totaal opbrengsten	189.000	272.000	602.000	676.000
	totaal netto opbrengsten	124.000	194.000	447.000	525.000
	Besparing t.o.v. mesofiel		70.000	323.000	401.000
	Terugverdientijd	jaar		7,6	5,7
					11,0

rwzi 150.000 i.e. - 10% ods-afbraak					
versie: 21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
elektriciteitskosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slijverwerking	EUR/ton ontw. slijb	30			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	3,00			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	2,25			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	1,80			
onderhoudskosten thermische slijbontsluiting	% van bouwkosten	2,00			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit W		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staartkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
	variant	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
	type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel
	verblijftijd	24	24	12	12
	extern slijb	nee	nee	ja	ja
	TSO	nee	nee	nee	ja
	% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%
	aanvoer PS (kg ds/d)	4.342	4.342	4.342	4.342
	aanvoer SS (kg ds/d)	4.378	4.378	4.378	4.378
	aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	11.111	9.703
	totaal aanvoer (kg ds/d)	8.720	8.720	19.830	18.422
	biogasproductie (Nm ³ /d)	1.909	2.098	4.227	4.772
	% ds slijbkoek	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%
	slijbfzet (ton slijb/d)	30	29	69	46
	reductie slijbfzet (ton slijb/d)	0	1	12	29
Bouw- en investeringskosten					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Bouwkosten					
	extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	-	300.000	300.000
	aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting	-	100.000	150.000	150.000
	thermische slijbontsluiting	-	-	-	1.704.000
	WKK	-	-	11.000	-
	voorzieningen ontvangst extern slijb	-	-	200.000	200.000
	deelstroombehandeling	-	255.000	614.000	659.000
	totaal bouwkosten	-	355.000	1.275.000	3.013.000
	investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))	-	532.500	1.912.500	4.519.500
Berekening jaarlijkse eenheden					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
	energieproductie van bestaande WKK (kWh _a)	1.512.349	1.662.886	3.283.965	2.402.833
	extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _a)	0	0	65.636	0
	nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	0	0	7	0
	ontwaterd slijb	11.049	10.682	25.347	16.857
	polymeerverbruik ¹	kg/jaar			
		18.660	18.256	19.406	17.732
	extra inzet personeel	fte	0	0	0,1
	toegenomen N-wacht deelstroombehandeling	kg N/j	0	20.432	70.116
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slijb					
Berekening jaarlijkse kosten					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Parameter					
parameter	eenheid				
kosten					
	kapitaalslasten extra voorindik- en ontwateringsapparatuur	EUR/jaar	-	-	43.000
	kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	EUR/jaar	-	14.000	21.000
	kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	EUR/jaar	-	-	242.000
	kapitaalslasten investeringen WKK	EUR/jaar	-	-	1.000
	kapitaalslasten investering ontvangst extern slijb	EUR/jaar	-	-	11.000
	kapitaalslasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	34.000	82.000
	bedrijfskosten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	17.000	41.000
	polymeerdosering	EUR/jaar	65.000	64.000	68.000
	extra personeel	EUR/jaar	-	-	5.000
	onderhoudskosten thermische slijbontsluiting	EUR/jaar	-	-	34.000
	onderhoud nieuwe WKK	EUR/jaar	-	-	48.000
	aardgas inkoop voor o.a. warmtetekort en stoomopwekking	EUR/jaar	-	-	-
	totaal jaarlijkse kosten	EUR/jaar	65.000	129.000	320.000
	totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	EUR/jaar	65.000	81.000	162.000
opbrengsten					
	opbrengsten elektriciteitsproductie	EUR/jaar	189.000	208.000	419.000
	opbrengsten verminderde slijbfzet	EUR/jaar	-	11.000	134.000
	totaal opbrengsten	EUR/jaar	189.000	219.000	553.000
	totaal netto opbrengsten	EUR/jaar	124.000	138.000	391.000
	Besparing t.o.v. mesofiel		14.000	267.000	336.000
	Terugverdientijd	jaar		38,0	7,2
					13,5

rwzi 150.000 i.e. - ontwatering					
versie: 21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
elektriciteitskosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slibverwerking	EUR/ton ontw. slib	30			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	3,00			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	2,25			
kosten deelstroombehandeling	EUR/ kg N	1,80			
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	% van bouwkosten	2,00			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit W		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staarkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
	variant	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
	type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel
	verblijftijd	24	24	12	12
	extern slib	nee	nee	ja	ja
	TSO	nee	nee	nee	ja
	% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%
	aanvoer PS (kg ds/d)	4.342	4.342	4.342	4.342
	aanvoer SS (kg ds/d)	4.378	4.378	4.378	4.378
	aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	11.111	9.703
	totaal aanvoer (kg ds/d)	8.720	8.720	19.830	18.422
	biogasproductie (Nm ³ /d)	1.909	2.288	4.414	4.972
	% ds slibkoek	21,6%	19,4%	19,4%	28,1%
	slibafzet (ton slib/d)	30	31	76	45
	reductie slibafzet (ton slib/d)	0	-1	6	30
Bouw- en investeringskosten					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
Bouwkosten					
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit		-	-	300.000	300.000
aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting		-	100.000	150.000	150.000
thermische slibontsluiting		-	-	-	1.704.000
WKK		-	-	21.000	-
voorzieningen ontvangst extern slib		-	-	200.000	200.000
deelstroombehandeling		-	255.000	577.000	622.000
totaal bouwkosten		-	355.000	1.248.000	2.976.000
investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))		-	532.500	1.872.000	4.464.000
Berekening jaarlijkse eenheden					
		mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
energieproductie van bestaande WKK (kWh _e)	kWh/jaar	1.512.349	1.813.423	3.377.846	2.631.507
extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _e)	kWh/jaar	0	0	123.125	0
nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	kWe	0	0	14	0
ontwaterd slib	ton/jaar	11.049	11.462	27.763	16.561
polymeerverbruik ¹	kg/jaar	18.660	17.852	19.009	17.308
extra inzet personeel	fte	0	0	0,1	0,4
toegenomen N-vracht deelstroombehandeling	kg N/j	0	20.432	65.918	77.865
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slib					
Berekening jaarlijkse kosten					
Parameter	eenheid	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+
kosten					
kapitaalslasten extra voorindik- en ontwateringsapparatuur	EUR/jaar	-	-	43.000	43.000
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	EUR/jaar	-	14.000	21.000	21.000
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	EUR/jaar	-	-	-	242.000
kapitaalslasten investeringen WKK	EUR/jaar	-	-	2.000	-
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	EUR/jaar	-	-	11.000	11.000
kapitaalslasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	34.000	77.000	83.000
bedrijfskosten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	17.000	38.000	42.000
polymeerdosering	EUR/jaar	65.000	62.000	67.000	61.000
extra personeel	EUR/jaar	-	-	5.000	18.000
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	EUR/jaar	-	-	-	34.000
onderhoud nieuwe WKK	EUR/jaar	-	-	48.000	-
aardgas inkoop voor o.a. warmtekort en stoomopwekking	EUR/jaar	-	-	-	-
totaal jaarlijkse kosten	EUR/jaar	65.000	127.000	312.000	555.000
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	EUR/jaar	65.000	79.000	158.000	155.000
opbrengsten					
opbrengsten elektriciteitsproductie	EUR/jaar	189.000	227.000	438.000	329.000
opbrengsten verminderde slibafzet	EUR/jaar	-	12.000	62.000	327.000
totaal opbrengsten	EUR/jaar	189.000	215.000	500.000	656.000
totaal netto opbrengsten	EUR/jaar	124.000	136.000	342.000	501.000
Besparing t.o.v. mesofiel			12.000	218.000	377.000
Terugverdientijd	jaar		44,4	8,6	11,8

rwzi 490.000 i.e. - temperatuur					
versie:21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
energiekosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slibverwerking	EUR/ton ontw. slib	30			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	% bouwkosten TSO	2			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit M		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staatkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
variant	0	1	2	3	
type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel	
verblijftijd	24	24	12	12	
extern slib	nee	nee	ja	ja	
TSO	nee	nee	nee	ja	
% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%	
aanvoer PS (kg ds/d)	13.025	13.025	13.025	13.025	
aanvoer SS (kg ds/d)	13.134	13.134	13.134	13.134	
aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	33.332	29.108	
totaal aanvoer (kg ds/d)	26.159	26.159	59.491	55.267	
biogasproductie (m ³ /d)	5.725	7.306	13.540	15.248	
% ds slibkoek	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%	
slibafzet (ton slib/d)	91	82	204	135	
reductie slibafzet (ton slib/d)	0	8	41	91	
Bouw- en investeringskosten	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
Bouwkosten					
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	-	600.000	600.000	
aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting	-	250.000	400.000	400.000	
thermische slibontsluiting (TurboTec)	-	-	-	3.408.000	
WKK	-	-	88.000	-	
voorzieningen ontvangst extern slib	-	-	400.000	400.000	
deelstroombehandeling	-	554.000	1.116.000	1.213.000	
totaal bouwkosten	-	804.000	2.604.000	6.021.000	
investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))	-	1.206.000	3.906.000	9.031.500	
Berekening jaarlijkse eenheden	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
energieproductie van bestaande WKK (kWh _e)	kWh/jaar	4.536.940	5.789.448	10.284.100	8.258.543
extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _e)	kWh/jaar	-	-	511.615	0
nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	kWe	-	-	58	0
ontwaterd slib	ton/jaar	33.148	30.096	74.383	49.189
polymeerverbruik ¹	kg/jaar	55.981	52.618	56.390	51.214
extra inzet personeel	fte	-	-	0,1	0,4
toegenomen N-vracht deelstroombehandeling	kg N/j	-	61.297	186.678	221.045
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slib					
Berekening jaarlijkse kosten	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
Parameter	eenheid				
kosten					
kapitaalslasten extra indik- en ontwateringscapaciteit	EUR/jaar	-	-	85.000	85.000
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	EUR/jaar	-	36.000	57.000	57.000
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	EUR/jaar	-	-	-	484.000
kapitaalslasten investeringen WKK	EUR/jaar	-	-	12.000	-
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	EUR/jaar	-	-	23.000	23.000
kapitaalslasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	74.000	149.000	162.000
deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	37.000	75.000	81.000
polymeerdosering	EUR/jaar	196.000	184.000	197.000	179.000
extra personeel	EUR/jaar	-	-	5.000	18.000
onderhoud thermische slibontsluiting	EUR/jaar	-	-	2.000	68.000
onderhoud nieuwe WKK	EUR/jaar	-	-	48.000	-
aardgas inkoop voor o.a. warmte tekort en stoomopwekking	EUR/jaar	-	-	-	-
totaal jaarlijkse kosten	EUR/jaar	196.000	331.000	653.000	1.157.000
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	EUR/jaar	196.000	221.000	327.000	346.000
opbrengsten					
opbrengsten elektriciteitsproductie	EUR/jaar	567.000	724.000	1.349.000	1.032.000
opbrengsten verminderde slibafzet	EUR/jaar	-	92.000	453.000	994.000
totaal opbrengsten	EUR/jaar	567.000	816.000	1.802.000	2.026.000
totaal netto opbrengsten	EUR/jaar	371.000	595.000	1.475.000	1.680.000
Besparing t.o.v. mesofiel	EUR/jaar		224.000	1.104.000	1.309.000
Terugverdientijd	jaar		5,4	3,5	6,9

rwzi 490.000 i.e. - 10% ods-afbraak					
versie:21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
energiekosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slibverwerking	EUR/ton ontv. slib	30			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	% bouwkosten TSO	2			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit W		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staartkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
variant	0	1	2	3	
type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel	
verblijftijd	24	24	12	12	
extern slib	nee	nee	ja	ja	
TSO	nee	nee	nee	ja	
% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%	
aanvoer PS (kg ds/d)	13.025	13.025	13.025	13.025	
aanvoer SS (kg ds/d)	13.134	13.134	13.134	13.134	
aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	33.332	29.108	
totaal aanvoer (kg ds/d)	26.159	26.159	59.491	55.267	
biogasproductie (m ³ /d)	5.725	6.295	12.681	14.317	
% ds slibkoek	21,6%	21,6%	21,6%	28,1%	
slibafzet (ton slib/d)	91	88	208	139	
reductie slibafzet (ton slib/d)	0	3	37	87	
Bouw- en investeringskosten	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
Bouwkosten					
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	-	600.000	600.000	
aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting	-	250.000	400.000	400.000	
thermische slibontsluiting (TurboTec)	-	-	-	3.408.000	
WKK	-	-	34.000	-	
voorzieningen ontvangst extern slib	-	-	400.000	400.000	
deelstroombehandeling	-	554.000	1.259.000	1.363.000	
totaal bouwkosten	-	804.000	2.693.000	6.171.000	
investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))	-	1.206.000	4.039.500	9.256.500	
Berekening jaarlijkse eenheden	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
energieproductie van bestaande WKK (kWh _e)	4.536.940	4.988.540	9.851.762	7.189.688	
extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _e)	-	-	196.831	0	
nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	-	-	22	0	
ontwaterd slib	33.148	32.048	76.042	50.573	
polymeerverbruik ¹	55.981	54.768	58.217	53.195	
extra inzet personeel	fte	-	0,1	0,4	
toegenomen N-vracht deelstroombehandeling	kg N/j	-	61.297	210.349	
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slib					
Berekening jaarlijkse kosten	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
Parameter	eenheid				
kosten					
kapitaalslasten extra indik- en ontwateringscapaciteit	EUR/jaar	-	-	85.000	
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	EUR/jaar	-	36.000	57.000	
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	EUR/jaar	-	-	484.000	
kapitaalslasten investeringen WKK	EUR/jaar	-	-	4.000	
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	EUR/jaar	-	-	23.000	
kapitaalslasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	74.000	168.000	
deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	37.000	84.000	
polymeerdosering	EUR/jaar	196.000	192.000	204.000	
extra personeel	EUR/jaar	-	-	5.000	
onderhoud thermische slibontsluiting	EUR/jaar	-	-	1.000	
onderhoud nieuwe WKK	EUR/jaar	-	-	48.000	
aardgas inkoop voor o.a. warmte tekort en stoomopwekking	EUR/jaar	-	-	-	
totaal jaarlijkse kosten	EUR/jaar	196.000	339.000	679.000	
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	EUR/jaar	196.000	229.000	342.000	
opbrengsten					
opbrengsten elektriciteitsproductie	EUR/jaar	567.000	624.000	1.256.000	
opbrengsten verminderde slibafzet	EUR/jaar	-	33.000	403.000	
totaal opbrengsten	EUR/jaar	567.000	657.000	1.659.000	
totaal netto opbrengsten	EUR/jaar	371.000	428.000	1.317.000	
Besparing t.o.v. mesofiel	EUR/jaar		57.000	946.000	
Terugverdientijd	jaar		21,2	4,3	
				8,3	

rwzi 490.000 i.e. - ontwatering					
versie:21022014					
Uitgangspunten kostenberekening					
parameter	eenheid	waarde			
energiekosten	EUR/kWh	0,125			
aargasprijs	EUR/m ³	0,5			
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	3,5			
kosten slibverwerking	EUR/ton ontw. slib	30			
onderhoudskosten WKK groot > 500 kWe	EUR/draaiuur	4			
onderhoudskosten WKK klein < 500 kWe	EUR/draaiuur	6			
onderhoudskosten thermische slibontsluiting	% bouwkosten TSO	2			
personeel	EUR/fte	45.000			
reële rente	%	4,75%			
afschrijving C	jaar	40			
annuïteit C		0,0563			
afschrijving M	jaar	15			
annuïteit W		0,0947			
afschrijving E	jaar	15			
annuïteit E		0,0947			
staartkostenfactor (incl. BTW en 10 % onvoorzien)	-	1,5			
variant	0	1	2	3	
type gisting	mesofiel	thermofiel	thermofiel	thermofiel	
verblijftijd	24	24	12	12	
extern slib	nee	nee	ja	ja	
TSO	nee	nee	nee	ja	
% drogestof in	5,7%	5,7%	6,6%	6,1%	
aanvoer PS (kg ds/d)	13.025	13.025	13.025	13.025	
aanvoer SS (kg ds/d)	13.134	13.134	13.134	13.134	
aanvoer SS _{extern} (kg ds/d)	0	0	33.332	29.108	
totaal aanvoer (kg ds/d)	26.159	26.159	59.491	55.267	
biogasproductie (m ³ /d)	5.725	6.865	13.240	14.915	
% ds slibkoek	21,6%	19,4%	19,4%	28,1%	
slibafzet (ton slib/d)	91	94	228	136	
reductie slibafzet (ton slib/d)	0	-3	34	89	
Bouw- en investeringskosten	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
Bouwkosten					
extra voorindik- en ontwateringscapaciteit	-	-	600.000	600.000	
aanpassingen t.b.v. thermofiele gisting	-	250.000	400.000	400.000	
thermische slibontsluiting (TurboTec)	-	-	-	3.408.000	
WKK	-	-	63.000	-	
voorzieningen ontvangst extern slib	-	-	400.000	400.000	
deelstroombehandeling	-	554.000	1.183.000	1.281.000	
totaal bouwkosten	-	804.000	2.646.000	6.089.000	
investeringskosten (=bouwkosten * investeringsfactor (1,5))	-	1.206.000	3.969.000	9.133.500	
Berekening jaarlijkse eenheden	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
energieproductie van bestaande WKK (kWh _e)	4.536.940	5.440.141	10.133.397	7.875.694	
extra energieproductie van nieuwe WKK (kWh _e)	-	-	366.506	0	
nieuw opgesteld elektrisch vermogen WKK	-	-	42	0	
ontwaterd slib	33.148	34.386	83.290	49.684	
polymeerverbruik ¹	55.981	53.556	57.027	51.924	
extra inzet personeel	-	-	0,1	0,4	
toegenomen N-vracht deelstroombehandeling	-	61.297	197.755	233.595	
1) polymeerverbruik daalt voor de varianten als gevolg van extra afbraak van ds en neemt toe voor verdere indikking bij inzet extern slib					
Berekening jaarlijkse kosten	mesofiel	thermofiel	thermofiel+	TSO/thermofiel+	
Parameter	eenheid				
kosten					
kapitaalslasten extra indik- en ontwateringscapaciteit	EUR/jaar	-	-	85.000	
kapitaalslasten investeringen thermofiele gisting	EUR/jaar	-	36.000	57.000	
kapitaalslasten investeringen thermische druk hydrolyse	EUR/jaar	-	-	484.000	
kapitaalslasten investeringen WKK	EUR/jaar	-	-	8.000	
kapitaalslasten investering ontvangst extern slib	EUR/jaar	-	-	23.000	
kapitaalslasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	74.000	171.000	
deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	37.000	79.000	
polymeerdosering	EUR/jaar	196.000	187.000	200.000	
extra personeel	EUR/jaar	-	-	5.000	
onderhoud thermische slibontsluiting	EUR/jaar	-	-	1.000	
onderhoud nieuwe WKK	EUR/jaar	-	-	48.000	
aardgas inkoop voor o.a. warmte tekort en stoomopwekking	EUR/jaar	-	-	-	
totaal jaarlijkse kosten	EUR/jaar	196.000	334.000	664.000	
totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaalslasten)	EUR/jaar	196.000	224.000	354.000	
opbrengsten					
opbrengsten elektriciteitsproductie	EUR/jaar	567.000	680.000	1.312.000	
opbrengsten verminderde slibafzet	EUR/jaar	-	37.000	185.000	
totaal opbrengsten	EUR/jaar	567.000	643.000	1.964.000	
totaal netto opbrengsten	EUR/jaar	371.000	419.000	1.610.000	
Besparing t.o.v. mesofiel	EUR/jaar		48.000	793.000	
Terugverdientijd	jaar		25,1	5,0	
				7,4	

BIJLAGE VI

DIMENSIONERING SLIBLIJN

TABEL VI.1 DIMENSIONERING SLIBLIJN 150.000 I.E. EN 490.000 I.E.

procesonderdeel	Volgens Wamelink et al., 2011	rwzi 150.000	rwzi 490.000
voorindikker voor primair slib:			
type	-	gravitair	gravitair
aantal	stuks	1	1
drogestofbelasting	kg ds/(m ² .d)	57,2	57,2
indikgraad	% ds	5,4	5,4
voorindikking secundair slib:			
type	-	bandindikker	bandindikker
aantal	stuks	1	2
PE-verbruik	g/kg ds	4	4
indikgraad	% ds	6,0	6,0
slibgistinginstallatie:			
aantal	stuks	1	2
volume	m ³ /st.	1810	5.430
ontwerpverblijftijd	d	20	20
gashouder en WKK-installatie:			
gashouder aantal	stuks	1	2
gashouder netto inhoud	m ³ /st.	217	650
aantal WKK installaties	stuks	1	2
elektrisch vermogen	kWhe/st.	200	600
thermisch vermogen	kWht/st.	267	800
maximaal verbruik biogas	m ³ /h/st.	183	275
Slibvoorraadtank			
aantal	stuks	1	1
volume	m ³	500	1.500
Slibontwatering			
type	-	zeefbandpers	zeefbandpers
aantal	stuks	2	4
capaciteit	m ³ /h/st.	15	30
huidige ontwateringsgraad	% ds	21,6	21,6
PE verbruik	g/kg ds	5,1	5,1
slibsilo:			
aantal	stuks	2	2
volume (bruto)	m ³	33,3	100
opslagperiode	d	2,1	2,1

BIJLAGE VII

NETTO CONTANTE WAARDEBEREKENING

TABEL VII.1 NCW VARIANT THERMOFIEL, SCHAALGROOTTE 150.000 I.E.

Jaar	Looptijd	investeringen C	investeringen W	Operationele kosten	NCW
2013	0	€ 0	€ 355.000	-€ 46.000	€ 309.000
2014	1			-€ 46.000	-€ 43.914
2015	2			-€ 46.000	-€ 41.923
2016	3			-€ 46.000	-€ 40.022
2017	4			-€ 46.000	-€ 38.207
2018	5			-€ 46.000	-€ 36.474
2019	6			-€ 46.000	-€ 34.820
2020	7			-€ 46.000	-€ 33.241
2021	8			-€ 46.000	-€ 31.734
2022	9			-€ 46.000	-€ 30.295
2023	10			-€ 46.000	-€ 28.921
2024	11			-€ 46.000	-€ 27.610
2025	12			-€ 46.000	-€ 26.358
2026	13			-€ 46.000	-€ 25.163
2027	14			-€ 46.000	-€ 24.022
2028	15		€ 355.000	-€ 46.000	€ 154.045
2029	16			-€ 46.000	-€ 21.892
2030	17			-€ 46.000	-€ 20.900
2031	18			-€ 46.000	-€ 19.952
2032	19			-€ 46.000	-€ 19.047
2033	20			-€ 46.000	-€ 18.183
2034	21			-€ 46.000	-€ 17.359
2035	22			-€ 46.000	-€ 16.572
2036	23			-€ 46.000	-€ 15.820
2037	24			-€ 46.000	-€ 15.103
2038	25			-€ 46.000	-€ 14.418
2039	26			-€ 46.000	-€ 13.764
2040	27			-€ 46.000	-€ 13.140
2041	28			-€ 46.000	-€ 12.544
2042	29			-€ 46.000	-€ 11.975
2043	30		€ 355.000	-€ 46.000	€ 76.796
totaal NCW					-€ 200.000

TABEL VII.2 NCW VARIANT THERMOFIEL+, SCHAALGROOTTE 150.000 I.E.

Jaar	Looptijd	investeringen C	investeringen W	Operationele kosten	NCW
2013	0	€ 200.000	€ 1.048.000	-€ 301.000	€ 947.000
2014	1			-€ 301.000	-€ 287.351
2015	2			-€ 301.000	-€ 274.321
2016	3			-€ 301.000	-€ 261.881
2017	4			-€ 301.000	-€ 250.006
2018	5			-€ 301.000	-€ 238.669
2019	6			-€ 301.000	-€ 227.846
2020	7			-€ 301.000	-€ 217.515
2021	8			-€ 301.000	-€ 207.651
2022	9			-€ 301.000	-€ 198.235
2023	10			-€ 301.000	-€ 189.246
2024	11			-€ 301.000	-€ 180.664
2025	12			-€ 301.000	-€ 172.472
2026	13			-€ 301.000	-€ 164.651
2027	14			-€ 301.000	-€ 157.185
2028	15		€ 1.048.000	-€ 301.000	€ 372.400
2029	16			-€ 301.000	-€ 143.252
2030	17			-€ 301.000	-€ 136.756
2031	18			-€ 301.000	-€ 130.555
2032	19			-€ 301.000	-€ 124.635
2033	20			-€ 301.000	-€ 118.983
2034	21			-€ 301.000	-€ 113.588
2035	22			-€ 301.000	-€ 108.437
2036	23			-€ 301.000	-€ 103.520
2037	24			-€ 301.000	-€ 98.826
2038	25			-€ 301.000	-€ 94.344
2039	26			-€ 301.000	-€ 90.066
2040	27			-€ 301.000	-€ 85.982
2041	28			-€ 301.000	-€ 82.083
2042	29			-€ 301.000	-€ 78.361
2043	30		€ 1.048.000	-€ 301.000	€ 185.652
totaal NCW					-€ 3.000.000

TABEL VII.3 NCW VARIANT TSO/THERMOFIEL+, SCHAALGROOTE 150.000 I.E.

Jaar	Looptijd	investeringen C	investeringen W	Operationele kosten	NCW
2013	0	€ 200.000	€ 2.776.000	-€ 377.000	€ 2.599.000
2014	1			-€ 377.000	-€ 359.905
2015	2			-€ 377.000	-€ 343.584
2016	3			-€ 377.000	-€ 328.004
2017	4			-€ 377.000	-€ 313.130
2018	5			-€ 377.000	-€ 298.931
2019	6			-€ 377.000	-€ 285.376
2020	7			-€ 377.000	-€ 272.435
2021	8			-€ 377.000	-€ 260.081
2022	9			-€ 377.000	-€ 248.288
2023	10			-€ 377.000	-€ 237.029
2024	11			-€ 377.000	-€ 226.280
2025	12			-€ 377.000	-€ 216.020
2026	13			-€ 377.000	-€ 206.224
2027	14			-€ 377.000	-€ 196.872
2028	15		€ 2.776.000	-€ 377.000	€ 1.195.969
2029	16			-€ 377.000	-€ 179.422
2030	17			-€ 377.000	-€ 171.286
2031	18			-€ 377.000	-€ 163.519
2032	19			-€ 377.000	-€ 156.104
2033	20			-€ 377.000	-€ 149.026
2034	21			-€ 377.000	-€ 142.268
2035	22			-€ 377.000	-€ 135.817
2036	23			-€ 377.000	-€ 129.658
2037	24			-€ 377.000	-€ 123.778
2038	25			-€ 377.000	-€ 118.165
2039	26			-€ 377.000	-€ 112.807
2040	27			-€ 377.000	-€ 107.692
2041	28			-€ 377.000	-€ 102.808
2042	29			-€ 377.000	-€ 98.146
2043	30		€ 2.776.000	-€ 377.000	€ 596.224
totaal NCW					-€ 1.300.000

TABEL VII.4 NCW VARIANT THERMOFIEL, SCHAALGROOTTE 490.000 I.E.

Jaar	Looptijd	investeringen C	investeringen W	Operationele kosten	NCW
2013	0	€ 0	€ 804.000	-€ 151.000	€ 653.000
2014	1			-€ 151.000	-€ 144.153
2015	2			-€ 151.000	-€ 137.616
2016	3			-€ 151.000	-€ 131.376
2017	4			-€ 151.000	-€ 125.418
2018	5			-€ 151.000	-€ 119.731
2019	6			-€ 151.000	-€ 114.302
2020	7			-€ 151.000	-€ 109.119
2021	8			-€ 151.000	-€ 104.170
2022	9			-€ 151.000	-€ 99.447
2023	10			-€ 151.000	-€ 94.937
2024	11			-€ 151.000	-€ 90.632
2025	12			-€ 151.000	-€ 86.522
2026	13			-€ 151.000	-€ 82.599
2027	14			-€ 151.000	-€ 78.853
2028	15		€ 804.000	-€ 151.000	€ 325.539
2029	16			-€ 151.000	-€ 71.864
2030	17			-€ 151.000	-€ 68.605
2031	18			-€ 151.000	-€ 65.494
2032	19			-€ 151.000	-€ 62.525
2033	20			-€ 151.000	-€ 59.689
2034	21			-€ 151.000	-€ 56.983
2035	22			-€ 151.000	-€ 54.399
2036	23			-€ 151.000	-€ 51.932
2037	24			-€ 151.000	-€ 49.577
2038	25			-€ 151.000	-€ 47.329
2039	26			-€ 151.000	-€ 45.183
2040	27			-€ 151.000	-€ 43.134
2041	28			-€ 151.000	-€ 41.178
2042	29			-€ 151.000	-€ 39.311
2043	30		€ 804.000	-€ 151.000	€ 162.290
totaal NCW					-€ 1.100.000

TABEL VII.5 NCW VARIANT THERMOFIEL+, SCHAALGROOTE 490.000 I.E.

Jaar	Looptijd	investeringen C	investeringen W	Operationele kosten	NCW
2013	0	€ 400.000	€ 2.246.000	-€ 1.043.000	€ 1.603.000
2014	1			-€ 1.043.000	-€ 995.704
2015	2			-€ 1.043.000	-€ 950.553
2016	3			-€ 1.043.000	-€ 907.449
2017	4			-€ 1.043.000	-€ 866.300
2018	5			-€ 1.043.000	-€ 827.016
2019	6			-€ 1.043.000	-€ 789.515
2020	7			-€ 1.043.000	-€ 753.713
2021	8			-€ 1.043.000	-€ 719.535
2022	9			-€ 1.043.000	-€ 686.907
2023	10			-€ 1.043.000	-€ 655.759
2024	11			-€ 1.043.000	-€ 626.023
2025	12			-€ 1.043.000	-€ 597.635
2026	13			-€ 1.043.000	-€ 570.534
2027	14			-€ 1.043.000	-€ 544.663
2028	15		€ 2.246.000	-€ 1.043.000	€ 599.729
2029	16			-€ 1.043.000	-€ 496.386
2030	17			-€ 1.043.000	-€ 473.877
2031	18			-€ 1.043.000	-€ 452.389
2032	19			-€ 1.043.000	-€ 431.875
2033	20			-€ 1.043.000	-€ 412.291
2034	21			-€ 1.043.000	-€ 393.595
2035	22			-€ 1.043.000	-€ 375.747
2036	23			-€ 1.043.000	-€ 358.708
2037	24			-€ 1.043.000	-€ 342.442
2038	25			-€ 1.043.000	-€ 326.914
2039	26			-€ 1.043.000	-€ 312.090
2040	27			-€ 1.043.000	-€ 297.938
2041	28			-€ 1.043.000	-€ 284.427
2042	29			-€ 1.043.000	-€ 271.530
2043	30		€ 2.246.000	-€ 1.043.000	€ 298.982
totaal NCW					-€ 13.200.000

TABEL VII.6 NCW VARIANT TSO/THERMOFIEL+, SCHAALGROOTTE 490.000 I.E.

Jaar	Looptijd	investeringen C	investeringen W	Operationele kosten	NCW
2013	0	€ 400.000	€ 5.689.000	-€ 1.239.000	€ 4.850.000
2014	1			-€ 1.239.000	-€ 1.182.816
2015	2			-€ 1.239.000	-€ 1.129.180
2016	3			-€ 1.239.000	-€ 1.077.976
2017	4			-€ 1.239.000	-€ 1.029.094
2018	5			-€ 1.239.000	-€ 982.429
2019	6			-€ 1.239.000	-€ 937.880
2020	7			-€ 1.239.000	-€ 895.351
2021	8			-€ 1.239.000	-€ 854.750
2022	9			-€ 1.239.000	-€ 815.990
2023	10			-€ 1.239.000	-€ 778.988
2024	11			-€ 1.239.000	-€ 743.664
2025	12			-€ 1.239.000	-€ 709.942
2026	13			-€ 1.239.000	-€ 677.749
2027	14			-€ 1.239.000	-€ 647.016
2028	15		€ 5.689.000	-€ 1.239.000	€ 2.218.449
2029	16			-€ 1.239.000	-€ 589.667
2030	17			-€ 1.239.000	-€ 562.928
2031	18			-€ 1.239.000	-€ 537.401
2032	19			-€ 1.239.000	-€ 513.032
2033	20			-€ 1.239.000	-€ 489.768
2034	21			-€ 1.239.000	-€ 467.559
2035	22			-€ 1.239.000	-€ 446.357
2036	23			-€ 1.239.000	-€ 426.117
2037	24			-€ 1.239.000	-€ 406.794
2038	25			-€ 1.239.000	-€ 388.348
2039	26			-€ 1.239.000	-€ 370.737
2040	27			-€ 1.239.000	-€ 353.926
2041	28			-€ 1.239.000	-€ 337.877
2042	29			-€ 1.239.000	-€ 322.555
2043	30		€ 5.689.000	-€ 1.239.000	€ 1.105.959
totaal NCW					-€ 10.500.000

BIJLAGE VIII

RAPPORTAGE LABSCHAALPROEVEN

ACETOLASTIC ACTIVITY OF ANAEROBIC BIOMASS AND ANAEROBIC BIODEGRADATION AT 37 °C AND 55 °C

1 INTRODUCTION

At Water authority “Brabantse Delta” (WBD) two digesters are operated in parallel. One is operated at mesophilic conditions (35 °C), while the other reactor is operated at thermophilic conditions (55 °C). To verify whether the observations made in practice can indeed be attributed to the different biological properties at both temperatures, several laboratory batch tests (SMA and BMP) have been carried out to compare the activity of the sludges from the two reactors.

The specific methanogenic activity (SMA) reflects the maximum activity of acetotrophic methanogenic microorganisms involved in the terminal processes of methanogenesis from complex organic matter. As such, the SMA reflects the overall methanogenic conversion rate and is assessed by using acetate as the sole methanogenic substrate. (e.g. after Sorensen & Ahring, 1993).

The anaerobic biodegradation potential can be assessed by the Biomethane Potential (BMP) test. BMP is the maximum amount of biogas or bio-methane produced per gram of volatile solids (VS) from the substrate used in the anaerobic digestion process (after Angelidaki et al, 2009). From the test results, the time needed for the complete substrate degradation can be calculated as well as the hydrolysis rate, in case hydrolysis is the rate limiting conversion step.

MATERIAL AND METHODS

SAMPLE COLLECTION

Several types of sewage sludge were brought to Anaerobic Laboratory in CITG, TUDelft from WBD including primary, secondary and digested sludge (biomass). The biomass was taken from the anaerobic digester working at 35°C and from the digester at 55°C. The primary, secondary and mesophilic digested sludge were stored at 4°C while the thermophilic digested sludge was kept in an incubator at 55°C.

ANALYTICAL METHODS

Total Solids (TS), Volatile Solids (VS), Total suspended solids (TSS) and Volatile suspended solids (VSS) analyses were conducted according to Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1999). Merck Spectroquant Nova 6, Merck Spectroquant TR620 (digester) and digestion kits were used for total COD determination, based on dichromate COD method approved by USEPA. For VFA, the sludge samples were centrifuged at 12000 rpm for 10 minutes firstly, then the supernatant was filtered using 0.45 µm filter prior to use.

The biogas samples were collected using pressure lock syringe and kept in vacuum tubes prior to biogas measurement. The biogas composition (5ml) was analyzed by gas chromatograph (Model 7890A, Agilent Technology). The pressure meter (GMH 3151) was used for measuring the pressure in the BMP batch digestion tests.

SAMPLE PREPARATION AND EXPERIMENTAL SETUP

SMA TESTS

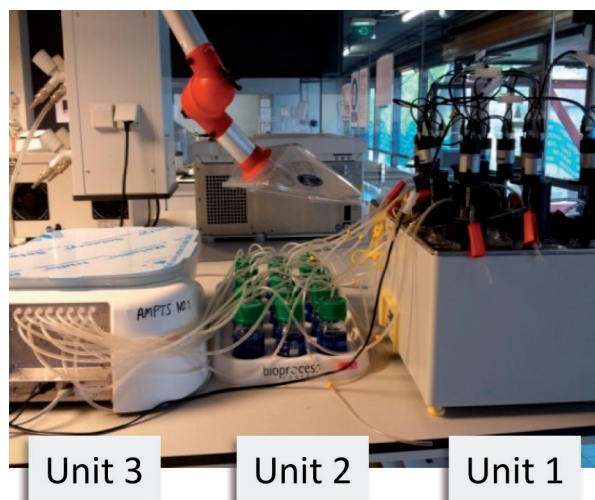
The mineral medium for SMA was prepared using K_2HPO_4 , NaH_2PO_4 , NH_4Cl , $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$, $ZnCl_2$, HBO_3 , $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$, Na_2SeO_3 , $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, EDTA, HCL 36%, Resazurin and Yeast. $NaAc \cdot 3H_2O$ was added for the preparation of substrate solution, beside the stated chemical.

The SMA tests (1st Batch) were done after 3 days upon arrival, whereas the 2nd Batch was carried out after the sample was stored for 44 days at 40°C. The biomass and concentrated substrate solution were mixed in different amounts and sparged with N_2 gas in the reactor bottles. Furthermore, reactor bottles without added substrate were included as controls. The sample and controls were prepared in triplicate. The experimental setup for the SMA test is illustrated in Table 1. The batch SMA tests were carried out using Bioprocess Control's AMPTS equipment as shown in Figure 1. The initial pH for each mixture was neutral (7.1 -7.5) which is appropriate for the methanogenic reaction.

TABLE 1 EXPERIMENTAL SETUP FOR SMA TESTS

Biomass Type	Thermophilic Biomass		Mesophilic Biomass	
	1st Batch	1st Batch	1st Batch	2nd Batch
Total Volume (ml)	400	400	400	400
Head Space (ml)	250	250	250	250
Biomass (ml)	39	40	35	35
Substrate /mineral (ml)	361	360	365	365
Total COD (Substrate -g/L)	1.095	1.095	1.074	1.074

FIGURE 1 AMPTS (UNIT 1: THERMOSTATIC WATER BATH USED FOR REACTOR INCUBATION, WITH ROTATING AGITATORS; UNIT 2: CO2 FIXING STEP, CONTAINING AN ALKALI SOLUTION (NAOH) TO REMOVE CO2 AND H2S; UNIT 3: GAS (CH4) PRODUCTION RATE MEASURING DEVICE)



BMP TESTS

The BMP is determined by anaerobically converting substrate (primary and secondary sludge) by an anaerobic community. In this study these were extracted from the two digesters at WBD.

The inoculum to substrate (I/S) ratio reflects the microbes to food ratio (F/M). A too low ratio could lead to a slow conversion rate and inhibition of the biomass by accumulation of intermediate products. An I/S ratio of 2 is mostly used in literature and adapted by Rodriguez (2011) when he was evaluating the methane potential of sewage sludge. Apul & Sanin (2010) set a BMP test of WAS at an I/S ratio of 0.5 and Girault et al., (2012) carried out the BMP test for WAS at an I/S of 1. In this study we want to avoid lack of activity and therefore an I/S ratio of 2 was applied.

TABLE 2 BMP BATCH DIGESTION TEST

Incubation Temperature	Thermophilic (55°C)	Mesophilic (37°C)
Batch	1 st Batch	1 st Batch
I:S	2:1	2:1
Total Volume (ml)	400	400
Head Space (ml)	237	237
Biomass/ inoculum (ml)	284	278
Substrate (ml)	116	122
Initial pH	7.67	7.19

FIGURE 2 BMP BATCH REACTOR BOTTLES IN THE INCUBATOR



Since in this study biomass from full scale anaerobic digesters was used, the BMP tests were carried out as triplicate batch experiments, because the inoculum from full scale biogas plants could vary in quality and, moreover, the test material (sludge) is relatively heterogeneous (Hansen et al., 2004).

For this experiment, the mixed sludge, originating from primary and secondary sludge at a ratio of 1:1, was used as substrate to determine the BMP . The experimental setup for the BMP test is presented in Table 2.

The BMP tests were carried out using 637 mL reactor bottles as shown in Figure 2. After filling up the reactor bottles with inoculum and substrate, they were flushed using pure N₂ gas for 2 minutes to ensure anaerobic conditions in the headspace of the reactors. The reactor bottles were then sealed with butyl rubber septa and incubated at the designated temperature, i.e 37°C and 55°C, respectively, until the gas production became insignificant. During the experiment the batches were shaken continuously at 130 rpm. Three blanks with only inoculum and without substrate were included to measure the methane production originating from the inoculum. Since BMP is a batch test, no feeding or wasting was done. The gas sample and pressure in the reactors were monitored once per day during the first four days and more irregular (when pressure was build up) afterwards. Gas sampling was started after 4 hours of incubation. Pressure in the reactor bottles was kept in the range of 1.02 -1.50 bar after gas sampling.

RESULTS AND DISCUSSION

SPECIFIC METHANOGENIC ACTIVITY (SMA)

Table 3 shows the SMA values found in the various tests. The SMA values of the blank (unsupplemented) biomass indicates the level of stabilization of the sludge. Or, in other words, how much organic matter is still available in the sample for biogas production. The SMA (1st Batch) for thermophilic and mesophilic biomass was 0.283 gCOD- CH₄/ gVS d and 0.146 gCOD- CH₄/ gVS d, respectively. The mesophilic inoculum, taken from the full scale mesophilic digester, was not stabilized yet, indicated by high activity without additional substrate dosage. Contrary, the inoculum from the thermophilic reactor was fully stabilized.

TABLE 3 SMA FOR BIOMASS FOR ANAEROBIC DIGESTER

Thermophilic Biomass	Mesophilic Biomass					
	1		1		2	
Batch	Sample (Avg)	Blank (Avg)	Sample (Avg)	Blank (Avg)	Sample (Avg)	Blank (Avg)
SMA (gCOD- CH ₄ / gVS d)	0.283 ±0.009	0.035 ±0.003	0.146 ±0.018	0.108 ±0.006	0.037 ±0.002	0.032 ±0.001

Volatile fatty acids (VFAs) of the mixture after digestion were measured, and several types of VFAs were found, including acetic acid, propionic acid and IC6. Acetic acid was found in the blank mesophilic sample, in which the value is 36% of total VFA (24.4 mg/L). Acetic acid was not found in the blank thermophilic sample, supporting the observation that the thermophilic biomass is more stabilized than the mesophilic sample. However, the total VFA concentration for the blank thermophilic sample after digestion was found to be 17.4 mg/L, indicating some additional hydrolysis during the testing period. The ratio of propionic acid to IC6 in the blank thermophilic reactor is more less 1:1.

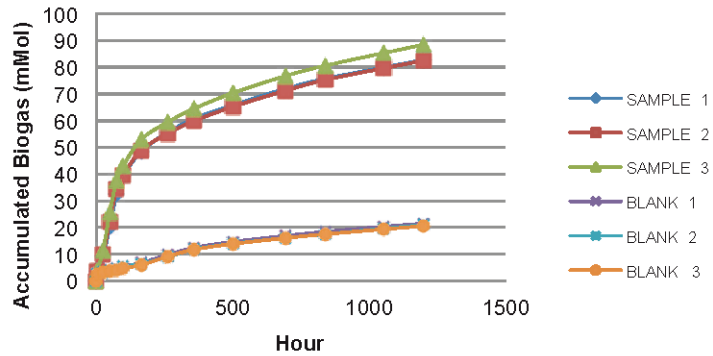
In order to determine the activity of the stabilized mesophilic sludge, a 2nd batch of SMA was carried out. However, during storage methanogenic activity was lost, illustrated by the poor activity measured in the acetate fed sample.

The conclusion that can be drawn from this experiment is that the thermophilic biomass has a two-fold specific methanogenic activity compared to the mesophilic sludge, indicating an accumulation of Archea in the thermophilic reactor.

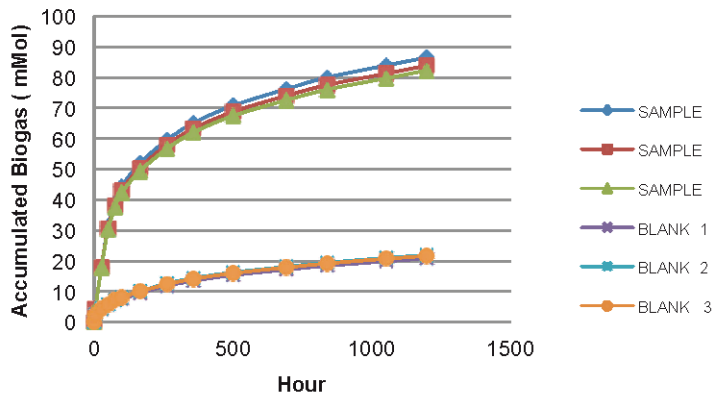
METHANE POTENTIAL TEST (BMP)

The biogas generation was monitored continuously throughout a long digestion period of the primary and secondary sludge mixture (1:1), as shown in Figure 3. The thermophilic and mesophilic digestion were exhibiting similar biogas production curves. The final accumulated biogas production for the sludge samples approximate 88 mMol, whereas the blank approximated 23 mMol. To calculate the biogas production originating from the sludges, the mean value of the gas volume from the inoculum was subtracted from the gas volume produced in each sample, as can be read from Table 4.

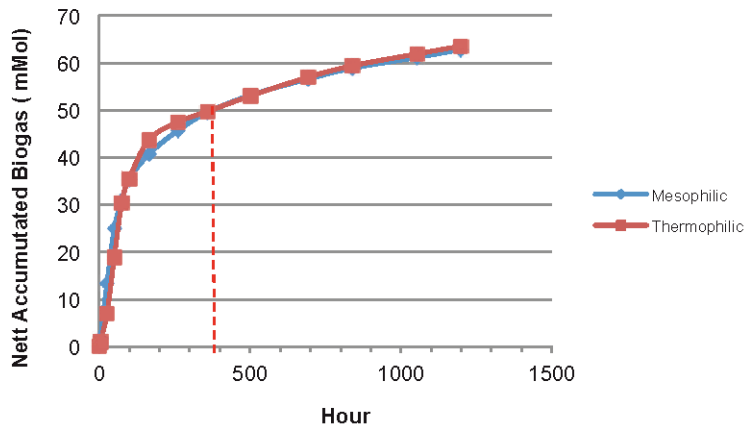
FIGURE 3 BIOGAS ACCUMULATION (MMOL). (A) THERMOPHILIC – 55 C, (B) MESOPHILIC- 37 C AND (C) NETT ACCUMULATED BIOGAS PER BOTTLE (!)



A



B



C

TABLE 4 ACCUMULATED BIOGAS (MMOL GAS); SUBSTRATE DOSED TO THERMOPHILIC SAMPLES IS 3.17 G VS AND IN MESOPHILIC SAMPLES 3.33 G VS

Thermophilic Digestion (55°C)			Mesophilic Digestion (37°C)		
ID	Accumulated Gas (mMol)	Average	ID	Accumulated Gas (mMol)	Average
Sample 1	86.4		Sample 1	86.1	
Sample 2	86.2	88.3 ± 3.5	Sample 2	87.6	88.0 ± 2.2
Sample 3	92.3		Sample 3	90.3	
Blank 1	23.2		Blank 1	22.4	
Blank 2	22.7	22.8 ± 0.4	Blank 2	23.6	23.1 ± 0.6
Blank 3	22.4		Blank 3	23.3	
Accumulated biogas (nett)		65.5	Accumulated biogas (net)		64.9
BMP (mL CH ₄ / gVS _{substrate})		372			n/a
Maximum CH ₄ production rate (mL CH ₄ / gVS _{substrate} / h)		2.4			2.2

Figure 3 shows the average net accumulated biogas (mMol) for the different anaerobic digestion experiments. In this graph, the added amount of substrate, as well as the measured CH₄/CO₂ ratio in the of gas was not taken into account. The CH₄ content of the biogas was measured 6 times during the entire experiment.

The net methane production rates (table 4) were similar under both conditions. The BMP for mesophilic conditions is not accurately available, since the substrate has not been stirred during feeding of the BMP bottles. We suspect that the mesophilic bottles received slightly less biomass due to settling of the sludge flocs, resulting in a slightly lower gas production. Therefore we cannot be totally certain about the exact mesophilic BMP. However, when we analyze the shape of the thermophilic and mesophilic methane production graphs, we can see that they are very similar. If one of the two conditions would result in higher biomethane potentials, this would mean that substrate that is harder to be degraded is only converted in one condition. In that case, the slope of the methane production curves should start deviating during the course of the experiment, which is not the case (figure 3c). Therefore, it can be stated that the BMP of the substrate, degraded with mesophilic and thermophilic sludge is similar.

CONCLUSIONS

The specific methanogenic activity of the thermophilic organisms is almost twice as high as the mesophilic activity, while the hydrolysis rate under both conditions is similar, as determined with the BMP test. From the gas production of the blank tests in the SMA, it can be seen that the thermophilic sludge is highly stabilized, while the mesophilic sludge still produces a large amount of methane, indicating that substrate was still available in this sludge (low stabilization). This could be the reason why the difference in biogas production was observed at the WBD digesters. In the thermophilic the full biomethane potential is used for gas production, while the digested sludge from the mesophilic still contains considerable fractions of substrate at discharge. With a similar loading rate one would observe a higher methane yield thermophilically, simply because more substrate is converted in that reactor. An explanation can be found in the rheology of the sludge, in combination with the high SMA. Because of the higher temperature, the viscosity will be lower, resulting in better mixing and increased mass transfer. Therefore, short circuiting will be less in the thermophilic reactor, leading to higher conversion efficiencies. The impact of different rheology and mixing at full scale could be a subject for further study.

REFERENCES

- Angelidaki I., M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, S. Kalyuzhnyi, P. Jenicek and J. B. van Lier (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Wat.Sci.Technol.* 59(5): 927-934.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science & Bio/Technology*, 3(2), 117–129. doi:10.1007/s11157-004-2502-3
- APHA (Ed.). (1999). *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater. Health laboratory science* (20 th., Vol. 4). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17489283>
- Apul, O. G., & Sanin, F. D. (2010). Ultrasonic pretreatment and subsequent anaerobic digestion under different operational conditions. *Bioresource technology*, 101(23), 8984–92. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.128
- Aquino, S. F., Chernicharo, C. A. L., Soares, H., Takemoto, S. Y., & F., V. R. (2008). Methodologies For Determining The Bioavailability and Biodegradability of Sludges. *Environmental Technology*, 29, 855–862.
- Girault, R., Bridoux, G., Nauleau, F., Poullain, C., Buffet, J., Peu, P., Sadowski, a G., et al. (2012). Anaerobic co-digestion of waste activated sludge and greasy sludge from flotation process: batch versus CSTR experiments to investigate optimal design. *Bioresource technology*, 105, 1–8. doi:10.1016/j.biortech.2011.11.024
- Hansen, T. L., Ejbye, J., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, C., Mosbæk, H., & Christensen, T. H. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management*, 24, 393–400. doi:10.1016/j.wasman.2003.09.009
- Lim, S. J., & Fox, P. (2013). Biochemical methane potential (BMP) test for thickened sludge using anaerobic granular sludge at different inoculum/substrate ratios. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 18(2), 306–312. doi:10.1007/s12257-012-0465-8
- Owen, W. F., Stuckev, D. C., Healv, J. B., Young, L. Y., & Mccagr, P. L. (1979). Bioassay For Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity, 13(5).
- Rodriguez, L. (2011). *Methane Potential of Sewage Sludge to Increase Biogas Production*. Royal Institute of Technology (KTH).
- Sorensen, A. H., & Ahring, B. K. (1993). Measurements of the specific methanogenic activity of anaerobic digester biomass. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 40, 427–431.

