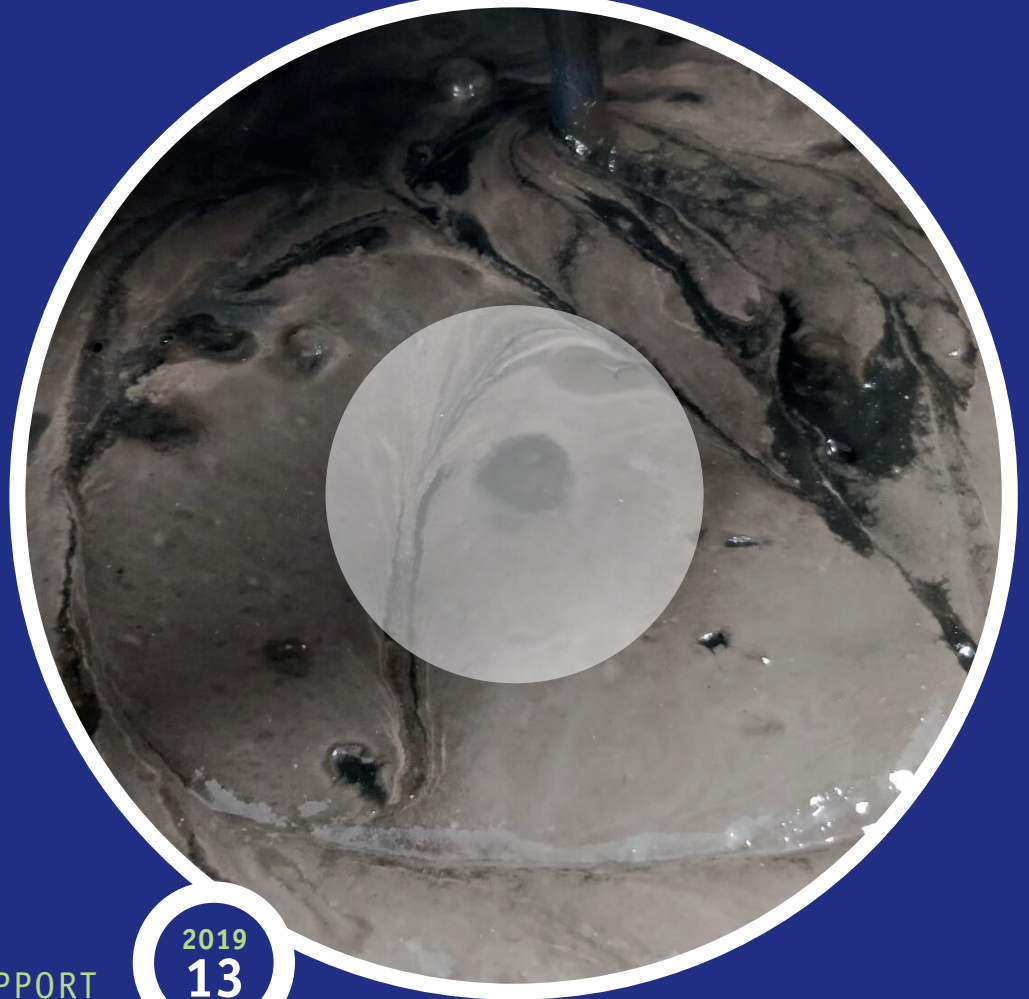


**stowa**

# THERMFILLY, MILDE SECUNDAIR SLIBVOORBEHANDELING



RAPPORT

2019  
13

THERMFILLY, MILDE SECUNDAIR SLIBVOORBEHANDELING

RAPPORT

2019

13

ISBN 978.90.5773.844.9



# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

## PROJECTUITVOERING

Gertjan Euverink, Rijksuniversiteit Groningen  
Axl Hofstede, Witteveen+Bos  
Peter Vast, Water and Energy Solutions  
Anna Veldhoen, Witteveen+Bos  
Paul Weij, Delfluent Services

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Harm Baten, Hoogheemraadschap van Rijnland  
Rogier van Kempen, Delfluent Services  
Otto Kluiving, Waterschap Hunze en Aa's  
Yede van der Kooij, Wetterskip Fryslân  
Dirk Koot, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Willy Poiesz, Waterschap Noorderzijlvest  
Cora Uijterlinde, STOWA  
Marc Vermeulen, Waterschap Rivierenland

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau  
STOWA STOWA 2019-13  
ISBN 978.90.5773.844.9

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.  
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

# TEN GELEIDE

## **OPTIMALISATIE VAN DE SLIBGISTING MET THERMFILLY LIJKT MOGELIJK. MAATWERK BLIJFT NODIG VOOR DE BEOORDELING VAN DE SPECIFIEKE TOEPASSING**

Om de slibgisting te optimaliseren kan Thermfilly een interessante optie zijn voor gisting-installaties die: veel secundair slib vergisten, additionele gistingcapaciteit nodig hebben en/of mengingsproblemen hebben in de gisting. De invloed op de ontwaterbaarheid is niet vastgesteld tijdens het onderzoek. De uiteindelijke baten en andere voordelen van de technologie zullen per locatie anders zijn en dienen daarom per locatie goed onderzocht te worden. Waterschap Noorderzijlvest is voornemens Thermfilly toe te passen op rwzi Garmerwolde.

In het licht van de klimaatverandering staat Nederland voor de grote opgave om in 2050 geheel energie-neutraal te zijn. Ook de waterschappen zullen hieraan een bijdrage leveren en hebben daarnaast hun eigen ambities vastgesteld. Naast energiebesparing is het zelf opwekken van duurzame energie door de waterschappen een belangrijk middel om deze ambities waar te maken. Een van de manieren om dit te doen is het produceren van biogas uit zuiverings-slib. Om de biogasproductie uit zuiverings-slib te verhogen, zijn de laatste decennia diverse technieken ontwikkeld die het slib verder ontsluiten. De Nederlandse waterschappen zoeken echter nog steeds naar alternatieven om efficiëntie te verbeteren en investeringskosten te verlagen.

Een nieuw concept is Thermfilly, waarbij slib wordt voorbehandeld bij lage temperatuur (ca. 45°C) en een korte verblijftijd van enkele uren. Het concept Thermfilly is voortgekomen uit het eerdere STOWA-onderzoek Pasturidestructie (STOWA-werkrapport 2015-W07). Naar aanleiding daarvan is het concept verder onderzocht met aanvullend labonderzoek en businesscases. Dit rapport presenteert daarvan de resultaten. Tijdens dit labonderzoek bleek het effect van Thermfilly zich voornamelijk te uiten in een versnelling van de vergisting en de mogelijkheid om een kortere verblijftijd toe te passen. Geconstateerd is dat er bij een verblijftijd van 12 dagen in de slibgisting met een Thermfilly-behandeling 10% meer biogas geproduceerd kan worden ten opzichte van de referentiereactor bij 20 dagen verblijftijd.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

## AANLEIDING EN DOEL VAN HET ONDERZOEK

Tijdens het STOWA-onderzoek Pasturidestructie (STOWA-werkrapport 2015-W07) is gebleken dat de thermofiele voorbehandeling ('Thermfilly') van spuislib een verbetering van de drogestofafbraak en biogasproductie van 30-40% kan opleveren. Groot voordeel daarbij is dat de benodigde temperatuur laag (ca 50°C) en verblijftijd relatief kort (enkele uren) is, waardoor de investeringskosten beperkt blijven. Omdat deze interessante optie tijdens het onderzoek Pasturidestructie slechts beperkt is onderzocht, is aanvullend onderzoek uitgevoerd, bestaand uit labexperimenten en het opstellen van businesscases.

Het STOWA-onderzoek Thermfilly heeft als doel:

- 1 De technologische aspecten van Thermfilly op labschaal te bepalen. Dit zijn het effect van de Thermfilly-behandeling op de organische drogestofafbraak en biogasproductie bij een specifieke temperatuur en verblijftijd.
- 2 De uitgangspunten voor full-scale toepassing vast te stellen. Dit zijn de optimale temperatuur en verblijftijd en de viscositeit.
- 3 De financiële haalbaarheid vast te stellen in een businesscase op drie schaalgroottes.

## UITKOMSTEN LABONDERZOEK

Middels labonderzoek met behulp van batchgistingen is onderzoek gedaan naar het effect van verschillende behandelingsparameters van de Thermfilly-behandeling op de biogasproductie. In het temperatuurbereik 45°C tot 60°C blijkt een behandeling van secundair slib gedurende ca. vier uur in de eerste plaats een hogere biogasproductiesnelheid op te leveren. Daarnaast is een gemiddelde toename van 10% in biogasproductie gemeten na 20 dagen gisting van secundair slib. Op basis van deze batchexperimenten is vervolgens met continueactoren de praktijksituatie zo goed mogelijk benaderd en onderzocht of de biogasproductie structureel verandert over de tijd bij de Thermfilly-behandeling. Ook hierbij is een 10% hogere biogasproductie gemeten bij een Thermfilly-behandeling van secundair slib ten opzichte van de referentiegisting met onbehandeld secundair slib. Daarnaast bleek bij een kortere verblijftijd een gelijke of hogere biogasproductie mogelijk na Thermfilly voorbehandeling van secundair slib. Hiermee lijkt het voordeel van een Thermfilly-behandeling tweeledig; door de hogere biogasproductiesnelheid kan de verblijftijd in de gisting lager worden zonder dat de biogasproductie en drogestofafbraak afneemt, daarnaast zijn er aanwijzingen dat een 10% hogere biogasproductie haalbaar is. Dit laatste dient met vervolgonderzoek nauwkeuriger vastgesteld te worden.

Voor de opschaling naar een praktijkinstallatie is tevens onderzocht wat het effect is op de viscositeit van secundair slib bij verschillende drogestofgehaltenes wanneer er een Thermfilly-behandeling wordt toegepast, of wanneer er gistingsslib wordt bijgemengd. Hieruit komt naar voren dat de Thermfilly-behandeling de viscositeit verlaagt met 12% bij een gelijke aanvoertemperatuur, terwijl de hogere temperatuur van het slib voor een grotere verlaging zorgt van 50%. Het bijmengen van gistingsslib lijkt vooral de viscositeit te verlagen doordat het drogestofgehalte wordt verlaagd, waardoor dit een effectieve manier lijkt om secundair slib met minder pompenergie door de warmtewisselaar te verpompen.

De gevonden biogasproductie uit secundair slib in de onderzoeken ligt met een toename van 10% lager dan de toename van 40% die in eerste instantie werd verwacht vanuit het eerder uitgevoerde STOWA-onderzoek Pasturi Destructie. Gedurende de batchonderzoeken is naar voren gekomen dat viscositeit en menging een grotere rol spelen bij de biogasopbrengst dan vermoed. Door de lagere viscositeit van behandeld secundair slib is vermoedelijk de biogasopbrengst uitvergroet ten opzichte van onbehandeld secundair slib. Door continu te mengen bij de vervolgonderzoeken is het verschil in biogasproductie kleiner geworden tussen behandeld en onbehandeld secundair slib.

### UITKOMSTEN BUSINESSCASES

Voor verschillende schaalgroottes (slibhoeveelheid overeenkomend met 100.000 i.e., 250.000 i.e. en 750.000 i.e.) zijn business cases opgesteld. Dit is gedaan voor twee fictieve locaties en de rwzi Garmerwolde. Als basis voor de businesscases is een schetsontwerp voor Thermfilly op rwzi Garmerwolde opgesteld. Per schaalgrootte zijn verschillende varianten doorgerekend, waarin is gekeken naar de situatie met en zonder Thermfilly, en met en zonder vergaande indikking van het slib en opvullen van de vrijgekomen gistingsruimte door verwerking van extern slib. De businesscases zijn opgesteld op basis van aannames, omdat de resultaten van het labonderzoek nog niet bekend waren ten tijde van het opstellen van de businesscases. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor de parameters ods-afbraak, investeringskosten, slibeindverwerkingskosten en ontwaterbaarheid.

Uit de businesscases blijkt dat de terugverdiëntijd aanzienlijk verschilt voor de opgestelde varianten. De terugverdiëntijd vastgesteld in de business cases is minder gunstig dan is gesteld in eerder onderzoek naar thermofiele voorbehandeling (STOWA-werkrapport 2015-W07). De voornaamste redenen hiervoor zijn de aangenomen lagere relatieve toename in ods-afbraak (10% in plaats van 40%) en hogere investeringskosten vanwege destijds niet geraamde procesdelen. Hierdoor zijn de baten beperkt en is de investering hoog. Een haalbare business case is echter wel mogelijk.

De volgende factoren zijn van belang voor de uitkomst van de businesscase:

- **Schaalgrootte.** Thermfilly werd gezien als alternatief voor kostenintensieve voorbehandelingstechnieken op kleinere locaties (ca. 100.000 i.e.) met slibvergisting. Op deze schaalgrootte levert Thermfilly echter dermate hoge investeringskosten op, dat deze niet of na een lange periode (ca. 40 jaar) zijn terug te verdienen. Bij de andere schaalgroottes varieert de terugverdiëntijd van 11 (met extern slib) tot 24-60 jaar (zonder extern slib).
- **Locatie.** De uitvoering van de Thermfilly-installatie en daarmee de kosten zijn locatieafhankelijk. Dit geldt ook voor de mogelijke baten, die gerelateerd zijn aan de mogelijkheid meer (extern) slib te vergisten en van de kosten voor eindafzet van het slib. Voor de werkelijke potentie van Thermfilly voor een specifieke locatie is het aan te raden voor de specifieke omstandigheden een schetsontwerp en businesscase op te stellen.
- **Extern slib.** Door ook extern slib te verwerken kan optimaal gebruik worden gemaakt van de verhoogde ods-afbraak die met de Thermfilly-installatie wordt bereikt. Uit de business cases blijkt dat de terugverdiëntijd voor varianten waar ook extern slib wordt verwerkt aanzienlijk korter is dan voor de varianten waar dat niet het geval is.
- **Ods-afbraak.** De aangenomen relatieve toename van de ods-afbraak is 10% op secundair slib. Dit is in lijn met het labonderzoek. Als de ods-afbraak in de praktijk hoger blijkt te zijn, is een positievere businesscase mogelijk.
- **Ontwaterbaarheid.** Er wordt een positief effect van Thermfilly op de ontwaterbaarheid verwacht. Dit is echter nog niet aangetoond en daarom is geen verandering aangenomen

in de businesscases. Als een verbetering mogelijk is, kan door een lagere slibafvoer en/of een lager PE-verbruik meer worden bespaard, waardoor een kortere terugverdientijd mogelijk is.

### **INTEGRALE CONCLUSIE**

Voorafgaand aan het onderzoek werd verwacht dat Thermfilly zich voornamelijk zou uiten in een hogere ods-afbraak en biogasproductie bij een gelijkblijvende verblijftijd (20 dagen) in de slibgisting. Hiervan zijn de businesscases dan ook uitgegaan.

Tijdens het labonderzoek bleek het effect van Thermfilly zich echter voornamelijk te uiten in een versnelling van de vergisting en de mogelijkheid om een kortere verblijftijd toe te passen. Geconstateerd is dat er bij een verblijftijd van 12 dagen in de slibgisting met een Thermfilly-behandeling 10% meer biogas geproduceerd kan worden ten opzichte van de referentiereactor bij 20 dagen verblijftijd. Dit houdt in dat bij deze kortere verblijftijd er zowel relatief als absoluut een hogere biogasopbrengst en drogestofafbraak is vanuit secundair slib, maar dat er hiermee ook kan worden volstaan met een kleiner gistingvolume voor dezelfde hoeveelheid slib. Deze situatie is echter anders dan doorgerekend in de business cases waarin een verblijftijd van 20 dagen is gehanteerd. In specifieke situaties kan de businesscase daardoor positiever uitvallen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij nieuwbouw van gistingvolume waarbij een kleinere tank kan volstaan, overbelaste slibgistingen, slibcentralisatie waarbij uitbreiding van het gistingvolume nodig is, renovatie van meerdere slibgistingstanks waarbij door toepassing van Thermfilly een kleiner volume hoeft te worden gerenoveerd et cetera.

Op basis van de resultaten uit het onderzoek gecombineerd met het schetsontwerp van de praktijkinstallatie en de gevoeligheidsanalyses van de business cases blijkt dat Thermfilly een interessante optie kan zijn voor gistinginstallaties die: veel secundair slib vergisten, additionele gistingcapaciteit nodig hebben, mengingsproblemen hebben in de gisting of een combinatie van deze factoren. Daarnaast zorgt de lage behandeltemperatuur ook voor een relatief eenvoudige installatie waar weinig specialistische kennis voor nodig is. Dit is een voordeel ten opzichte van technieken die werken bij hoge druk en temperatuur. De uiteindelijke baten en andere voordelen van de technologie zullen per locatie anders zijn en dienen daarom per locatie goed onderzocht te worden.

Naast flexibiliteit in de verblijftijd blijkt de invloed van het ontwateringsresultaat een belangrijke factor te zijn op de terugverdientijd. Doordat de invloed van de Thermfilly-behandeling op het ontwateringsresultaat, en eventuele optimalisatie van de PE-dosering, niet is vastgesteld in dit onderzoek kan hier geen uitspraak over gedaan worden.

# 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 onderzoeklijnen 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 aan 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.*



# THERMFILLY, MILDE SECUNDAIR SLIBVOORBEHANDELING

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Aanleiding	1
	1.2 Doel	1
	1.3 Deelvragen	1
	1.4 Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>LABONDERZOEK</b>	<b>3</b>
	2.1 Inleiding	3
	2.2 Doel labonderzoek	3
	2.3 Opzet labonderzoek	3
	2.4 Conclusies achterliggende onderzoeken	4
	2.5 Materiaal en methode continu-gistingen	6
	2.5.1 Monsternamen slib	6
	2.5.2 Continuactoren 1,5 liter schaal	7
	2.6 Resultaten continu gistingen op 1,5 liter-schaal	9
	2.7 Discussie en conclusie	11
<b>3</b>	<b>SCHETSONTWERP RWZI GARMERWOLDE</b>	<b>13</b>
	3.1 Uitgangspunten	13
	3.2 Uitwerking van het proces	14
<b>4</b>	<b>UITGANGSPUNTEN BUSINESSCASE</b>	<b>16</b>
	4.1 Omschrijving locaties	16
	4.2 Uitgangspunten drogestofbalans	17
	4.3 Organische drogestofafbraak en biogasproductie	19
	4.4 Warmtebalans	20
	4.5 Financieel-economische uitgangspunten	21

<b>5</b>	<b>RESULTATEN BUSINESSCASE</b>	<b>22</b>
5.1	Drogestofbalans	22
5.2	Dimensionering reactor	24
5.3	Energiebalans	25
5.4	Bouw- en investeringskosten	27
5.5	Jaarlijkse kosten	28
5.6	Terugverdientijd	29
5.7	Gevoeligheidsanalyse	30
<b>6</b>	<b>DISCUSSIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>33</b>
6.1	Labonderzoek	33
6.2	Businesscase	34
6.3	Integratie tussen labonderzoek en businesscases	36
<b>7</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>37</b>
<b>BIJLAGE(N)</b>		<b>39</b>
BIJLAGE I	PFD THERMFILLY OP RWZI GARMERWOLDE	40
BIJLAGE II	CHEN-HASHIMOTOMODEL	42
BIJLAGE III	DROGESTOFBALANS	43
BIJLAGE IV	WARMTEBALANS	46
BIJLAGE V	FINANCIËLE ANALYSE	48
BIJLAGE VI	ACHTERGRONDEN LABONDERZOEK	50

# 1

## INLEIDING

### 1.1 AANLEIDING

Tijdens het STOWA-onderzoek Pasturidestructie (STOWA-werkrapport 2015-W07) zijn verschillende methoden en combinaties daarvan onderzocht om slib voor te behandelen en daarmee het gistingsresultaat te verbeteren. Tijdens dat onderzoek is gebleken dat de thermofiele voorbehandeling ('Thermfilly') van spuislib een verbetering van de drogestofafbraak en biogasproductie kan opleveren. Groot voordeel daarbij is dat de benodigde temperatuur laag en verblijftijd relatief kort is, waardoor de investeringskosten beperkt blijven. Omdat deze interessante optie tijdens het onderzoek Pasturidestructie slechts beperkt is onderzocht, is besloten tot aanvullend onderzoek, bestaand uit labexperimenten en het opstellen van businesscases. Het onderzoek is erop gericht het Thermfilly-concept verder te onderbouwen vanuit technologisch en financieel oogpunt en de ontwerpuitgangspunten vast te stellen voor een full-scale-installatie. Dit rapport presenteert daarvan de resultaten.

### 1.2 DOEL

Het STOWA-onderzoek Thermfilly heeft als doel:

- 1 De technologische aspecten van Thermfilly op labschaal te bepalen. Dit zijn het effect van de Thermfilly-behandeling op de organische drogestofafbraak en biogasproductie bij een specifieke temperatuur en verblijftijd.
- 2 De uitgangspunten voor full-scale toepassing vast te stellen. Dit zijn de optimale temperatuur en verblijftijd en de viscositeit.
- 3 De financiële haalbaarheid vast te stellen in een businesscase op drie schaalgroottes.

### 1.3 DEELVRAGEN

Hoewel bij aanvang van het onderzoek de intentie was om de resultaten van het labonderzoek te gebruiken voor het uitwerken van de businesscase, bleek dit in de praktijk niet haalbaar. Er waren namelijk niet tijdig voldoende betrouwbare resultaten van het labonderzoek beschikbaar. Daarom is de businesscase onafhankelijk van het labonderzoek opgesteld. Wel zijn eerste resultaten van het labonderzoek gebruikt voor het vaststellen van de verblijftijd en temperatuur.

Voor het onderzoek zijn separaat deelvragen opgesteld voor het onderdeel labonderzoek en voor de businesscase.

**DEELVRAGEN LABONDERZOEK**

- Bij welke temperatuur- verblijftijdscombinatie van het Thermfilly proces wordt de hoogste afbraak of de hoogste afbraaksnelheid van het slib gerealiseerd?
  - Wat is hierbij de biogasproductie/droge stofafbraak/vrij N-gehalte?
- Hoe kan het ingaande secundaire slib het beste verwarmd worden?
  - Is recirculatie van slib nodig om de viscositeit te verlagen in de warmtewisselaar?
    - Verandert de viscositeit van het slib door de Thermfilly-behandeling?
  - Is bijmenging van gistingsslib nodig voor een viscositeitsverlaging?
    - Welke verhouding tussen gistingsslib en ingaand Thermfilly slib is optimaal om de viscositeit voldoende te verlagen?
- Verkenning naar het effect van de Thermfilly behandeling op het ontwateringsresultaat na gisting
  - Kan bij gelijke dosering van flocculant/coagulant hetzelfde ontwateringsresultaat behaald worden?
  - Kan bij veranderde dosering van flocculant/coagulant een beter ontwateringsresultaat behaald worden?

**DEELVRAGEN SCHETSONTWERP EN BUSINESSCASE**

- Hoe ziet het schetsontwerp van full-scale toepassing op rwzi Garmerwolde eruit?
- Wat is de terugverdientijd van full-scale toepassing van Thermfilly in relatie tot conventionele slibgisting zonder voorbehandeling?
- Wat is de gevoeligheid van de terugverdientijd van Thermfilly voor de aspecten organische drogestofafbraak, investeringskosten, slibeindafzetkosten en ontwaterbaarheid?

**1.4 LEESWIJZER**

Dit rapport start met een beschrijving van de continu-experimenten die in december 2018-april 2019 zijn uitgevoerd en de belangrijkste bevindingen uit de achterliggende deelonderzoeken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 het schetsontwerp van een Thermfilly-installatie op rwzi Garmerwolde beschreven. Tezamen met de uitgangspunten in hoofdstuk 4 resulteert dit in een uitgewerkte businesscase in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 trekt vervolgens conclusies over de het labonderzoek, de businesscase en de relatie tussen beide. Hoofdstuk 7 bevat de referenties gehanteerd voor de hoofdstukken en bijlages. De hoofdstukken worden ondersteund door bijlagen. Zo staat in bijlage VI de achtergrondinformatie over het labonderzoek en uitgebreidere resultaten van de deelonderzoeken, waarmee hoofdstuk 2 in context geplaatst kan worden.

# 2

## LABONDERZOEK

### 2.1 INLEIDING

Het huidige labonderzoek is een vervolg op het Pasturi Destructie-project uitgevoerd in 2013/2014 (STOWA2015-W07 [1]). Uit dat onderzoek kwam naar voren dat een verhoogde biogasproductie bij secundair slib verwacht kan worden wanneer dit voorbehandeld wordt bij een temperatuur van 55 °C gedurende 4 uur. Voordat deze behandelingsmethode op grote schaal geïmplementeerd kan worden is het nodig om deze verder te onderzoeken op continu-schaal. Enkele opschalingsvraagstukken zullen alleen eenduidig beantwoord kunnen worden met behulp van een pilot- of full-scale continu installatie. Ter ondersteuning en dimensionering van de continu installatie worden aanvullende labproeven uitgevoerd om de optimale temperatuur- en verblijftijdscombinatie vast te stellen. Daarnaast worden met deze proeven de verwachte effecten op het gistingproces vastgesteld om zo met een businesscase de meerwaarde van de voorbehandeling te kunnen inschatten.

### 2.2 DOEL LABONDERZOEK

Het doel van het laboratoriumonderzoek is om de gevonden toegenomen biogasproductie uit het Pasturi Destructie-onderzoek (STOWA2015-W07 [1]) te verifiëren en de optimale behandelingstijd en -temperatuur vast te stellen voor een optimale biogasopbrengst. Daarnaast is gekeken naar mogelijke veranderingen in de viscositeit van het behandelde slib en de uiteindelijke effecten op de ontwateringsresultaten. De uitkomsten van het laboratoriumonderzoek dienen tevens als input voor het uiteindelijke full-scale ontwerp, waarbij de deelvragen die beantwoord dienen te worden zijn beschreven in paragraaf 1.3.

### 2.3 OPZET LABONDERZOEK

Tijdens het labonderzoek zijn er zowel experimenten op batchschaal als continu-schaal uitgevoerd. Net als bij het Pasturi Destructie-onderzoek hebben er twee continu-gistingen op labschaal gedraaid gedurende de proeven. De continu-gistingen zijn gevoed met secundair slib van rwzi Garmerwolde met een drogestofgehalte van 6% DS. De continu experimenten zijn uitgevoerd op 1,5L schaal en 40L schaal.

De continu-gistingen hebben de volgende functies:

- **Uitvoeren duurproef biogasproductie:** Wanneer de voorbehandelingsmethode succesvol is, zal dit ook moeten blijken uit het verschil in de biogasproductie van de beide continu-gistingen. De gasproductie van beide gistingen zal hierom bij worden gehouden zodat een relatieve toe- of afname duidelijk zichtbaar moet zijn.
- **Uitvoeren duurproef adaptatie:** Een verandering in de voeding van de gisting kan leiden tot een tijdelijke toe- of afname van de biogasproductie. Deze toe- of afname herstelt zich doorgaans na verloop van tijd zodra de bacteriën of de samenstelling van de bacteriepopulaties zich hebben aangepast aan de nieuwe voeding. Daarnaast kan de biogasproductie

juist verder toenemen vanwege deze adaptatie. Om deze redenen is het van belang gedurende een langere periode de biogasproductie bij te houden voor beide varianten. Voordat adaptatie zichtbaar wordt is het noodzakelijk dat de inhoud van de reactoren volledig ververst is. Na twee slibverblijftijden is de kans relatief groot dat al het materiaal ververst is.

- **Uitvoeren duurproef verdringing:** Naast een positieve adaptatie van de aanwezige bacterieculturen is het ook mogelijk dat door de temperatuurbehandeling ongewenste bacteriegroei gestimuleerd wordt. Als de omstandigheden in de vergister gunstig genoeg zijn kan deze cultuur zich vermeerderen ten koste van de biogasproducerende bacteriën. Dit zal uiteindelijk tot een lagere biogasopbrengst leiden.
- **Leveren gistingsslib voor ontwateringstesten:** De hoeveelheid gistingsslib van de batchreactoren is onvoldoende om ontwateringsproeven mee te doen. Door de hogere gistingsslib-productie leveren de continue vergisters voldoende materiaal om ontwateringsproeven mee uit te voeren. Hierbij kan gekeken worden naar een eventuele verbetering of verslechtering van het ontwateringsresultaat van behandeld slib, bij gelijke of veranderende dosering van chemicaliën. Met het gistingsslib van de 40L-reactoren zijn er ontwateringsproeven gedaan. Doordat er echter veel verstoringen zijn opgetreden bij de 40L-reactoren wordt het gistingsslib niet als representatief beschouwd, en worden de resultaten alleen kwalitatief behandeld in bijlage VI.

Zowel de batchexperimenten als de continue experimenten op 40L schaal zijn gebruikt om verbeteringen door te voeren die op 1,5L schaal verder onderzocht zijn. De batchexperimenten zijn gebruikt om te bepalen welke combinatie van temperatuur en verblijftijd gehanteerd moet worden voor de continue reactor. Vervolgens is op 40L schaal onderzocht hoe het slib het beste behandeld en aan de reactoren gevoed kan worden.

De resultaten van de continue experimenten op 1,5L schaal worden in dit hoofdstuk beschreven samen met de belangrijkste resultaten van de achterliggende onderzoeken. De nadere beschrijving van de achterliggende onderzoeken en de overige resultaten worden verder beschreven in hoofdstuk 7.

## 2.4 CONCLUSIES ACHTERLIGGENDE ONDERZOEKEN

De belangrijkste conclusies uit de achterliggende onderzoeken beschreven in hoofdstuk 7 worden hier puntsgewijs samengevat. Voor een nadere toelichting en onderbouwing wordt de lezer verwezen naar het desbetreffende hoofdstuk.

### METINGEN VAN DROGESTOFABRAAK, BIOGASOPBRENGST EN CZV- EN STIKSTOFGEHALTE BIJ BATCHGISTINGEN

Met behulp van herhaalde triplo-metingen is getoetst of de nauwkeurigheid van bestaande standaardmetingen voor het drogestof, CZV en stikstofgehalte van slib uit batchgistingen hoog genoeg is om een significante toename te kunnen meten. De spreiding tussen de metingen ligt om en nabij de 10% wanneer er uit hetzelfde materiaal twee unieke monsters worden genomen bij gestandaardiseerde meetmethoden voor drogestof, CZV- en stikstofbepaling, zoals opgenomen in technische richtlijnen en analysekits van Hach-Lange. Doordat substraat uit een batchgisting altijd is verdund met gistingsslib zal een toename van 20% van de genoemde parameters niet nauwkeurig vastgesteld en vergeleken kunnen worden tussen twee batches. Ditzelfde geldt voor een toename in biogasproductie tussen batchgistingen, waarbij uit extern onderzoek in de literatuur een natuurlijke spreiding in biomassasubstraten is gevonden van gemiddeld 10%. Voor zowel de analyse van het gistingsslib als de biogaspro-

ductie geldt dat bij geringe verandering in deze parameters bestaande meetmethoden onvoldoende nauwkeurigheid bieden om conclusies uit te trekken. Bij meerdere unieke metingen en/of experimenten met herhaaldelijk vergelijkbaar resultaat neemt de nauwkeurigheid toe, evenals bij een continuexperiment waarbij gedurende meerdere dagen een effect consequent wordt waargenomen. Voor dit onderzoek betekent dit dat bij het vergelijken van batchresultaten de toename in biogasproductie boven de 10% moet liggen voordat er sprake is van een duidelijke verbetering. Wanneer er voldoende<sup>1</sup> unieke herhaalexperimenten zijn uitgevoerd om aan te kunnen tonen hoe groot de spreiding in de resultaten kan zijn, en wat de gemiddelde toename is, kan er met een lagere toename in de biogasopbrengst sprake zijn van een verbetering. Bij een continugisting kan er gekeken worden naar de herhaaldelijke verbetering van uur tot uur en dag tot dag doordat er continu gevoed wordt.

### EFFECT VAN THERMFILLY-BEHANDELING OP BIOGASOPBRENGST EN -PRODUCTIESNELHEID

Middels batchgistingen is onderzoek gedaan naar het effect van temperatuur- en verblijftijdscombinaties op de maximale biogasopbrengst en de snelheid van biogasproductie over de tijd. Hierbij is naar voren gekomen dat er een optimum in de behandeltime ligt bij circa vier uur voor het onderzochte temperatuurbereik 45 °C tot 60 °C. Bij deze temperaturen is er middels twee types batchgistingen een toename van  $\approx 10\%$  biogasopbrengst gemeten. Gezien de opmerkingen in de vorige paragraaf zijn er echter onvoldoende herhaalexperimenten uitgevoerd om hier een sluitende conclusie aan te verbinden. In het algemeen heeft een hogere behandeltemperatuur wel een versterkt effect op de (snelheid van) biogasproductie, echter dit effect neemt af in de loop van de gistingstijd waardoor de verschillen tussen de behandeltemperaturen uiteindelijk klein zijn. Het grootste effect van de Thermfilly-behandeling blijkt in de experimenten vooral aan het begin van de gisting, waarin er een sterk verhoogde biogasproductie zichtbaar is ten opzichte van onbehandeld slib. Deze resultaten suggereren dat het voordeel van deze thermische behandeling het best tot zijn recht komt in combinatie met een vermindering van de hydraulische verblijftijd in de gisting met 3 tot 4 dagen<sup>2</sup>, waardoor uiteindelijk in dezelfde gisting meer gistingcapaciteit gecreëerd wordt.

### METHODEN OM VISCOSITEIT VAN SECUNDAIR SLIB TE VERLAGEN

Met behulp van een Rapid ViscoAnalyzer is gekeken naar manieren om de viscositeit van secundair slib te verlagen, zodat er in de praktijkinstallatie met lagere pompenergie c.q. met een lager drukverlies geopereerd kan worden. Het bijmengen van gistingsslib blijkt de viscositeit hoofdzakelijk te verlagen door een verlaging van het drogestofgehalte, waarbij het verdunnen van 8,7% d.s. naar 7,9% d.s. een afname in de viscositeit van 26% (van 2.872 mPa.s naar 2.125 mPa.s) laat zien wat vergelijkbaar is met slib wat met leidingwater is verdund tot hetzelfde drogestofgehalte. De verhoging van de temperatuur van het slib heeft daarnaast een kleiner viscositeitsverlagend effect. Het effect van de Thermfilly behandeling op de viscositeit is weergegeven in onderstaande tabel.

TABEL 2.1 EFFECT VAN DE THERMFILLY BEHANDELING OP DE VISCOSITEIT VAN SECUNDAIR SLIB

	Viscositeit bij 15 °C (mPa.s)	Viscositeit bij behandeltemperatuur (mPa.s)
Onbehandeld secundair slib	2.872	2.872
Thermfilly, 55°C, 5 uur	2.572	1.443
Thermfilly, 55°C, 4 uur	2.457	1.340

- 1 Voldoende is hierin een subjectief begrip. Wil men bijvoorbeeld met 95% zekerheid stellen dat het waargenomen effect niet willekeurig is, zal er bij 19 van de 20 experimenten een toename van 10% geconstateerd moeten worden.
- 2 Een HRT van respectievelijk 17 of 16 dagen t.o.v. een HRT van 20 dagen

Uit de resultaten in Tabel 2.1 blijkt dat de Thermfilly behandeling de viscositeit van het slib verlaagt met 12% tot 14% wanneer dit op 15 °C wordt gemeten. Deze verlaging is hoger bij de bedrijfstemperatuur met 50% tot 53% afname ten opzichte van onbehandeld slib bij 15 °C.

## 2.5 MATERIAAL EN METHODE CONTINU-GISTINGEN

### 2.5.1 MONSTERNAME SLIB

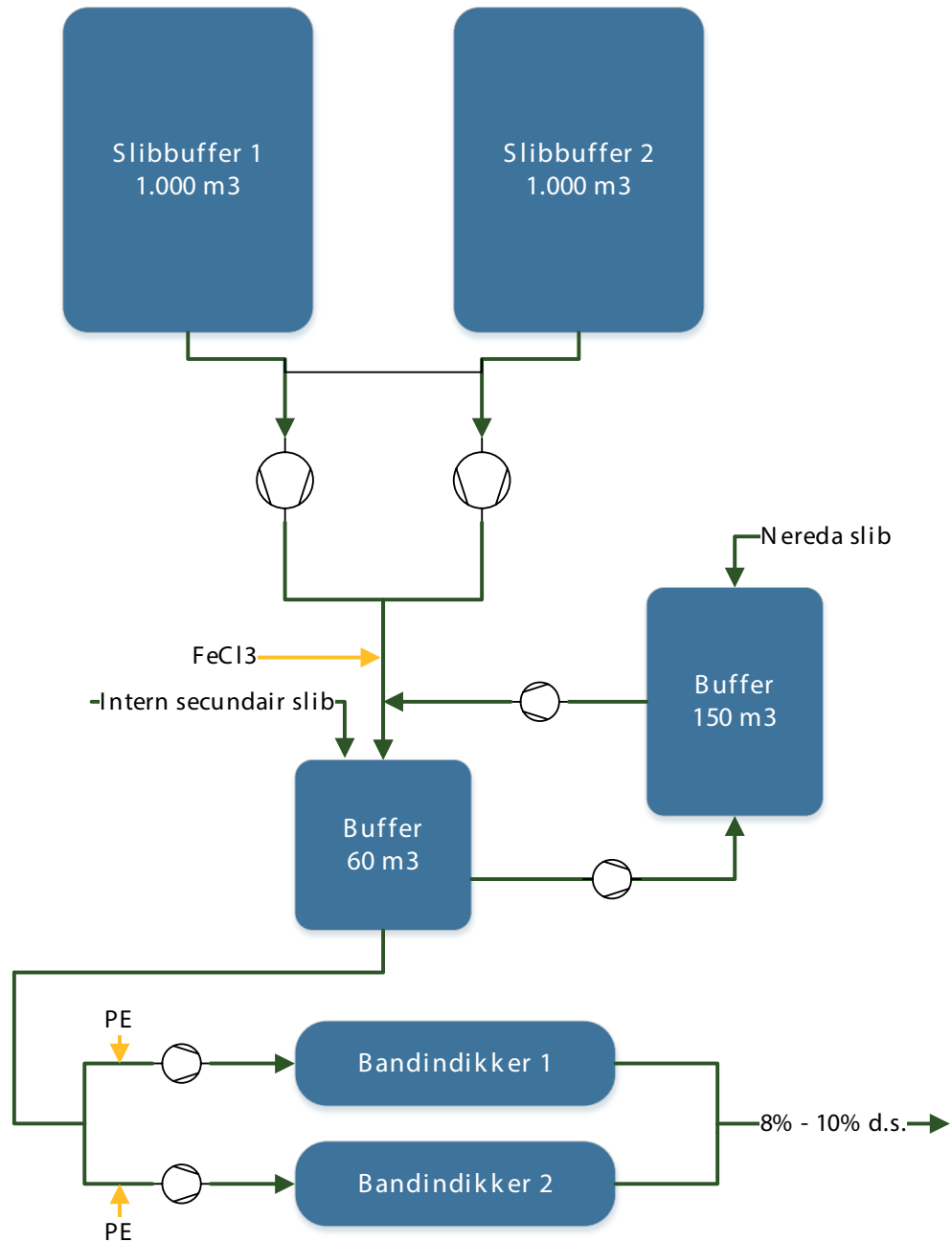
In het Pasturi-onderzoek is slib gebruikt van rwzi Garmerwolde afkomstig van de bandindikers, zie Figuur 2.1. Dit is doorgaans een mengsel van intern en extern geproduceerd secundair slib van verschillende locaties, intern geproduceerd Nereda slib en een kleine primair slibstroom uit Delfzijl. Deze laatstgenoemde slibstroom heeft in het Pasturi-onderzoek geleid tot een discussie over de invloed op de uiteindelijke biogasproductie van de labproeven. Om deze discussie in het Thermfilly-onderzoek te voorkomen is er gestuurd op een slibmonstername zonder de aanwezigheid van primair slib. Dit is te realiseren door het primair slib slechts toe te voegen aan één van de twee slibbuffers uit Figuur 2.1, en het slib voor het labonderzoek te onttrekken na de bandindikker die is gekoppeld aan de andere slibbuffer..

Dit secundair slib is bij rwzi Garmerwolde behandeld met  $\text{FeCl}_3$  en PE en ingedikt tot 8 - 10% droge stof, zoals het ook gevoed wordt aan de vergister van rwzi Garmerwolde. Hierdoor wordt verwacht dat de proeven op labschaal voldoende representatief zijn voor de situatie van rwzi Garmerwolde, en door de afwezigheid van primair slib ook een goede benadering zullen geven voor andere gistingsinstallaties. Voor de 40-liter schaal experimenten is er wekelijks nieuw secundair slib gehaald bij rwzi Garmerwolde waarna dit op dezelfde dag is verwerkt en in het voorraadvat is geplaatst om continu aan de reactor gevoed te worden. Het secundaire slib voor de 1,5-liter experimenten is maandelijks opgehaald en tussentijds opgeslagen in de koude kamer bij de Rijksuniversiteit Groningen (4 °C) alvorens het continu te voeden aan de reactoren.



FIGUUR 2.1

SLIBTOEVOER GISTING RWZI GARMERWOLDE



### 2.5.2 CONTINUREACTOREN 1,5 LITER SCHAAL

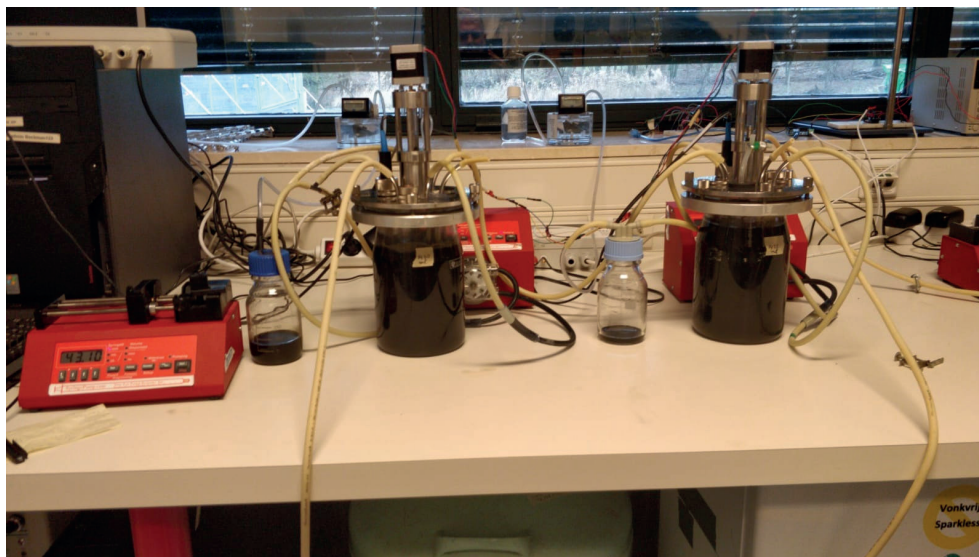
De continu-reactoren, leidingen en pompmechanismen zijn gedimensioneerd om het secundaire slib te vergisten met een hydraulische verblijftijd (HRT) van 20 dagen. Hiervoor wordt continu slib gedoseerd van 6% DS en wordt gistingsslib afgevoerd. De reactor dient rustig gemengd te worden om te zorgen voor een goede verdeling van droge stof in de reactor. De pH en het zuurstofgehalte worden continu gemeten met behulp van continue pH- en redoxmetingen van Consort. Deze metingen dienen puur ter controle van de gisting, hier wordt verder niet op gestuurd.

Het geproduceerde biogas wordt via de bovenkant van de reactor afgevoerd en gemeten via een MilliGasCounter (MGC) van Ritter, die gevuld is met een HCl-oplossing om te zorgen dat er geen CO<sub>2</sub> verloren kan gaan en al het geproduceerde biogas gemeten wordt. De MGCs

zijn vanuit de leverancier nauwkeurig gekalibreerd. Het gehele systeem is gekalibreerd met behulp van metingen met onbehandeld slib in beide reactoren. De data van de gastellers wordt digitaal opgeslagen in een database zodat de gasproductie in de tijd gevolgd kan worden. Met behulp van een analog display op de gasmeter is bij iedere verversing van de voeding de gasproductie vergeleken met de database.

Door middel van een verwarmingsspiraal en waterbad worden de reactoren op een temperatuur van 37 °C gehouden. De reactoren zijn identiek uitgevoerd qua volume, aansluitingen en randapparatuur zoals te zien in Figuur 2.2.

FIGUUR 2.2 OPSTELLING CONTINU-GISTINGEN OP 1,5L SCHAAL

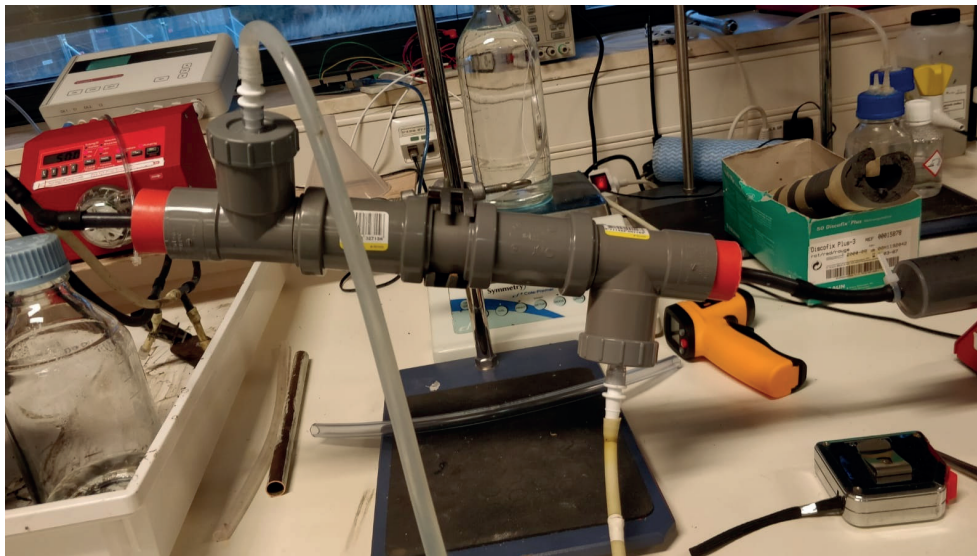


Het voedingsmateriaal wordt middels een syringe-pomp gevoed aan de reactoren vanuit een spuit van 120 ml, met een snelheid van 3 – 5 ml/uur afhankelijk van de gekozen hydraulische verblijftijd. Om de menging in de reactor goed te krijgen wordt er gistingsslib uit de reactor gepompt en samen met het verse materiaal teruggevoerd naar de reactor. Het geproduceerde gas wordt samen met het gistingsslib uit de reactor gedruwd door overdruk en opgevangen in een aparte fles waar gas en vloeistof gescheiden worden. Deze fles wordt na geleegd wanneer een nieuwe spuit met voeding wordt geplaatst.

Voor de Thermfilly reactor wordt het voedingsmateriaal continu voorbehandeld in de opstelling zoals te zien in Figuur 2.3. Met behulp van een watermantel wordt het slib op temperatuur gebracht en gehouden over de gewenste lengte, waarbij de lengte van de mantel de uiteindelijke behandelingsduur bepaalt.

FIGUUR 2.3

THERMFILLY BEHANDELING IN DE CONTINUOPSTELLING

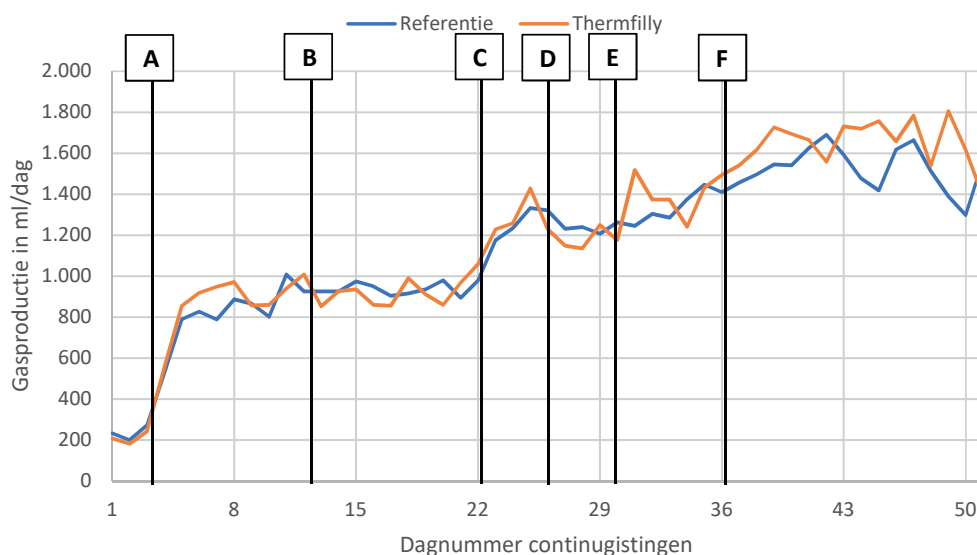


## 2.6 RESULTATEN CONTINU GISTINGEN OP 1,5 LITER-SCHAAL

De continu reactoren hebben gedraaid vanaf december 2018 tot maart 2019, waarbij is opgestart met gistingsslib van rwzi Garmerwolde. Beide reactoren zijn gevoed met secundair slib van de bandindickers wat verdund is tot 6% DS met leidingwater. De eerste weken zijn gebruikt om het systeem te kalibreren en aanpassingen te doen aan de randapparatuur. Na de kalibratie is de voeding gedurende een week stilgezet voordat er met een stabiele HRT van 20 dagen gevoed is. De resultaten staan weergegeven in Figuur 2.4 waarbij relevante gebeurtenissen aangegeven worden met de letters A t/m F. De verklaring van de indicaties staat in Tabel 1.

FIGUUR 2.4

GASPRODUCTIE CONTINU-REACTOREN IN MILLILITERS PER DAG



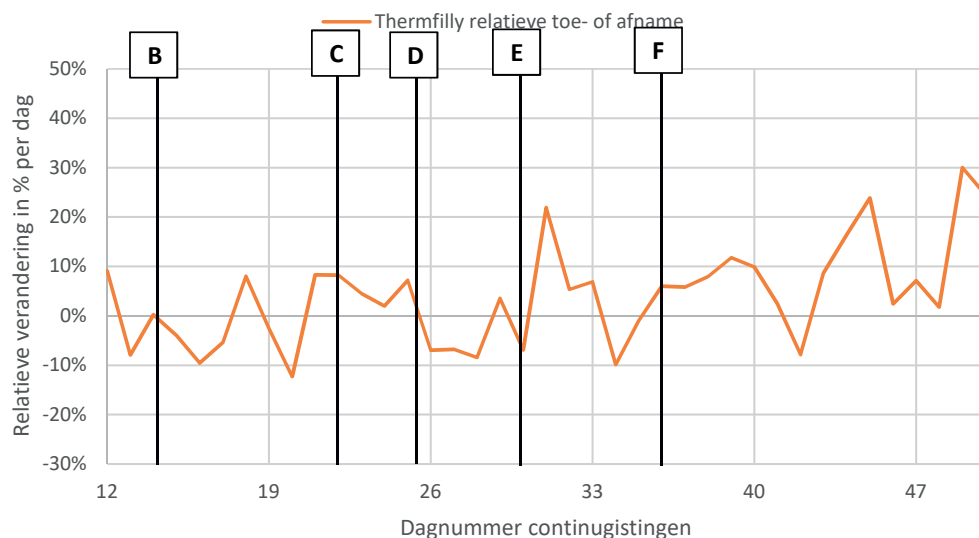
TABEL 2.2 VERKLARING INDICATIES CONTINU-GISTINGEN

Letter	Gebeurtenis – Thermfilly reactor	Gebeurtenis – Referentie reactor
A	Start voeding, onbehandeld slib, 20 dagen HRT	Start voeding, onbehandeld slib, 20 dagen HRT
B	Start Thermfilly behandeling, 4 uur bij 50°C	Geen verandering
C	15 dagen HRT, Thermfilly behandeling 2,5 uur bij 50°C	15 dagen HRT
D	15 dagen HRT, Thermfilly behandeling 4 uur bij 50°C	15 dagen HRT
E	Blokkade gasuitvoer Thermfilly	Geen verandering
F	12 dagen HRT, Thermfilly behandeling 5 uur bij 45°C	12 dagen HRT

In Figuur 2.4 is duidelijk te zien hoe de reactoren reageren op grote veranderingen in bijvoorbeeld de voedingsnelheid/HRT (punten C en F). Tevens is te zien dat vanaf de start van de Thermfilly-behandeling de gasproductie zowel uitschieters naar boven als naar beneden toont ten opzichte van de referentie-gisting.

De gasproductie van de Thermfilly reactor is in Figuur 2.5 uitgedrukt als relatief verschil ten opzichte van de referentie-reactor. Hierbij is iedere toename in gasproductie per uur uitgedrukt als positief percentage, en iedere afname als negatief percentage.

FIGUUR 2.5 RELATIEVE TOE- OF AFNAME IN BIOGASPRODUCTIE PER DAG VAN DE THERMFILLY-BEHANDELING, TEN OPZICHT VAN DE ONBEHANDELDE REFERENTIE-REACTOR



Ook in Figuur 2.5 zijn grote toe- en afnames te zien van de Thermfilly-reactor ten opzichte van de referentie-reactor. Binnen het tijdvak B tot C heeft dit er toe geleid dat met alle pieken en dalen de gemiddelde verbetering van de Thermfilly behandeling uitkomt op circa 1%, met uitschieters van  $\pm 10\%$ . Vanaf dag 20 tot aan dag 22 (punt C) ligt het gemiddelde op 3,4%.

Vanaf punt C neemt de relatieve extra gasproductie af totdat de behandeltijd op punt D weer hersteld is naar 4 uur door een aanpassing aan de watermantel. De kortere behandelingstijd van de Thermfilly-behandeling tussen punt C en D heeft vermoedelijk geleid tot een verminderd effect op de biogasproductie. De gasproductie herstelt zich na de ontstopping van de gasuitstroom van de Thermfilly reactor bij punt E waarna de relatieve toename schommelt tussen de -10% tot 20% tot aan punt F, met een gemiddelde toename van 3,1%.

Op punt F is de Thermfilly behandeling aangepast naar een behandeltijd van 5 uur bij 45 °C en is de HRT verlaagd naar 12 dagen. Deze voeding is gedurende 14 dagen constant gevoed totdat het experiment stilgelegd is door een losgeraakte slang. Gedurende deze periode is

er een uitschieter naar beneden van -8% en een uitschieter naar boven van 30%. Gemiddeld gedurende deze periode is er een positief effect waarneembaar van de Thermfilly behandeling, met een toename van 9,8% in biogasproductie ten opzichte van de referentie. In de laatste 8 dagen neemt dit verschil zelfs verder toe naar een toename van 13,7%, met een gemiddelde dagelijkse biogasproductie van 1.701 ml/dag voor de Thermfilly-reactor tegenover 1.496 ml/dag voor de referentiereactor. Dit verschil wordt verder vergeleken in onderstaande tabel, waaruit blijkt dat de verkorting in verblijftijd naar 12 dagen HRT van de referentiereactor een (iets) lagere biogasproductie per gram organische drogestof oplevert dan bij 20 dagen HRT, terwijl in de Thermfilly-reactor er nog steeds een hogere gasproductie gemeten wordt van 10,1%.

TABEL 2.3 VERGELIJKING GASOPBRENGST VAN DE REACTOREN IN ML/DAG EN ML/G ODS GEVOED

Reactor	HRT	Gasproductie	
	(dagen)	(ml/dag)	(ml/g oDS)
Referentie <sup>3</sup>	20	925	286
Referentie	12	1.496	277
Thermfilly	12	1.701	315

Opvallend na punt B in de grafieken is dat twee dagen na de start van de Thermfilly-behandeling er eerst een dip in de gasproductie optreedt, gevolgd door een piek. Deze zelfde vertraging is zichtbaar na punt D wanneer de behandeltijd van de Thermfilly-behandeling verhoogd wordt van 2,5 uur naar 4 uur. Na punt F is dit effect niet duidelijk waargenomen kort na verandering van de voeding.

Door een lekkage bij de Thermfilly reactor aan het eind van de experimentenreeks was er te weinig slib beschikbaar voor een betrouwbare analyse van het gistingsslib, waardoor deze niet uitgevoerd is.

## 2.7 DISCUSSIE EN CONCLUSIE

De eerste periode tot aan het punt B laat zien dat beide reactoren gelijk reageren op veranderingen in de voeding en dat deze een vergelijkbare gasproductie laten zien. Na de introductie van de Thermfilly-behandeling is er een verandering te zien in de gasproductie per uur vanaf punt B. Deze houdt echter niet structureel stand en door pieken en dalen in de gasproductie valt het gemiddelde resultaat lager uit dan verwacht op basis van de batchgistingen. Dit kan meerdere oorzaken hebben. Een eerste mogelijke oorzaak is een adaptatieperiode van de reactor aan de nieuwe behandelde voeding, waardoor er een vertraagd effect optreedt in de gasproductie van de Thermfilly-behandeling. Ditzelfde vertraagde effect kan echter ook optreden doordat er nog niet voldoende behandelde voeding in de reactor aanwezig is om een significante toename te kunnen meten. Vanaf dag 20 tot aan dag 22 (punt C) lijkt de gemiddelde toename in de gasproductie namelijk hoger uit te komen. Dit tijdvak is echter te kort om hier sluitende conclusies aan te verbinden.

Een tweede mogelijke oorzaak is dat er gekozen is voor een te lange verblijftijd in de reactor. Op basis van de eerder uitgevoerde batch- en continugistingen, waarvan de resultaten te vinden zijn in paragraaf 7.3, is de verwachting dat het effect van de Thermfilly-behandeling vooral te merken moet zijn als een versnelling van de gasproductie, en in mindere mate een absoluut hogere gasproductie. Hierdoor zal het effect van de Thermfilly-behandeling op het gistingresultaat bij een relatief te hoge hydraulische verblijftijd (HRT) uiteindelijk afnemen.

<sup>3</sup> De gasopbrengst van de referentie is genomen op punt B, voordat de Thermfilly-behandeling begon. Deze gasopbrengst is op dat moment gelijk voor beide reactoren

Om deze reden is vanaf punt C de voedingssnelheid verhoogd, om uit te komen op een HRT van 15 dagen. Hierdoor wordt er per tijdseenheid meer gevoed aan de reactoren, waardoor de verblijftijd in de voorbehandeling terugliep naar 2,5 uur. Vanaf punt D is de watermantel van de Thermfilly-voorbehandeling verlengd, zodat het slib weer gedurende 4 uur behandeld werd. Hierbij is, zeker vanaf punt E, een toename in de gasproductie gemeten. Dit doet vermoeden dat het effect van de Thermfilly-behandeling het grootst is bij lagere verblijftijden in de reactor en zou bevestigen dat de Thermfilly-behandeling vooral versnellend werkt op de gasproductie. Om dit vermoeden te bevestigen is het noodzakelijk om de gisting langer te laten lopen om te kijken of dit effect aanhoudt.

Een derde mogelijke oorzaak van een afwijking kan veroorzaakt worden door het verschil in de behandelingsmethode van het slib. Voor de batchreactoren en de continu-reactoren op 40L-schaal is het slib telkens batchgewijs behandeld, teruggekoeld tot 6 °C en vervolgens doorgaans een dag later gevoed aan de reactoren. Dit kan onbedoelde neveneffecten hebben gegeven aan het slib, doordat er nog na-effecten van de behandeling hebben opgetreden. Echter, de inzakking in de relatieve gasproductie van punt C tot E en de stijging in de gasproductie vanaf punt E geven aan dat de temperatuurbehandeling een merkbaar effect heeft op de gasproductie.

Een laatste mogelijkheid die een afwijking kan veroorzaken is een kleine gaslekkage in de Thermfilly reactor. Beide reactoren zijn na de continu-experimenten gebruikt om enkele batch-experimenten uit te voeren, waarbij naar voren kwam dat de Thermfilly reactor een klein lek had ontwikkeld bij de gasuitvoer van 2-4 ml biogas per uur. Het is echter onmogelijk om vast te stellen of dit lek aanwezig was tijdens bovenstaande continu-experimenten, maar hierdoor kan de gasopbrengst enkele procentpunten lager uit zijn gevallen.

Op basis van de gehele geobserveerde periode is te zien dat de grootste verbetering in de gasproductie van een Thermfilly-behandeling te halen valt bij een verkorting van de verblijftijd in de reactor. Vanaf punt F is de verblijftijd verkort naar een HRT van 12 dagen bij een behandeling van 45 °C gedurende 5 uur. Hierbij wordt over een periode van 14 dagen een gemiddelde toename in biogasproductie gemeten van 9,8% ten opzichte van de referentie. In tegenstelling tot bij de batchexperimenten is er continu gevoed, waardoor de natuurlijke spreiding in biogasopbrengst vanuit het materiaal per saldo uitgemiddeld wordt. Hierdoor is een herhaaldelijk gemeten toename in biogasproductie bij de continugisting statistisch significanter dan bij een batchgisting, en geeft de gemiddelde toename van 9,8% in biogasproductie over de periode hiermee een betere verwachting voor de praktijksituatie aan dan bij de batchgisting. Dit komt tevens overeen met de toename die in de batchexperimenten is gemeten na 12 dagen in de gisting bij deze behandelingsvariant. Op basis van modelering van de batchresultaten zou er namelijk een toename in biogasproductie verwacht worden van 13,1% bij een HRT van 12 dagen voor Thermfilly-behandeld slib ten opzichte van de referentie, wat neerkomt op een toename van 10% ten opzichte van onbehandeld slib bij een verblijftijd van 20 dagen HRT. Dit beeld komt bij de continugisting ook naar voren in de laatste 7 dagen van de geobserveerde periode, waarbij de gemiddelde gasopbrengst voor de Thermfilly-reactor toeneemt tot gemiddeld 13,7%. Deze stijging in het gemiddelde doet tevens vermoeden dat de Thermfilly-gisting nog niet op zijn optimum is gekomen en dat een langere periode dan 14 dagen nodig is om dit vast te stellen. Door een verstoring aan de reactor is dat in dit experiment niet gelukt, evenals de metingen aan het gistingsslib m.b.t. drogestof-, CZV- en stikstofgehalte.

# 3

## SCHETSONTWERP RWZI GARMERWOLDE

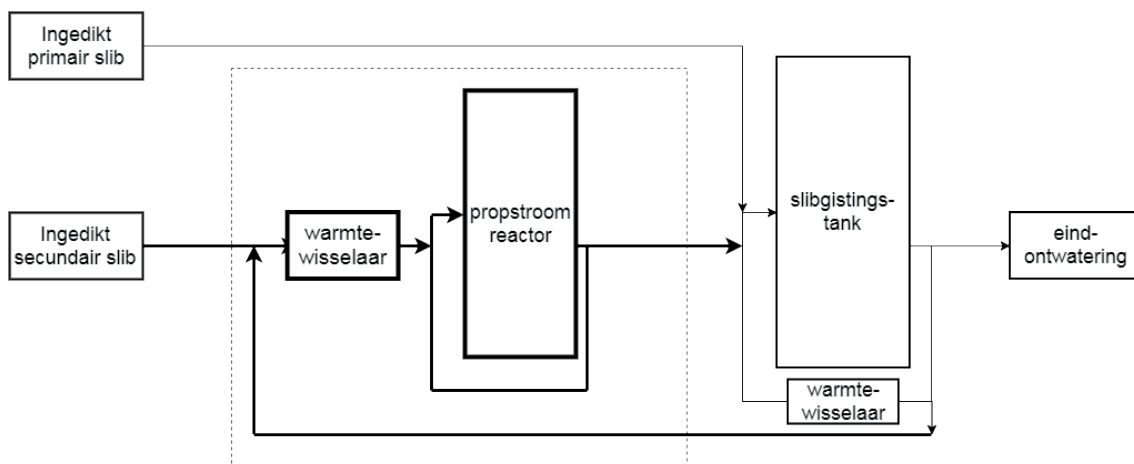
Dit hoofdstuk licht het schetsontwerp van de Thermfilly-installatie toe. Voor het opzetten van het schetsontwerp is rwzi Garmerwolde gebruikt als referentie. In paragraaf 3.1 zijn de uitgangspunten toegelicht die zijn gebruikt in het opstellen van het schetsontwerp van de Thermfilly-installatie. In paragraaf 3.2 zijn de verschillende aanwezige procesonderdelen nader toegelicht.

### 3.1 UITGANGSPUNTEN

Om de investeringskosten te ramen en om de warmtebalans op te kunnen stellen is de Thermfilly-installatie gedimensioneerd. Willy Poiesz (Waterschap Noorderzijlvest) is de bedenker van Thermfilly. Waterschap Noorderzijlvest overweegt dit proces te gaan toepassen op de rwzi Garmerwolde. De dimensionering is daarom opgesteld voor deze rwzi. De dimensionering is opgesteld voor de bestaande rwzi om zo goed mogelijk inzicht te krijgen in de mogelijkheden en grenzen van inpassing en om te weten met welke praktijkomstandigheden rekening gehouden moet worden. De dimensionering dient als indicatie van hoe het proces eruit zou kunnen zien en als voorbeeld voor andere locaties. Voor iedere locatie zal bij daadwerkelijke toepassing een ontwerp op maat gemaakt moeten worden.

In deze paragraaf zijn de uitgangspunten voor rwzi Garmerwolde samengevat. In afbeelding 3.1 is een schematische weergave gegeven van de Thermfilly-installatie in de sliblijn. De stippe lijn toont de systeemgrens van de Thermfilly-installatie. Op rwzi Garmerwolde bestaat het onderdeel 'slibgistingstank' uit twee tanks die in serie zijn geschakeld en wordt met ingedikt secundair slib ook het externe slib bedoeld.

AFBEELDING 3.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE THERMFILLY-INSTALLATIE



Tabel 3.1 toont debieten, temperaturen en drogestofgehaltenes voor de sliblijn van rwzi Garmerwolde. De temperatuur in zomer- en wintersituatie van de slibstromen dient als uitgangspunt voor de thermische berekeningen in de business case. Het secundair slib dat de Thermfilly-reactor wordt ingevoerd wordt bijgemengd met slib uit de gistingstank om de viscositeit te verlagen. De verhouding is 50% gistingsslib ten opzichte van ingedikt secundair slib (recirculatiefactor 1,5). Daarnaast is een recirculatie over de Thermfilly-reactor nodig om het ingaande slib te enten met verzurende biomassa. De recirculatie van de Thermfilly bedraagt 7/12 (7 m<sup>3</sup>/h recirculatie voor 12 m<sup>3</sup>/h ingedikt secundair slib, arbitrair gekozen door waterschap Noorderzijlvest). Deze verhouding is in alle varianten aangehouden. Extern secundair slib dat in de huidige situatie wordt behandeld op rwzi Garmerwolde is meegerekend in de 12 m<sup>3</sup>/h ingedikt secundair slib.

TABEL 3.1 UITGANGSPUNTEN SLIB EN THERMFILLY RWZI GARMERWOLDE

Variabele	eenheid	waarde
<b>Ingedikt primair slib</b>		
debiet	m <sup>3</sup> /h	8
ds gehalte	ds%	5%
ds-vracht	kg ds/dag	9.600
Temperatuur zomersituatie	°C	20
Temperatuur wintersituatie	°C	8
<b>Ingedikt secundair slib</b>		
debiet	m <sup>3</sup> /h	12
ds gehalte	ds%	8%
ds-vracht	kg ds/dag	23.000
Temperatuur zomersituatie	°C	20
Temperatuur wintersituatie	°C	8
<b>Recirculatie gegist slib</b>		
debiet	m <sup>3</sup> /h	6
ds gehalte	ds%	5%
Temperatuur	°C	38
<b>Recirculatie Thermfilly</b>		
debiet	m <sup>3</sup> /h	7

### 3.2 UITWERKING VAN HET PROCES

Op basis van de uitgangspunten is een schetsontwerp gemaakt. Dit ontwerp is weergegeven in een Process Flow diagram (PFD). De volledige PFD met bijbehorende massastromen is te vinden in bijlage I.

#### PROPSTROOMREACTOR

De verblijftijd van het slib in de Thermfilly-reactor is 5 uur met een temperatuur van 45 °C, op basis van de uitkomsten van het labonderzoek (batchtesten). Om deze condities te bereiken is de Thermfilly-installatie gebaseerd op een verticale propstroomreactor. Om aan condities voor propstroom te voldoen is een lengte-diameterverhouding van 10:1 aangehouden. Voor de vullingsgraad van de Thermfilly-reactor is 80% aangenomen. De Thermfilly-reactor wordt geïsoleerd en buiten opgesteld. De propstroomreactor wordt gemengd, zonder het propstroomgedrag te verstoren, dus geen menging in de stroomrichting. Dit gebeurt door de menger uit te voeren met meerdere roerelementen langs een verticale as.



### **HOMOGENISATIETANK**

Om het gerecirculeerde gegiste slib te mengen met de ingaande secundair slibstroom is een homogenisatietank toegepast. Vanwege de verschillende drogestofgehaltenes zullen de twee stromen anders slecht mengen. De verblijftijd van het slib in de homogenisatietank is 15 minuten. De homogenisatietank is uitgerust met een mechanische menger. Afhankelijk van lokale omstandigheden en door optimalisatie kan de homogenisatietank mogelijk vervallen.

### **SLIBWARMTEWISSELAARS**

De Thermfilly-installatie is uitgerust met een slibwarmtewisselaar om het ingaande slib op te warmen. Warm water afkomstig van de warmtekrachtkoppeling (WKK) wordt gebruikt om het slib op te warmen naar 45 °C.

Er is gekozen om de slibwarmtewisselaar van de Thermfilly-installatie uit te voeren als buis-in-buis-wisselaar om de kans op verstoppingen te verkleinen.

De al aanwezige warmtewisselaar in de recirculatie van de gistingstank blijft in bedrijf, mede om het primair slib op te warmen. Deze warmtewisselaar wordt voorzien van een koudwater-toevoer, om tevens als koeling te dienen wanneer dit nodig is. De bedrijfstemperatuur van de Thermfilly ligt hoger dan de bedrijfstemperatuur van de gistingstank. Als het koude primair slib te weinig capaciteit heeft om de energie in het warme secundair slib op te nemen, zal koeling nodig zijn.

### **SLIBPOMPEN**

In de Thermfilly-installatie zijn op de volgende locaties pompen nodig:

- Slibaanvoer naar de Thermfilly-reactor
- Slibaanvoer naar de gistingstank
- Recirculatie van de Thermfilly-reactor
- Recirculatie van de gistingstank

Deze pompen vallen binnen de systeemgrenzen van de Thermfilly-installatie en worden beschouwd in de business case.

# 4

## UITGANGSPUNTEN BUSINESSCASE

Om het effect van de Thermfilly installatie op de sliblijn te beschouwen is voor twee fictieve rwzi's en een bestaande rwzi een businesscase opgesteld. De businesscase is uitgewerkt voor drie 'locaties':

- een fictieve referentie-rwzi van 100.000 i.e.
- een fictieve referentie-rwzi van 250.000 i.e.
- rwzi Garmerwolde, 375.000 i.e. en 375.000 i.e. extern primair en secundair slib, totaal 750.000 i.e.

De businesscase heeft als doel de financiële haalbaarheid van Thermfilly vast te stellen door de terugverdientijd te bepalen. De operationele kosten zijn vastgesteld als verandering ten opzichte van de huidige situatie. De operationele kosten zijn op jaarbasis bepaald en bestaan uit:

- chemicaliën
- energiegebruik en/of-opbrengst
- slibeindverwerking
- onderhoud en bedrijfsvoering

Ook is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hierin is de gevoeligheid van de business case beschouwd voor organische drogestofafbraak, slibeindverwerkingskosten, ontwaterbaarheid van het gegiste slib, en investeringskosten.

In paragraaf 4.1 zijn de locaties en varianten omschreven waarvoor een business case is opgesteld. In paragraaf 4.2 zijn de uitgangspunten voor de drogestofbalans beschreven. Paragraaf 4.3 beschrijft de uitgangspunten voor het bepalen van de organische drogestofafbraak. Paragraaf 4.4 en 4.5 beschrijven respectievelijk de uitgangspunten voor dimensionering en de warmtebalans van de Thermfilly-installatie. In paragraaf 4.6 zijn de uitgangspunten voor de financiële analyse gegeven.

### 4.1 OMSCHRIJVING LOCATIES

Voor beide fictieve referentie-rwzi's zijn vier verschillende varianten beschouwd. Voor de business case voor Garmerwolde zijn twee varianten beschouwd.

- deelvariant a beschrijft de huidige rwzi en dient als nulvariant.
- deelvariant b beschrijft de huidige rwzi met daarbij een Thermfilly-installatie voor secundair slib.
- deelvariant c is identiek aan deelvariant b, met als toevoeging dat het secundair slib verder wordt ingedikt en vrijgekomen gistingruimte wordt benut door bijmengen van extern secundair slib.
- deelvariant d beschrijft de rwzi met Thermfilly en verhoogde indikking van secundair slib zonder het bijmengen van extern slib.

Voor de fictieve rwzi's is in de basissituatie gerekend met een drogestofgehalte van 6%ds in het secundaire slib. Bij verdergaande indikking wordt ingedikt tot 10%ds, om een zo groot mogelijke drogestofvracht te kunnen verwerken. De verwachting is dat dit op veel locaties in de gistingstank mogelijk is, maar dat het transportsysteem (pompen en leidingen) mogelijk een bottleneck oplevert. Dit moet voor de specifieke situatie worden nagegaan. Door de recirculatiestroom van de gistingstank terug naar de ingaande stroom van de Thermfilly wordt de slibstroom verpompbaar gehouden, door de lagere viscositeit van het gegiste slib.

Bij rwzi Garmerwolde wordt in de huidige situatie al extern slib verwerkt en wordt het slib vergaand ingedikt (tot ca. 8%ds). Daarom worden voor die locatie alleen variant a en b uitgewerkt.

In Tabel 4.1 zijn alle locaties en varianten weergegeven die in de business case zijn beschouwd.

TABEL 4.1 DE VARIANTEN BEHANDELD IN DE BUSINESS CASE.

Variant	Omschrijving	omvang sliblijn (i.e.)	Thermfilly voor secundair slib	Vergaande indikking <sup>1</sup>	Opvullen gistingsruimte <sup>2</sup>
locatie 1a	referentie klein, nulsituatie	100.000			
locatie 1b	referentie klein, Thermfilly	100.000	X		
locatie 1c	referentie klein, Thermfilly + extern slib	100.000	X	X	X
locatie 1d	referentie klein, Thermfilly met indikking	100.000	X	X	
locatie 2a	referentie groot, nulsituatie	250.000			
locatie 2b	referentie groot, Thermfilly	250.000	X		
locatie 2c	referentie groot, Thermfilly + extern slib	250.000	X	X	X
locatie 2d	referentie groot, Thermfilly met indikking	250.000	X	X	
locatie 3a, Garmerwolde	Garmerwolde, nulsituatie	750.000 <sup>3</sup>			
locatie 3b, Garmerwolde	Garmerwolde, Thermfilly	750.000 <sup>3</sup>	X		

<sup>1</sup> indikking tot 10%ds in plaats van 6%ds.

<sup>2</sup> de ruimte vrijgekomen in het actief gistingvolume (o.b.v. 20 dagen verblijftijd) is aangevuld met extern secundair slib, met Thermfilly-voorbehandeling.

<sup>3</sup> inclusief extern slib

## 4.2 UITGANGSPUNTEN DROGESTOFBALANS

De sliblijn bestaat voor alle drie locaties uit gravitaire indikking van primair slib en mechanische indikking van secundair slib. Na indikking vindt mesofiele vergisting plaats, bij een temperatuur van 37 °C en een verblijftijd van 20 dagen. Na gisting volgt ontwatering, waarna de slibkoek wordt afgevoerd. In varianten 1c en 2c wordt extern slib vergist. Dit is ook het geval op rwzi Garmerwolde, varianten 3a en 3b. Als uitgangspunt is genomen dat de volledige installatie voltijds (24 uur per dag, 7 dagen per week) wordt bedreven.

Voor locaties 1 en 2 wordt uitgegaan van een slibsamenstelling en -verhouding representatief voor de Nederlandse praktijksituatie, zoals ook gebruikt in het STOWA-onderzoek Pasturidestructie [1]. Locatie 3 is gebaseerd op getallen zoals verstrekt door waterschap Noorderzijlvest voor rwzi Garmerwolde. Tabel 4.2 toont de slibsamenstelling van het primaire slib en secundaire slib inclusief de gehanteerde uitgangspunten van de voorindikking.

TABEL 4.2 UITGANGSPUNTEN SLIBPRODUCTIE EN INDIKKING VAN DE VERSCHILLENDE VARIANTEN

variant	eenheid	locatie 1 (100.000 i.e.)	locatie 2 (250.000 i.e.)	locatie 3 (750.000 i.e.)
<b>Primair slib</b>				
Slibproductie	kg ds/d	2.920	7.300	10.700
DS gehalte	ds%	1,7%	1,7%	1,7%
ODS gehalte	ods%	75%	75%	75%
<b>Secundair slib</b>				
Slibproductie	kg ds/d	2.760	6.900	24.253 <sup>3</sup>
DS gehalte	ds%	0,8%	0,8%	0,8%
ODS gehalte	ods%	70%	70%	70%
<b>Primair slibindikking</b>				
Afscheiding	%	90%	90%	90%
DS gehalte na indikken	ds%	5%	5%	5%
DS vracht na indikken	kg ds/ d	2.628	6.570	9.600
<b>Secundair slibindikking</b>				
Afscheiding	%	95%	95%	95%
DS gehalte na indikken	ds%	6%	6%	8%
DS vracht na indikken	kg ds/ d	2.622	6.555	23.040
Specifiek polymeergebruik <sup>2</sup>	g PE/ kg ds	4	4	4

1 Voor varianten c en d geldt een verhoogde secundair slibindikking naar 10%ds.

2 Op rwzi Garmerwolde wordt behalve PE ook FeCl<sub>3</sub> toegevoegd bij de slibindikking. Dit is in deze businesscase niet meegenomen.

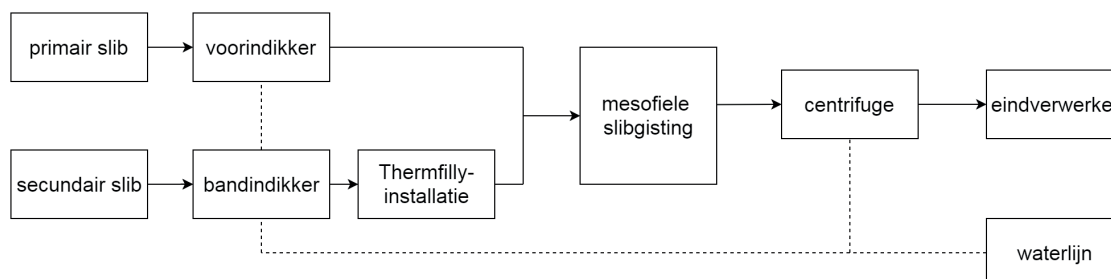
3 inclusief extern slib

Secundair slib wordt na de mechanische indikking thermofiel voorbehandeld in de Thermfilly-installatie, voorafgaand aan mesofiele gisting. Primair slib wordt direct na indikking aan de gisting gevoed. In Afbeelding 4.1 wordt de hier beschreven sliblijn schematisch weergegeven.

In de eindontwatering van het gegiste slib wordt een ds-gehalte van 23% bereikt. De businesscases hanteren als uitgangspunt dat het Thermfilly-proces geen invloed heeft op de ontwaterbaarheid van het gegiste slib. Het drogestofgehalte na ontwatering en de PE-dosering blijven dus gelijk.

Door verdergaande drogestofafbraak zullen meer nutriënten in het rejectiewater terechtkomen. Of dit verwerkt kan worden in de waterlijn of dat een deelstroomreactor nodig is, is locatiespecifiek en daarom niet meegenomen in de businesscase.

AFBEELDING 4.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE SLIBLIJN. DE LOCATIE VAN DE THERMFILLY-INSTALLATIE IN DE SLIBLIJN IS AANGEGEVEN



In de varianten 1c en 2c wordt (extra) extern secundair slib verwerkt. Als uitgangspunt is gehanteerd dat extern slib in de oorspronkelijke situatie elders direct wordt ontwaterd en afgevoerd, dus niet wordt vergist. Hierbij is hetzelfde ds-gehalte (23%) gehanteerd als voor slib dat wel vergist is. Voor de afvoer van dit slib (als slibkoek) zijn de standaard kosten voor

slibeindverwerking gehanteerd. Dit uitgangspunt wordt gebruikt om de kosten van slibverwerking in de varianten onderling te kunnen vergelijken.

#### 4.3 ORGANISCHE DROGESTOFAFBRAAK EN BIOGASPRODUCTIE

De afbraak van organische drogestof (ods) en de daaraan gerelateerde biogasproductie in de a-varianten zijn bepaald met het in de praktijk gevalideerde Chen-Hashimoto-gistingsmodel. Tabel 4.3 bevat de toegepaste uitgangspunten [23]. Voor de situatie op een specifieke locatie kunnen deze parameters afwijken. De modeluitkomsten zijn opgenomen in bijlage II.

TABEL 4.3 UITGANGSPUNTEN CHEN-HASHIMOTO-GISTINGSMODEL ZOALS TOEGEPAST VOOR DE REFERENTIEVARIANT [23]

parameter	eenheid	waarde
minimale SRT	dagen	2,85
temperatuurfactor	-	1,08
verblijftijd slibgisting	dagen	20
temperatuur	°C	37
maximale afbreekbaarheid PS	%	65%
maximale afbreekbaarheid SS	%	40%
afbraakconstante PS	-	1,00
afbraakconstante SS	-	1,50
CZV-gehalte PS	kg CZV/kg ODS	1,80
CZV-gehalte SS	kg CZV/kg ODS	1,42

De business case voor de verschillende varianten is gebaseerd op een relatieve toename in ods-afbraak van het secundair slib van 10%. Omdat het labonderzoek ten tijde van het opstellen van de businesscase nog geen betrouwbare resultaten had opgeleverd, is dit een aangenomen waarde. Voor extern secundair slib zijn dezelfde waarden gebruikt als voor eigen secundair slib.

Tabel 4.4 geeft de slibafbraak weer voor de referentievariant zonder Thermfilly en de varianten met Thermfilly. De slibafbraak volgt uit het Chen-Hashimoto-gistingsmodel en de aangenomen relatieve toename van 10% ods-afbraak van secundair slib. Op deze waarde wordt verder ingegaan in de gevoeligheidsanalyse.

In de d-varianten is een gelijke ds-afbraak aangehouden als in de overige Thermfilly-varianten, hoewel de verblijftijd toeneemt door verdere indikking. Omdat de verblijftijd in de nulvariant 20 dagen is, wordt voor de d-varianten met hogere verblijftijd geen substantiële verbetering van de drogestofafbraak verwacht. Bij een verblijftijd van 20 dagen is de curve van biogasproductie immers al afgevlakt, waardoor het effect op afbraak marginaal is.

TABEL 4.4 SLIBAFBRAAK VOOR PRIMAIR- EN SECUNDAIR SLIB MET- EN ZONDER THERMFILLY-INSTALLATIE

parameter	eenheid	zonder Thermfilly	met Thermfilly
primaair slib ds-afbraak	%	43%	43%
primaair slib ods-afbraak	%	58%	58%
secundair slib ds-afbraak	%	24%	26%
secundair slib ods-afbraak	%	34%	37%

#### 4.4 WARMTEBALANS

Het secundaire slib wordt voorafgaand aan de Thermfilly-installatie met een warmtewisselaar opgewarmd. Om de bijbehorende warmtevraag vast te stellen is een warmtebalans opgesteld. Warmte is beschikbaar als warm water en is afkomstig van de warmtekrachtkoppeling (WKK).

De warmtevraag van de Thermfilly is gebaseerd op thermische verliezen naar de omgeving en het opwarmen van de ingaande slibstroom. Hiervoor is een zomer- en een wintersituatie beschouwd. Er wordt in de warmtebalans uitgegaan van een buitenopstelling van de Thermfilly-reactor. Thermische isolatie van de Thermfilly-reactor is meegenomen in de warmtebalans en in de raming van de investeringskosten. Warmteverlies van het leidingwerk van de Thermfilly-installatie is buiten beschouwing gelaten, omdat dit door gunstig plaatsen van warmtewisselaar en reactor minimaal kan worden gehouden.

Omdat de Thermfilly-reactor wordt voorverwarmd, is er minder tot geen warmte nodig voor het op temperatuur houden van de gistingstank. De warmtevraag van de gistingstank wordt in de warmtebalans opnieuw bepaald. Tabel 4.5 geeft de uitgangspunten gebruikt in de warmtebalans.

TABEL 4.5 UITGANGSPUNTEN GEBRUIKT VOOR DE WARMTEBALANS

parameter	eenheid	waarde
Methaangehalte biogas	%	65%
Energieinhoud biogas	MJ/m <sup>3</sup>	23
energie-inhoud aardgas	MJ/m <sup>3</sup>	31,7
Efficiënt gebruik biogas	%	95%
E-Rendement WKK	%	40%
W- Rendement WKK	%	40%
Dikte wandisolatie Thermfilly	m	0,1
warmteoverdracht wand Thermfilly	W/m <sup>2</sup> K	0,35
<b>WINTERSITUATIE</b>		
Temperatuur slibaanvoer	°C	8
Buitentemperatuur referentie	°C	-10
Temperatuur Thermfilly	°C	45
Temperatuur Recirculatie gistingstank	°C	37
<b>ZOMERSITUATIE</b>		
Temperatuur slibaanvoer	°C	20
Buitentemperatuur referentie	°C	20
Temperatuur Thermfilly	°C	45
Temperatuur Recirculatie gistingstank	°C	37

Voor het elektriciteitsgebruik van de slibindikking en de eindontwatering zijn de volgende getallen aangehouden:

- Secundairslibindikking: 45 kWh/ton ds
- Slibeindontwatering: 120 kWh/ton ds

De overige elektrische verbruikers zijn berekend op basis van de massabalans of informatie van leveranciers.

#### 4.5 FINANCIËEL-ECONOMISCHE UITGANGSPUNTEN

In deze paragraaf zijn de uitgangspunten beschreven die zijn gebruikt voor de jaarlijkse kosten en baten, de investeringskosten en de terugverdientijd. In tabel 4.6 zijn de financiële uitgangspunten gebruikt voor de business case weergegeven. De afschrijftermijn van civiele delen bedraagt 40 jaar, die van werktuigbouwkundige en elektrotechnische delen 15 jaar. Ook zijn er percentages gehanteerd over de bouwkosten om tot investeringskosten te komen, zie ook tabel 4.7. De jaarlijkse personeelskosten gemoeid met het bedienen van de Thermfilly-installatie zijn gelijk gehouden aan de personeelskosten in STOWA-werkrapport 2015-W07.

TABEL 4.6 FINANCIËEL-ECONOMISCHE UITGANGSPUNTEN GEHANTEERD IN DE BUSINESS CASE

Parameter	eenheid	waarde
elektriciteitskosten	€/kWh	0,10
aardgasprijs	€/m <sup>3</sup>	0,50
polymeerkosten	€/kg actief PE	4,72
kosten sibeindverwerking (variabel + vast)	€/ton ontw. slib	80
onderhoudskosten Werktuigbouwkundig	% van bouwkosten	5%
onderhoudskosten Elektrotechnisch	% van bouwkosten	3%
onderhoudskosten Civiel	% van bouwkosten	1%
personeel	EUR/fte	60.000
personeel	fte	0,2
reële rente (rente - inflatie)	%	2,8%
annuïteit Civiel		0,042
annuïteit Werktuigbouwkundig		0,082
annuïteit Elektrotechnisch		0,082
staatkostenfactor (incl. BTW en 10% onvoorzien)	-	1,62

In tabel 4.7 is de opbouw van de staatkostenfactor nader toegelicht.

TABEL 4.7 OPBOUW STAATKOSTENFACTOR ZOALS GEHANTEERD IN DE BUSINESS CASE

Opbouw staatkostenfactor	
1. Algemene kosten	5%
2. Financieringskosten en prijsstijgingen	3%
3. Inrichtingskosten	2%
4. Leges en heffingen	2%
5. CAR-verzekering	1%
6. Bouwrente	3%
7. Voorbereiding en plankosten	15%
8. Onvoorzien	10%
9. Omzetbelasting	21%
totaal	62%

In varianten 1c en 2c wordt extern secundair slib verwerkt. Additionele investeringskosten voor het ontvangen en bufferen van secundair slib zijn niet berekend in de financiële analyse in dit rapport, omdat deze sterk afhankelijk zijn van de lokale situatie.

Bouw- en investeringskosten zijn geraamd op basis van rwzi Garmerwolde, in deze business case variant 3b. De bouw- en investeringskosten van de andere locaties zijn geraamd aan de hand van dezelfde situatie, maar voor een rwzi van bij de variant behorende grootte.

# 5

## RESULTATEN BUSINESSCASE

Dit hoofdstuk bevat de uitkomsten van de opgestelde businesscases. Hierin opgenomen is de drogestofbalans, de warmtebalans, operationele en investeringskosten en tenslotte de gevoeligheidsanalyse.

### 5.1 DROGESTOFBALANS

Voor alle locaties is een drogestofbalans over de sliblijn opgezet. De volledige drogestofbalans is te vinden in bijlage III. Deze paragraaf is opgesteld in twee delen; het eerste bevat de drogestofbalans voor de huidige situatie voor de drie verschillende locaties. Dit zijn de nulvarianten. Het tweede deel vergelijkt de varianten onderling.

#### REFERENTIEVARIANTEN

In deze paragraaf is de drogestofbalans gegeven voor:

- variant 1a: fictieve rwzi van 100.000 i.e.
- variant 2a: fictieve rwzi van 250.000 i.e.
- variant 3a: rwzi Garmerwolde, 750.000 i.e.

Deze varianten geven de situatie zonder Thermfilly-installatie. In tabel 5.1 is de drogestofvracht na de indikkers gegeven. Vervolgens is de drogestofvracht na het gistingproces gegeven.

TABEL 5.1 DROGESTOFBALANS PER VARIANT ZONDER THERMFILLY

variant	eenheid	locatie 1a (100.000 i.e.)	locatie 2a (250.000 i.e.)	locatie 3a (750.000 i.e.)
<b>slibvracht naar gisting</b>				
Primair slib DS-vracht	kg ds/ d	2.628	6.570	9.600
Secundair slib DS-vracht	kg ds/ d	2.622	6.555	23.040
totaal	kg ds/d	5.250	13.125	32.640
<b>slibvracht naar ontwatering</b>				
Totaalslib DS-vracht	kg ds/ d	3.488	8.720	23.019
Totaalslib Debiet	m <sup>3</sup> /d	96	241	480
uitgegist slib DS-gehalte	%	3,6%	3,6%	5,3%
<b>ontwaterd slib</b>				
DS gehalte na ontwateren	%	23%	23%	23%
Slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	15	37	98

Uit de gegevens in Tabel 5.1 blijkt dat voor varianten 1a en 2a na indikken een nagenoeg gelijke hoeveelheid secundair- als primair slib naar de slibgisting gaat. In variant 3a is er een factor 2,4 maal zoveel secundair slib als primair slib. Dit komt doordat het externe slib vooral bestaat uit secundair slib en slechts voor een klein deel uit primair slib.



**LOCATIE 1: FICTIEVE RWZI VAN 100.000 I.E.**

In Tabel 5.2 is de drogestofbalans voor de fictieve rwzi van 100.000 i.e. gegeven.

**TABEL 5.2** DROGESTOFBALANS VOOR DE DEELVARIANTEN VOOR EEN FICTIEVE RWZI VAN 100.000 I.E.

variant	eenheid	1a	1b	1c	1d
<b>slibvracht naar gisting</b>					
Primairslib DS vracht	kg ds/ d	2.628	2.628	2.628	2.628
Secundairslib DS vracht	kg ds/ d	2.622	2.622	2.622	2.622
Extern slib DS vracht	kg ds/ d	0	0	1.311	0
totaal	kg ds/d	5.250	5.250	6.561	5.250
<b>slibvracht naar ontwatering</b>					
Totaalslib DS vracht	kg ds/ d	3.488	3.426	4.396	3.426
Totaalslib Debiet	m <sup>3</sup> /d	96	96	96	82
uitgegist slib DS gehalte	%	3,6%	3,6%	4,6%	4,2%
<b>ontwaterd slib</b>					
DS gehalte na ontwateren	%	23%	23%	23%	23%
Slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	15	15	19	15
slibdebiet niet-vergist, ontwaterd slib <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> /d	6	6	-	6
<b>besparing t.o.v. huidige situatie</b>					
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /d	n.v.t.	0	2	0
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /j	n.v.t.	96	669	96
Reductie slibafzet	%	n.v.t.	1,8%	12%	1,8%

<sup>1</sup> Dit is de hoeveelheid externe slibkoek bij directe ontwatering, terwijl dit slib in scenario 1c wordt vergist en ontwaterd (zie paragraaf 4.2).

Opvallend is de hoge reductie in slibafzet in deelvariant 1c. In variant 1c wordt extern secundair slib verwerkt. De baten worden bepaald ten opzicht van de situatie waarin de hoeveelheid extern secundair slib elders wordt ingedikd, ontwaterd en afgevoerd (zie paragraaf 4.2). De kosten van het verwerken elders zijn vergeleken met de kosten en baten van het verwerken in variant 1c, waar naast indikking en ontwatering ook voorbehandeling met Thermfilly en gisting plaatsvinden.

**LOCATIE 2: FICTIEVE RWZI VAN 250.000 I.E.**

Tabel 5.3 toont de drogestofbalans voor de varianten opgesteld voor de fictieve rwzi van 250.000 i.e.

**TABEL 5.3** DROGESTOFBALANS VOOR DE VARIANTEN VOOR EEN FICTIEVE RWZI VAN 250.000 I.E.

variant	eenheid	2a	2b	2c	2d
<b>slibvracht naar gisting</b>					
Primair slib DS vracht	kg ds/ d	6.570	6.570	6.570	6.570
Secundair slib DS vracht	kg ds/ d	6.555	6.555	6.555	6.555
Extern slib DS vracht	kg ds/ d	0	0	3.278	0
totaal	kg ds/d	13.125	13.125	16.403	13.125
<b>slibvracht naar ontwatering</b>					
Totaalslib DS vracht	kg ds/ d	8.720	8.565	10.990	8.565
Totaalslib Debiet	m <sup>3</sup> /d	241	241	241	204
uitgegist slib DS gehalte	%	3,6%	3,6%	4,6%	4,2%
<b>ontwaterd slib</b>					
DS gehalte na ontwateren	%	23%	23%	23%	23%
Slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	37	36	47	36

variant	eenheid	2a	2b	2c	2d
slibdebiet niet-vergist, ontwaterd slib <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> /d	14	14	-	14
<b>besparing ten opzichte van huidige situatie</b>					
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /d	n.v.t.	0,7	4,6	0,7
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /j	n.v.t.	241	1.672	241
Reductie slibafzet	%	n.v.t.	1,8%	12%	1,8%

<sup>1</sup> Dit is de hoeveelheid externe slibkoek bij directe ontwatering, terwijl dit slib in scenario 2c wordt vergist en ontwaterd (zie paragraaf 4.2).

Net als bij variant 1c valt hier bij 2c de hoge reductie in slibafzet op ten opzicht van de referentievariant.

### LOCATIE 3: RWZI GARMERWOLDE, 750.000 I.E.

Tabel 5.4 toont de drogestofbalans voor varianten 3a en 3b. De Thermfilly-installatie geeft gunstiger resultaten voor variant 3b dan in 1b en 2b voor de reductie in slibafzet, vanwege een hoger aandeel aan secundair slib. Primair slib wordt niet in de Thermfilly-installatie behandeld.

TABEL 5.4 DROGESTOFBALANS VOOR DE DEELVARIANTEN VOOR RWZI GARMERWOLDE, 750.000 I.E.

variant	eenheid	3a	3b
<b>slibvracht naar gisting</b>			
Primairslib DS vracht	kg ds/ d	9.600	9.600
Secundairslib DS vracht	kg ds/ d	23.040	23.040
totaal	kg ds/d	32.640	32.640
<b>slibvracht naar ontwatering</b>			
Totaalslib DS vracht	kg ds/ d	23.019	22.474
Totaalslib Debiet	m <sup>3</sup> /d	480	480
uitgegist slib DS gehalte	%	5%	5%
<b>ontwaterd slib</b>			
DS gehalte na ontwateren	%	23%	23%
Slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	98	96
<b>besparing t.o.v. huidige situatie</b>			
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /d	n.v.t.	2
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /j	n.v.t.	848
Reductie slibafzet	%	n.v.t.	2,4%

## 5.2 DIMENSIONERING REACTOR

Op basis van de uitgangspunten en de massabalans is de Thermfilly-reactor gedimensioneerd voor de verschillende varianten.

TABEL 5.5 RESULTATEN DIMENSIONERING THERMFILLY-REACTOR

		1b	1c	1d	2b	2c	2d	3b
schaalgrootte			100.000 i.e.			250.000 i.e.		750.000 i.e.
Totaal ingaand debiet	m <sup>3</sup> /d	66	66	44	164	164	109	432
Reactorvolume (effectief)	m <sup>3</sup>	14	14	9	34	34	23	90
Reactorvolume (totaal)	m <sup>3</sup>	17	17	11	43	43	28	113
Hoogte reactor	m	13	13	11	18	18	15	24 <sup>1</sup>
Diameter reactor	m	1,3	1,3	1,1	1,8	1,8	1,5	2,4
Massa inhoud reactor	ton	14	14	9	34	34	23	90

<sup>1</sup> De reactor is hiermee hoger dan de slibgistingstank. Bij nadere detaillering van het ontwerp moet worden onderzocht of dit mogelijk en wenselijk is, of dat aanpassingen (bijvoorbeeld een grotere diameter) nodig zijn.

Varianten 1d en 2d leiden tot relatief kleinere installaties voor dezelfde drogestofhoeveelheid. Dit is een gevolg van een hogere indikkingsgraad en daardoor een lager slibdebiet.

### 5.3 ENERGIEBALANS

De warmtebalans is gemaakt op basis van de uitgangspunten, massabalans en dimensies van de Thermfilly-reactor. Door toename van drogestofafbraak neemt de biogasproductie in de varianten met Thermfilly toe. Daarnaast veranderen ook de warmtehuishouding en de elektriciteitsvraag. Tabel 5.6 toont de biogasproductie per deelvariant en de bijbehorende elektriciteits- en warmteproductie van de warmtekrachtkoppeling (WKK). De volledige warmtebalans is te vinden in bijlage IV.

TABEL 5.6 ENERGIEHUISHOUDING VAN DE WARMTEKRACHTKOPPELING VOOR DE VERSCHILLENDE VARIANTEN

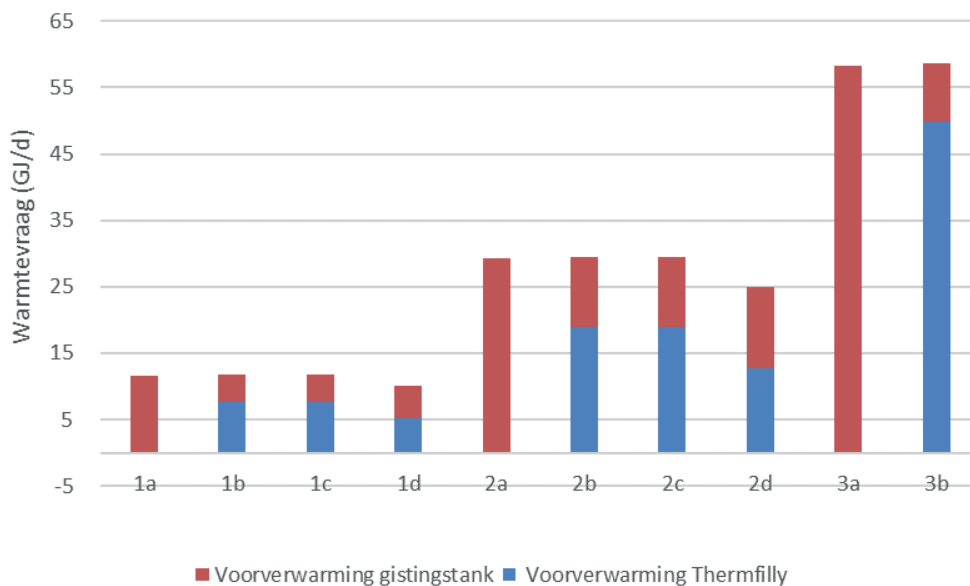
Variabele	eenheid	1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3a	3b
Totale biogasproductie	m <sup>3</sup> /d	1.657	1.707	1.980	1.707	4.143	4.267	4.951	4.267	8.607	9.044
Netto biogas productie	m <sup>3</sup> /d	1.491	1.536	1.782	1.536	3.729	3.841	4.456	3.841	7.746	8.139
Elektriciteitsproductie	kWh/d	3.520	3.626	4.207	3.626	8.800	9.064	10.516	9.064	18.281	19.210
Elektriciteitsvraag Thermfilly	kWh/d	543	615	731	598	1.357	1.524	1.814	1.481	3.854	4.277
Warmteproductie	GJ/d	13	14	16	14	33	34	40	34	69	72

1 Totaal van de verbruikers: voorontwatering secundair slib; voedingspomp Thermfilly; voedingspomp gistingstank; recirculatiepomp gegist slib; menger Thermfilly; menger homogenisatietank;slibeindontwatering

#### WARMTEBALANS IN DE WINTERSITUATIE

Afbeelding 5.1 geeft de warmtevraag in de sliblijn voor alle varianten. In de referentievarianten 1a, 2a en 3a bestaat de warmtevraag enkel uit het verwarmen van het slib in de gistingstank, wat wordt bereikt door middel van een warmtewisselaar in de slibrecirculatie. In de overige situaties is er voor het merendeel verwarming van de Thermfilly-installatie. In alle gevallen is de warmteproductie uit biogas hoger dan de warmtevraag voor de Thermfilly-installatie en gistingstank samen.

AFBEELDING 5.1 WARMTEVRAAG VAN DE SLIBLIJN IN DE WINTERSITUATIE



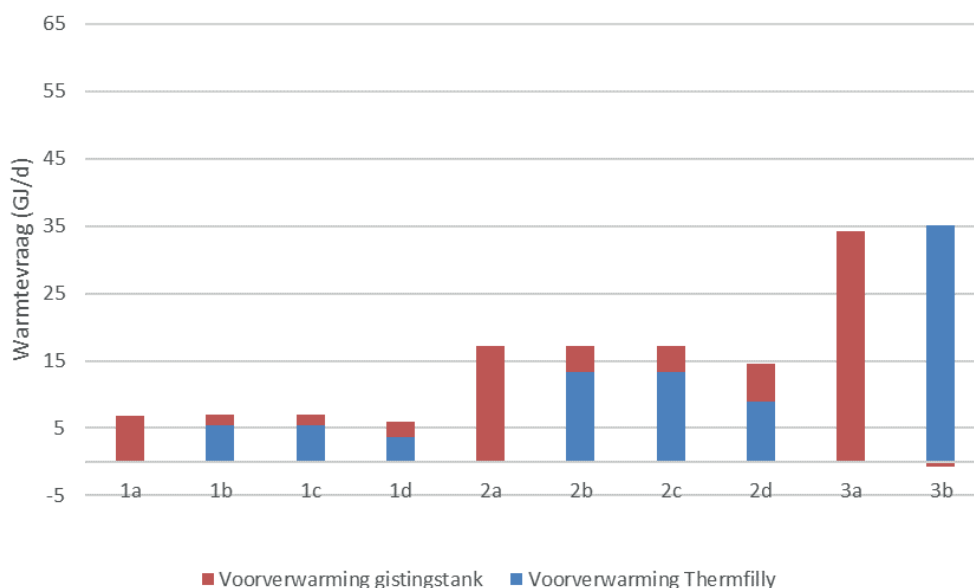
Door de verwarming van de Thermfilly wordt de warmtevraag van de warmtewisselaar van de gistingstank verlaagd. De warmteverliezen naar de omgeving door de geïsoleerde wanden van de Thermfilly zijn laag ten opzichte van de warmtevraag voor het opwarmen van het ingaand slib. De temperatuur van het uitgaande slib uit de Thermilly-installatie is 45 °C, warmer dan de 37 °C gehanteerd in de gistingstank. Door de toevoer van het relatief koude primaire slib is additionele koeling in de wintersituaties niet nodig.

In varianten 3a en 3b is het aandeel secundair slib door de aanwezigheid van extern slib aanzienlijk hoger dan in de varianten gebaseerd op fictieve rwzi's. Dit uit zich bij variant 3b in een hoger aandeel warmtevoorziening in de voorverwarming van de Thermfilly-reactor ten opzichte van de verwarming in de recirculatie van de gistingstank.

### WARMTEBALANS IN DE ZOMERSITUATIE

Afbeelding 5.2 toont de warmtevraag van de sliblijn in de zomersituatie. De warmtevraag van de sliblijn is aanzienlijk lager, voornamelijk vanwege de hogere temperatuur van het primaire en secundaire slib.

AFBEELDING 5.2 WARMTEVRAAG VAN DE SLIBLIJN IN DE ZOMERSITUATIE



Uit Afbeelding 5.2 blijkt dat in deelvariant 3b koeling nodig is voor de gistingstank. In de andere situaties wordt de relatief hoge temperatuur slib uit de Thermfilly gemengd en afdoende gekoeld met primair slib.

In variant 3b is de verhouding secundair slib ten opzichte van primair slib zodanig dat het slib niet afdoende wordt gekoeld. Als gevolg is actieve koeling nodig om de gistingstank in de zomer op de gewenste temperatuur te houden. Dit wordt gedaan door de warmtewisselaar in de recirculatie van de gistingstank in te schakelen voor verwarming en ook koeling. In de praktijk zijn er ook andere mogelijkheden, zoals het dunner bijmengen van primair slib of de temperatuur in de gisting op laten lopen. Dit moet in een nader ontwerp worden gedetailleerd.

#### 5.4 BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN

De bouw- en investeringskosten zijn geraamd met een nauwkeurigheid van +30%/-30% op basis van de benodigde installatiedelen en aanpassingen aan de bestaande situatie. De investeringskosten zijn gebaseerd op de onderdelen:

- homogenisatietank met menger
- Thermfilly -reactortank met menger
- wormpomp voeding Thermfilly
- wormpomp recirculatie Thermfilly
- wormpomp voeding gistingstank
- wormpomp recirculatie gistingstank
- slibwarmtewisselaar buis-in-buis
- bijbehorend leidingwerk en appendages
- metingen
- bijbehorende elektrotechnische aansluitingen
- betonfunderingsplaat voor opstellen Thermfilly-installatie
- container-unit voor opstellen pompen en warmtewisselaar

De onderdelen van de Thermfilly-installatie zijn niet redundant ontworpen.

Tabel 5.7 bevat de totale bouwkosten, wat de optelling is van werktuigbouwkundige, civiele en elektrotechnische bouwkosten. De totale investering bevat de staartkostenfactor zoals beschreven in de uitgangspunten in hoofdstuk 4. De bouw- en investeringskosten zijn uitgewerkt in bijlage V.

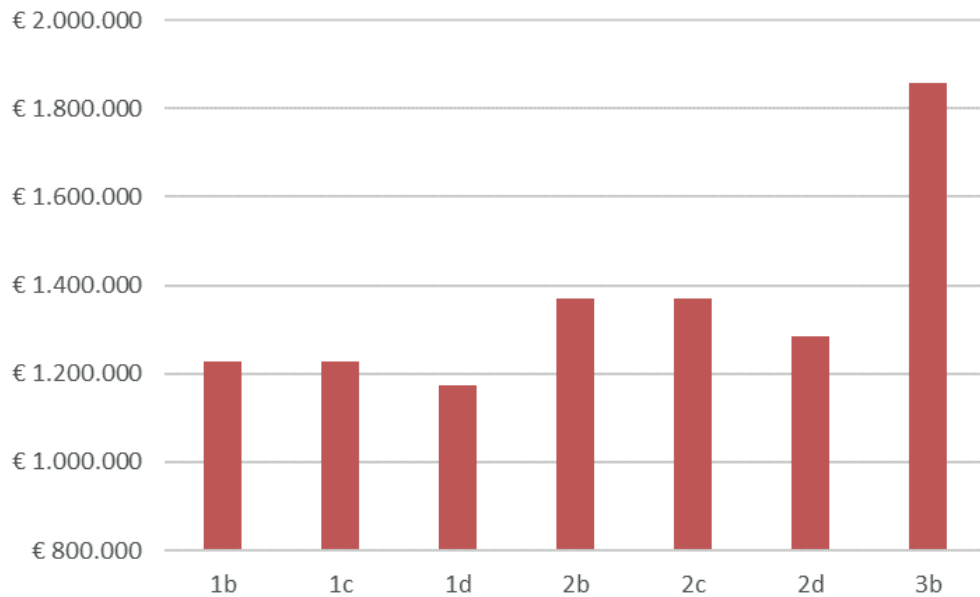
TABEL 5.7 TOTALE BOUWKOSTEN EN TOTALE INVESTERING VOOR DE VERSCHILLENDE VARIANTEN

variant	1b	1c	1d	2b	2c	2d	3b
schaalgrootte (i.e.)	100.000	100.000	100.000	250.000	250.000	250.000	750.000
Totale bouwkosten (€)	768.000	768.000	734.000	858.000	858.000	803.000	1.161.000
Totale investeringskosten (€)	1.228.000	1.228.000	1.174.000	1.372.000	1.372.000	1.285.000	1.857.000

Afbeelding 5.3 toont de investeringskosten inclusief staartkostenfactor zoals beschreven in de uitgangspunten. De investeringskosten lopen niet sterk uiteen voor de verschillende varianten, wat te verklaren is door kostenposten die weinig afhankelijk zijn van veranderingen in schaalgrootte. Dit betekent dat kleinere installaties gepaard gaan met relatief hoge investeringskosten, en daardoor langere terugverdiertijden.

Kosten voor de Thermfilly-installatie zijn eerder lager geraamd voor thermofiele voorbehandeling op een referentie-rwzi van 250.000 i.e. (variant 2b in dit rapport) in STOWA-werkrapport 2015-W07. De hogere kosten zijn te wijten aan indertijd niet geraamde procesdelen zoals de homogenisatietank, en aan toename in kosten voor elektrotechnische aspecten, leidingwerk en de Thermfilly-reeactor met menger. De huidige kostenraming is gebaseerd op lokale omstandigheden voor rwzi Garmerwolde en op kostenramingen van leveranciers. De volledige kostenraming is te vinden in Appendix IV.

AFBEELDING 5.3 TOTALE INVESTERINGSKOSTEN VOOR DE BESCHOUWDE VARIANTEN



### 5.5 JAARLIJKSE KOSTEN

De jaarlijkse kosten bestaan uit kapitaallasten en operationele lasten. Kapitaallasten zijn gebaseerd op annuïtaire afschrijving (zie hoofdstuk 4) van de bouwkosten. Tabel 5.8 geeft een overzicht van de jaarlijkse kosten en baten ten opzichte van de referentiecasi zonder Thermfilly-installatie. Een volledig overzicht is opgenomen in bijlage V.

Voor de varianten waar extern secundair slib wordt verwerkt zijn geen additionele kosten voor voorindikking gerekend, omdat deze kosten ook in de referentievariant aanwezig zijn, wanneer slib elders wordt ingedikd. Duidelijk is dat de elektriciteitsproductie van de WKK stijgt als direct gevolg van toename van biogasproductie uit drogestofafbraak. Hetzelfde geldt voor de warmte geproduceerd in de WKK, die mogelijk elders weer nuttig ingezet kan worden. Het warmteoverschot in de varianten met Thermfilly is teruggerekend naar een energie-equivalent in aardgas. Er zijn geen kosten gerekend voor extra gebruik van de WKK als gevolg van de toename in biogasproductie, omdat de toename in biogasproductie relatief beperkt is.

Kosten voor eindontwatering zijn aanzienlijk hoger voor de varianten waar ook extern secundair slib wordt verwerkt. Wanneer extern slib elders wordt verwerkt, wordt dit ook ontwaterd voordat het afgevoerd wordt naar de eindverwerking. Gebaseerd op dit uitgangspunt zijn de toename in kosten voor eindontwatering van extern slib verrekend in de kosten voor slibverwerking wanneer dit elders plaatsvindt, zoals in de referentievariant.

TABEL 5.8 JAARLIJKSE KOSTEN (POSITIEVE WAARDEN) EN BATEN (NEGATIEVE WAARDEN) TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIESITUATIE (A-VARIANT) <sup>1</sup>

variant	eenheid	1b	1c	1d	2b	2c	2d	3b
schaalgrootte	i.e.	100.000	100.000	100.000	100.000	250.000	250.000	750.000
<b>Thermifilly</b>								
Kosten elektrisch gebruik	€/jaar	3.000	2.900	2.300	6.800	6.700	5.200	17.900
<b>WKK</b>								
elektriciteitsproductie	€/jaar	-3.900	-25.100	-3.900	-9.600	-62.600	-9.600	-33.900
Baten warmte (aardgasequivalent)	€/jaar	-1.500	-14.100	-9.700	-4.700	-36.200	-25.000	-18.600
<b>Ontwatering</b>								
Kosten PE	€/jaar	-1.700	25.000	-1.700	-4.300	62.500	-4.300	-15.000
Kosten elektrisch	€/jaar	-300	4.000	-300	-700	9.900	-700	-2.400
<b>slibafvoer</b>								
kosten slibeindverwerking	€/jaar	-7.700	112.900	-7.700	-19.300	282.400	-19.300	-67.800
kosten alternatief slibeindverwerking <sup>2</sup>	€/jaar	-	-166.400	-	-	-416.100	-	-
<b>Onderhoud</b>								
Onderhoudskosten totaal	€/jaar	18.500	18.500	17.400	21.400	21.400	19.600	31.900
personeel	€/jaar	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000
<b>kapitaallasten</b>								
annuïteit W	€/jaar	17.200	17.200	15.400	22.000	22.000	19.100	39.200
annuïteit E	€/jaar	25.900	25.900	25.900	25.900	25.900	25.900	25.900
annuïteit C	€/jaar	1.100	1.100	1.100	1.400	1.400	1.300	1.800
totaal kapitaallasten	€/jaar	44.300	44.300	42.400	49.300	49.300	46.300	66.900
totaal jaarlijkse kosten (excl. Kapitaallasten)	€/jaar	18.300	-30.300	8.400	1.600	-120.000	-22.100	-76.000
jaarlijkse kosten en baten incl. kap. lasten	€/jaar	62.600	13.900	50.800	51.000	-70.600	24.200	-9.000

<sup>1</sup> Getallen zijn afgerond op EUR 100,--. Als gevolg hiervan kan enige afwijking in de optelling van het totaal optreden.

<sup>2</sup> Dit zijn de kosten voor ontwatering en afvoer als het slib direct wordt ontwaterd en afgevoerd van de rwzi waar het vrijkomt. Dit is dus een besparing als dit slib via Thermifilly en vergisting wordt afgevoerd. De kosten daarvoor zijn onderdeel van 'kosten slibeindverwerking'.

Uit de jaarlijkse kosten blijkt dat er aanzienlijke verschillen zijn tussen de verschillende varianten op basis van jaarlijkse kosten. Een aantal varianten geven, voor de in de business case aangehouden aannames, geen rendabele business case. Met andere woorden, er zijn geen besparingen mogelijk. In varianten 1c, 2c, 2d en 3b zijn er besparingen op jaarlijkse kosten (exclusief kapitaallasten). Tevens blijkt uit de jaarlijkse kosten dat het verwerken van extern slib extra baten oplevert.

## 5.6 TERUGVERDIENTTIJD

In tabel 5.9 zijn terugverdiëntijden gegeven gebaseerd op geraamde investeringskosten en jaarlijkse kosten en baten. De terugverdiëntijd is bepaald exclusief kapitaallasten.

TABEL 5.9 TERUGVERDIENTTIJDEN VOOR DE VERSCHILLENDE VARIANTEN

variant	eenheid	1b	1c	1d	2b	2c	2d	3b
schaalgrootte	i.e.	100.000	100.000	100.000	250.000	250.000	250.000	750.000
terugverdiëntijd (bepaald excl. kapitaallasten)	jaar	-	40	-	-	11	58	24

Uit Tabel 5.9 blijkt dat een aantal varianten gepaard gaan met een bijzonder lange, of geen terugverdientijd. Er is geen terugverdientijd, als er geen jaarlijkse besparing mogelijk is. Dit is het geval voor deelvarianten 1b, 1d en 2b. Deze varianten zijn daarom voor de huidige business case financieel niet interessant. Voor 2c is de terugverdientijd rond de 11 jaar. Het verwerken van extern secundair slib verkort de terugverdientijd aanzienlijk, waardoor Thermfilly financieel interessanter wordt.

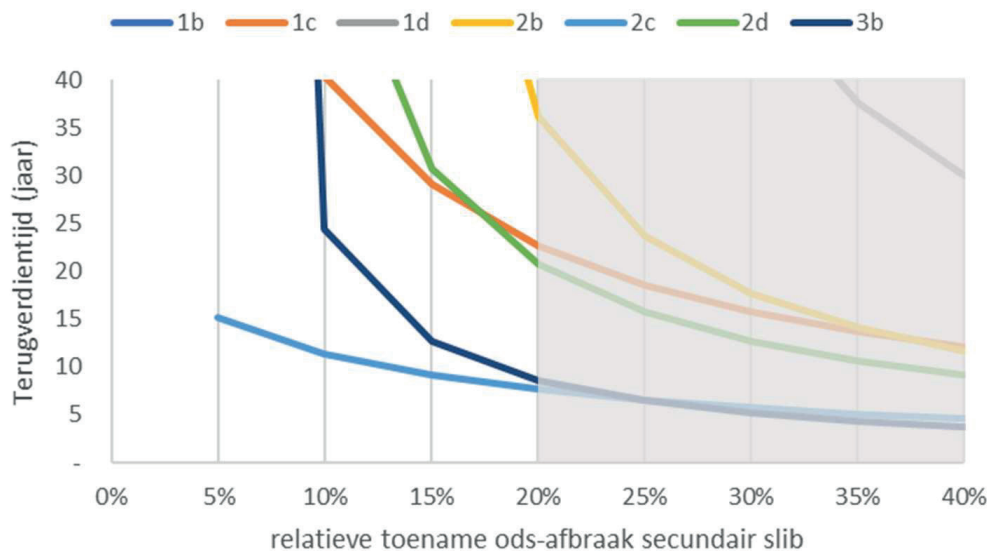
## 5.7 GEVOELIGHEIDSANALYSE

In de gevoeligheidsanalyse wordt de invloed van een aantal variabelen op de terugverdientijd beschouwd. Dit zijn de relatieve toename in ods-afbraak, de investeringskosten, de slibverwerkingskosten en de ontwaterbaarheid.

### RELATIEVE TOENAME IN ODS-AFBRAAK

In de business case is een relatieve toename in ods-afbraak van 10%ds aangenomen van het secundaire slib dat wordt voorbehandeld in de Thermfilly installatie. Dit is een aanname, omdat hiervoor nog geen betrouwbare gegevens beschikbaar zijn. Het daadwerkelijke effect op de ods-afbraak heeft een duidelijke invloed op de terugverdientijd. Afbeelding 5.4 toont de terugverdientijd weergegeven voor verschillende waarden ods-afbraak voor secundair slib. De grafiek is afgesneden vanaf een terugverdientijd van 40 jaar.

AFBEELDING 5.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN DE TERUGVERDIENTIJD (EXCLUSIEF KAPITAALLASTEN) ALS FUNCTIE VAN DE RELATIEVE TOENAME IN ODS-AFBRAAK



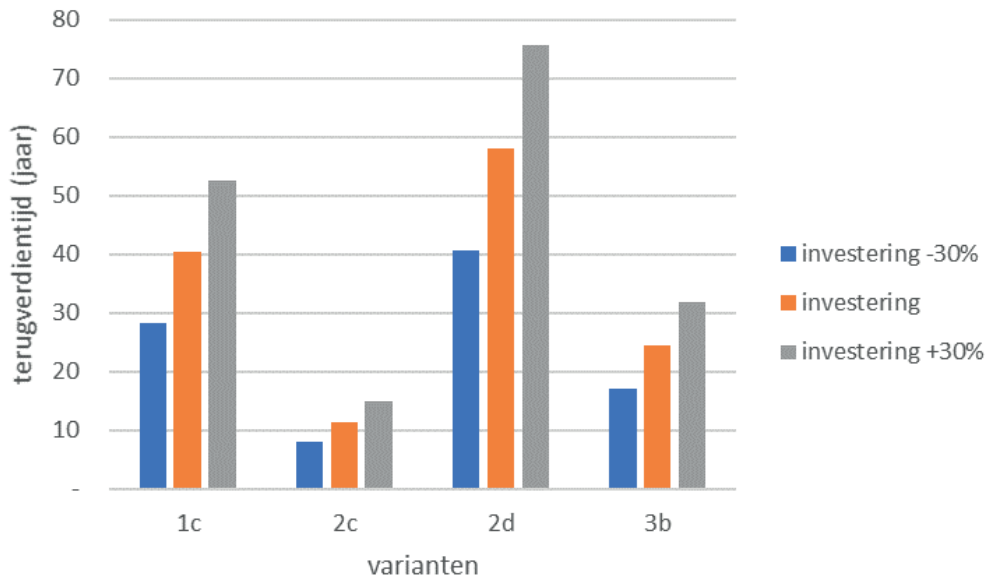
Uit de grafiek blijkt de invloed van de relatieve toename in ods-afbraak op de terugverdientijd. De terugverdientijd verbetert sterk wanneer wordt gekozen ook extern slib te behandelen (c-varianten). Daarnaast geldt dat grotere rwzi's al bij een lager effect op de ods-afbraak in een acceptabele range van terugverdientijd terechtkomen. Een realistische maximale toename in ods-afbraak voor secundair slib is 20%. Bij een dergelijke toename heeft de variant op een locatie van 100.000 i.e. mét extern slib een terugverdientijd van meer dan 20 jaar. Voor de overige varianten bij deze schaalgrootte blijft de terugverdientijd niet bestaand. De varianten voor een locatie van 250.000 i.e. hebben bij een toename in de ods-afbraak van 20% een terugverdientijd variërend van 8 jaar (met extern slib) tot 36 jaar. Ook op Garmerwolde is de terugverdientijd ongeveer 8 jaar als een toename in de ods-afbraak van 20% wordt bereikt voor secundair slib.



## INVESTERINGSKOSTEN

De investeringskosten zijn geraamd met een nauwkeurigheid van +30% / -30%. In Afbeelding 5.5 is de bijbehorende terugverdientijd weergegeven voor de boven- en ondergrens van deze nauwkeurigheidsrange. Varianten 1b, 1d en 2b hebben geen terugverdientijd en zijn daarom niet weergegeven. In het geval van gunstige investeringskosten is voor variant 3b een terugverdientijd van rond de 17 jaar aan de orde, voor 2c is dit rond de 8 jaar. Dit zijn varianten waar een aanzienlijke hoeveelheid (extern) secundair slib wordt behandeld.

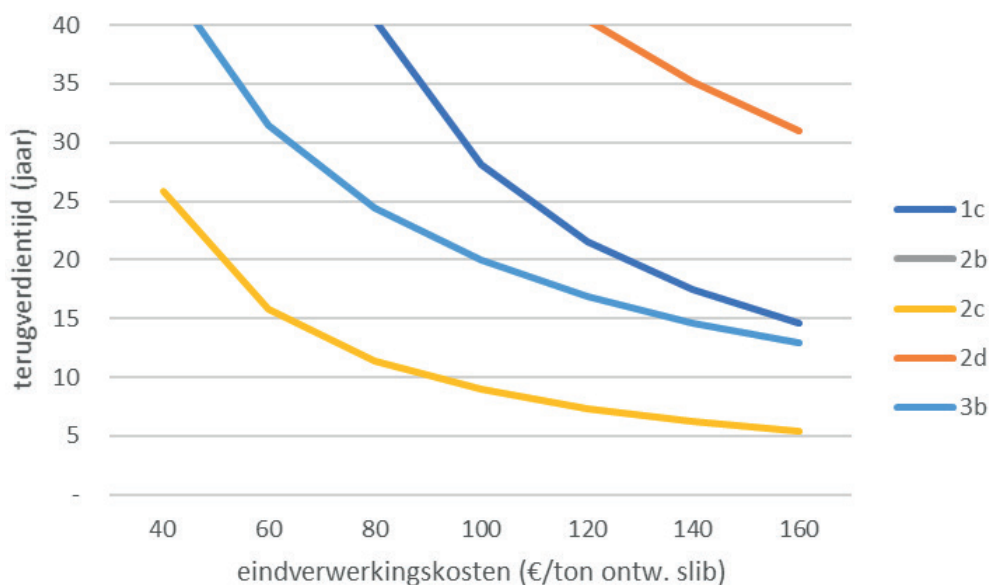
AFBEELDING 5.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN DE TERUGVERDIENTIID ALS FUNCTIE VAN DE INVESTERINGSKOSTEN



## SLIBEINDVERWERKINGSKOSTEN

De slibeindverwerkingskosten zijn in de business case gelijkgesteld aan 80 €/ton ontwaterd slib. De prijs van slibeindverwerking is in de werkelijkheid afhankelijk van de contractvorm en afnemer, en kan daarom verschillen per locatie. In Afbeelding 5.6 is de terugverdientijd getoond voor verschillende slibeindverwerkingskosten. Wanneer slibeindverwerking duurder is, biedt een Thermfilly-installatie een betere business case, door de toename in drogestofafbraak. De grafiek is getoond tot een terugverdientijd van 40 jaar.

AFBEELDING 5.6 GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN DE TERUGVERDIENTIID ALS FUNCTIE VAN DE SLIB EINDVERWERKINGSKOSTEN

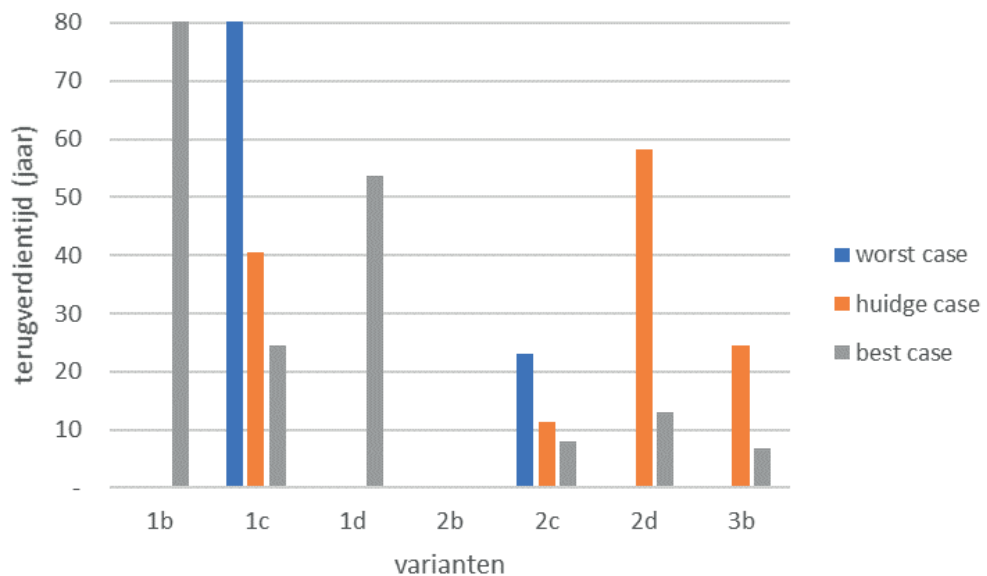


## ONTWATERBAARHEID

De ontwaterbaarheid van het slib is in de business case gesteld op een eindontwatering tot 23%ds. In de gevoeligheidsanalyse is gekeken naar een worst case en een best case. De worst case is een 20% hoger PE-gebruik voor de eindontwatering waarbij het bereikte drogestofgehalte gelijk blijft aan de in de business case gehanteerde waarde. De best case heeft ook een 20% hoger PE-gebruik, maar daarbij wordt een eindontwatering tot 26%ds bereikt. In Afbeelding 5.7 is de terugverdientijd voor de huidige business case, de worst- en best case getoond. Uit de resultaten blijkt dat de worst case een terugverdientijd heeft van 23 jaar voor variant 2c, en voor 1c 201 jaar. Voor de andere varianten is er in de 'worst case' geen besparing en dus geen terugverdientijd.

De best case laat zien dat een grote verbetering in terugverdientijd mogelijk is bij een toename in ontwaterbaarheid. Voor de best case is voor varianten 2c en 3b een terugverdientijd van onder de 10 jaar mogelijk. De best case voor variant 1b geeft een terugverdientijd van meer dan 100 jaar.

AFBEELDING 5.7 GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN DE TERUGVERDIENTIJD ALS FUNCTIE VAN DE ONTWATERBAARHEID



# 6

## DISCUSSIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 6.1 LABONDERZOEK

Het Thermfilly labonderzoek is opgedeeld in een reeks batchgistingen waarin gekeken is naar de optimale combinatie van temperatuur en verblijftijd van de Thermfilly behandeling, een reeks experimenten op continu-schaal waarbij het effect van de Thermfilly behandeling over de tijd is gevolgd, en viscositeitsmetingen ten behoeve van het stroomgedrag van secundair slib in een mogelijke full-scale installatie. De belangrijkste conclusies en bevindingen van de labonderzoeken worden in onderstaande alinea's toegelicht.

#### BATCHGISTINGEN

Middels batchgistingen is gekeken naar zowel de maximale biogasopbrengst alsook de snelheid van biogasproductie uit secundair slib voor verschillende temperatuur- en verblijftijdscombinaties van de Thermfilly behandeling. Het algehele beeld wat hierbij naar voren komt is dat er een optimum lijkt te zijn in de behandeltdtijd van de Thermfilly-behandeling gelegen rond de vier uur, ongeacht de gekozen behandeltemperatuur. Met behulp van twee batchgistingssystemen is het effect op de biogasproductie vastgesteld op een toename van circa 10% bij behandeltemperaturen tussen 45°C tot 60°C. Dit is echter op de rand van wat als significant aangemerkt kan worden doordat een afwijking van bijna 10% te verwachten is door natuurlijk voorkomende verschillen in het substraat.

Wat consequent op is gevallen bij de gistingen met Thermfilly-behandeld secundair slib is dat er gedurende de eerste dagen van de batchgisting een sterk verhoogde biogasproductie waargenomen is ten opzichte van onbehandeld secundair slib. Na deze eerste dagen vlt de biogasproductie echter af, waardoor de opbrengst van de onbehandelde batchgisting uiteindelijk de opbrengst van de Thermfilly-behandelde batchgisting nadert. Op basis van deze resultaten blijkt dat een Thermfilly-behandeling minder interessant kan worden wanneer de hydraulische verblijftijd in een continugisting langer dan 20 dagen is. Andersom geredeneerd, wijzen de batchgistingen erop dat een bijkomend voordeel van de Thermfilly-behandeling is dat de verblijftijd in de gisting met 3 tot 4 dagen verkort kan worden, zonder verlaging van de biogasproductie. De vrijgekomen ruimte kan dan ingevuld worden met additionele biomassa waardoor er absoluut gezien meer biogas geproduceerd kan worden.

#### CONTINUGISTINGEN

Met behulp van continugistingen zijn de bevindingen uit de batchgistingen nader onderzocht. Voor de Thermfilly-behandeling is gekozen voor een temperatuur van 45°C om een eventueel risico op scaling in apparatuur te verlagen en gebruik te kunnen maken van restwarmte. Bij een Thermfilly-behandeling van 45°C gedurende 5 uur en een verkorting van de hydraulische verblijftijd in de reactor naar 12 dagen, wordt er gedurende een periode

van 14 dagen een verschil in biogasproductie van 9,8% gemeten ten opzichte van onbehandeld slib bij dezelfde verblijftijd. Dit lijkt het beeld vanuit de batchgistingen te bevestigen dat het effect van de Thermfilly-behandeling vooral ligt in een versnelling van de biogasproductie, en in mindere mate in een toename van de maximale afbraak van het secundair slib. Hiermee kan een Thermfilly-behandeling een rol spelen in het vergroten van de capaciteit van bestaande gistinginstallaties.

De gevonden biogasproductie uit secundair slib in de onderzoeken ligt met een toename van 10% lager dan de toename van 40% die in eerste instantie werd verwacht vanuit het eerder uitgevoerde STOWA-onderzoek Pasturi Destructie. Gedurende de batchonderzoeken is naar voren gekomen dat viscositeit en menging een grotere rol spelen bij de biogasopbrengst dan vermoed. Door de lagere viscositeit van behandeld secundair slib is vermoedelijk de biogasopbrengst uitvergroet ten opzichte van onbehandeld secundair slib. Door continu te mengen bij de vervolgonderzoeken is het verschil in biogasproductie kleiner geworden tussen behandeld en onbehandeld secundair slib.

### VISCOSITEITSMETINGEN

Het effect van een Thermfilly-behandeling bij 45 °C of 55 °C gedurende vier uur op de viscositeit van secundair slib is vastgesteld met behulp van een Rapid Visco Analyzer. Daarnaast is gekeken naar het effect van het bijmengen van gistingsslib bij secundair slib om de viscositeit te verlagen. Uit de resultaten blijkt dat de Thermfilly behandeling de viscositeit van het slib verlaagt met 12% en 14% voor behandeling op respectievelijk 45 °C en 55 °C wanneer dit op 15 °C wordt gemeten. Deze verlaging is hoger bij de bedrijfstemperatuur met respectievelijk 50% afname in viscositeit bij 45 °C en 53% afname bij 55 °C.

Het verschil in viscositeit van onbehandeld slib (8,7% d.s.) bij 15 °C en 37 °C bedraagt 8%. Het verdunnen van 8,7% d.s. naar 7,9% d.s. heeft een veel groter effect, namelijk een afname in de viscositeit van 26% op een bedrijfstemperatuur van 15 °C. Dit doet vermoeden dat het verlagende effect van het bijmengen van gistingsslib hoofdzakelijk komt door het verlagen van het drogestofgehalte, en in mindere mate door het verhogen van de temperatuur.

Op basis van deze resultaten zou het bijmengen van gistingsslib gebruikt kunnen worden om slib met een hoog drogestofgehalte te kunnen verpompen bij een lager pompvermogen, zonder de inhoud van de gisting te verdunnen. Het bijmengen van Thermfilly-behandeld slib bij secundair slib heeft als grootste voordeel voor de praktijkinstallatie dat de temperatuur van het slib verhoogd wordt, en daarmee de viscositeit verlaagd.

## 6.2 BUSINESSCASE

Voor verschillende schaalgroottes en varianten zijn, op basis van aannames, business cases opgesteld. Uit de businesscases blijkt dat de terugverdientijd aanzienlijk verschilt voor de opgestelde varianten. De terugverdientijd vastgesteld in de business cases is minder gunstig dan is gesteld in eerder onderzoek naar thermofiele voorbehandeling (STOWA-werkrapport 2015-W07). De voornaamste reden hiervoor is de aangenomen lagere relatieve toename in ods-afbraak dan in het STOWA-werkrapport 2015-W07, namelijk een relatieve toename in ods-afbraak van 10% in plaats van 40% van secundair slib. De investeringskosten zijn juist hoger geraamd dan in het STOWA-werkrapport 2015-W07 vanwege destijds niet geraamde processdelen. Hierdoor zijn de baten beperkt en is de investering hoog. Een haalbare business case is echter wel mogelijk. Uit de business case blijkt het verwerken van extern secundair slib de business case aanzienlijk te verbeteren. Daarnaast speelt schaalgrootte van de installatie ook

een rol. Voor de business cases is ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de invloed van verschillende variabelen vast te stellen. In de alinea's hieronder worden de conclusies uit de businesscase en de bijbehorende gevoeligheidsanalyse toegelicht.

### **SCHAALGROOTTE**

Thermfilly werd gezien als kansrijke tegenhanger van meer kostenintensieve voorbehandelingstechnieken zoals TDH. Dit zou met name op kleinere locaties (ca. 100.000 i.e.) met slibvergisting interessant kunnen zijn. Uit de businesscase blijkt echter dat de terugverdientijd bij deze schaalgrootte betrekkelijk lang is, in de variant met toevoer van extern slib rond de 40 jaar. Vanwege de beperkte schaalbaarheid van de investeringskosten zijn deze in dat geval namelijk relatief hoog in verhouding tot de jaarlijkse baten. Als gevolg is de terugverdientijd van een kleine rwzi daardoor langer dan voor een grotere rwzi. In zekere mate zijn een aantal kostenposten, zoals bijvoorbeeld het leidingwerk, locatieafhankelijk. Voor de werkelijke potentie van Thermfilly voor een specifieke locatie is het aan te raden voor de specifieke omstandigheden een schetsontwerp en businesscase op te stellen.

### **EXTERN SLIB**

Door ook extern slib te verwerken kan optimaal gebruik worden gemaakt van de verhoogde ods-afbraak van secundair slib die met de Thermfilly-installatie wordt bereikt. Uit de business cases blijkt dat de terugverdientijd voor varianten waar ook extern slib wordt verwerkt aanzienlijk korter is dan voor de varianten waar dat niet het geval is.

### **VERANDERING ODS-AFBRAAK**

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt de invloed van de ods-afbraak op de businesscase en terugverdientijden van de Thermfilly-installatie. Bij een realistische maximale toename van de ods-afbraak van 20% heeft de variant op een locatie van 100.000 i.e. mét extern slib een terugverdientijd van meer dan 20 jaar. Overige varianten op deze schaalgrootte verdienen zichzelf niet terug. De varianten voor een locatie van 250.000 i.e. hebben bij een toename in de ods-afbraak van 20% een terugverdientijd variërend van 8 jaar (met extern slib) tot 36 jaar. Ook op Garmerwolde is de terugverdientijd ongeveer 8 jaar als een toename in de ods-afbraak van 20% wordt bereikt van secundair slib. De invloed van ods-afbraak op de businesscase geeft het belang aan van gedegen resultaten uit labonderzoek.

### **INVESTERINGSKOSTEN**

De geraamde investeringskosten zijn aanzienlijk hoger dan eerder geraamd in het STOWA-werkrapport 2015-W07. Investeringskosten zijn tot op in zekere mate locatieafhankelijk. De business case kan daarom per locatie verschillen. De investeringskosten zijn geraamd met een +30% /-30% nauwkeurigheid. In de gevoeligheidsanalyse zijn deze grenswaarden onderzocht. De meest gunstige case in de gevoeligheidsanalyse, 30% lagere investeringskosten, resulteert voor variant 2c (250.000 i.e. met extern slib) in een terugverdientijd van minder dan 10 jaar. De terugverdientijd schaalt lineair met de investeringskosten.

### **SLIBEINDVERWERKINGSKOSTEN**

Slibeindverwerkingskosten verschillen in de praktijk per locatie. De Thermfilly-installatie verhoogt de ods-afbraak van secundair slib en vermindert daarmee de slibafvoer. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat voor een rwzi van 250.000 i.e. waar ook extern slib wordt verwerkt de terugverdientijd daalt naar circa 5 jaar wanneer eindverwerkingskosten 160 €/ton ontwaterd slib bedragen in plaats van 80 €/ton ontwaterd slib.

## ONTWATERBAARHEID

Voor de ontwaterbaarheid is in de business cases aangenomen dat deze niet verandert door toepassen van de Thermfilly-installatie en dus gelijk blijft op een eindontwatering tot 23%ds. In de gevoeligheidsanalyse is dit nader bekeken voor een worst case en een best case. De eindontwatering blijkt een grote rol te spelen in de terugverdientijd van de Thermfilly-installatie. Mocht de best case haalbaar zijn, waar 20% meer PE wordt gebruikt en tot 26%ds wordt ontwaterd, dan zijn voor rwzi Garmerwolde en voor een rwzi van 250.000 i.e. waar extern slib wordt verwerkt terugverdientijden van korter dan 10 jaar haalbaar.

### 6.3 INTEGRATIE TUSSEN LABONDERZOEK EN BUSINESSCASES

Tijdens het labonderzoek zijn de verschillen tussen wel en niet voorbehandeld slib onderzocht bij een hydraulische verblijftijd in de slibgisting van 12 dagen. Dit is lager dan de in Nederlandse slibgistingen gebruikelijke 20 dagen. Bij een hydraulische verblijftijd in een continuvergisting van 12 dagen blijkt het effect van de Thermfilly-behandeling op 45 °C gedurende 5 uur vrij goed te corresponderen met de resultaten van de batchgisting. Geconstateerd is dat bij een verblijftijd van 12 dagen met een Thermfilly-behandeling er 10% meer biogas geproduceerd kan worden per g ods ten opzichte van de referentiereactor bij 20 dagen verblijftijd. Dit houdt in dat bij deze kortere verblijftijd er zowel relatief als absoluut een hogere biogasopbrengst en drogestofafbraak is van secundair slib, maar dat er hiermee ook ruimte in de gisting ontstaat voor extern gistingsslib. Ten opzichte van de referentie-situatie met onbehandeld slib bij een HRT van 20 dagen is een toename in biogasproductie van 10% in lijn der verwachting en zou er meer gistingcapaciteit beschikbaar kunnen komen doordat het secundaire slib behandeld met Thermfilly een kortere verblijftijd nodig heeft in de reactor.

Deze situatie is echter anders dan doorgerekend in de business cases waarin een verblijftijd van 20 dagen is gehanteerd. In specifieke situaties kan de businesscase daardoor positiever uitvallen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij nieuwbouw van gistingsvolume waarbij een kleinere tank kan volstaan, overbelaste slibgistingen, slibcentralisatie waarbij uitbreiding van het gistingsvolume nodig is, renovatie van meerdere slibgistingstanks waarbij door toepassing van Thermfilly een kleiner volume hoeft te worden gerenoveerd et cetera.

Op basis van de resultaten uit het onderzoek gecombineerd met het schetsontwerp van de praktijkinstallatie en de gevoeligheidsanalyses van de business cases blijkt de Thermfilly behandeling kortom een interessante optie te kunnen zijn voor gistinginstallaties die: veel secundair slib vergisten, additionele gistingcapaciteit nodig hebben, mengingsproblemen hebben in de gisting of een combinatie van deze factoren. Daarnaast zorgt de lage behandeltemperatuur ook voor een relatief eenvoudige installatie waar weinig specialistische kennis voor nodig is. Dit is een voordeel ten opzichte van technieken die werken bij hoge druk en temperatuur. De uiteindelijke baten en andere voordelen van de technologie zullen per locatie anders zijn en dienen daarom ook per locatie goed onderzocht te worden.

Naast flexibiliteit in de verblijftijd blijkt de invloed van het ontwateringsresultaat een belangrijke factor te zijn op de terugverdientijd. Doordat de invloed van de Thermfilly-behandeling op het ontwateringsresultaat, en eventuele optimalisatie van de PE-dosering, niet is vastgesteld in dit onderzoek kan hier geen uitspraak over gedaan worden.

## 7

## REFERENTIES

- [1] A. Haijer, A. van Nieuwenhuijzen, P. Vast en A. Veldhoen, „Pasturi destructie: ontwikkeling van een nieuwe slibvoorbehandelingsmethode,” STOWA , Amersfoort, 2015.
- [2] F. Raposo, V. Fernandez-Cegri, M. A. De la Rubia, R. Borja, F. Beline, C. Cavinato, G. Demirer, B. Fernandez, M. Fernandez-Polanco, J. C. Frigon, R. Ganesh, P. Kaparaju, J. Koubova, R. Mendez, G. Menin, A. Peene, P. Scherer, M. Torrijos, H. Uellendahl, I. Wierinck en V. de Wilde, „Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study,” *J Chem Technol Biotechnol*, nr. 86, pp. 1088-1098, 2011.
- [3] D. Deublein en A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction*, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [4] L. Appels, J. Baeyens, J. Degreve en R. Dewil, „Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge,” *Progress in Energy and Combustion Science*, pp. 755 - 781, August 2008.
- [5] U. Tezel, M. Tandukar en S. G. Pavlostathis, „Anaerobic Biotreatment of Municipal Sewage Sludge,” in *Comprehensive Biotechnology*, 2nd Edition red., vol. 6, M. Moo-Young, Red., Amsterdam, Elsevier, 2011, pp. 447-461.
- [6] H. Carrere, C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Batstone, J. P. Delgenes, J. P. Steyer en I. Ferrer, „Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review,” *Journal of Hazardous Materials*, pp. 1-15, July 2010.
- [7] R. Uma Rani, S. Adish Kumar, S. Kaliappan, I-T. Yeom en J. Rajesh Banu, „Low temperature thermo-chemical pretreatment of dairy waste activated sludge for anaerobic digestion process,” *Bioresource Technology*, nr. 103, pp. 415-424, 2012.
- [8] J. Lu, „Optimization of anaerobic digestion of sewage sludge thermophilic anaerobic pre-treatment,” Lyngby, 2006.
- [9] C. Park, C. Lee, S. Kim, Y. Chen en H. A. Chase, „Upgrading of Anaerobic Digestion by Incorporating Two Different Hydrolysis Processes,” *Journal of Bioscience and Bioengineering*, nr. 2, pp. 164-167, 2005.
- [10] A. Carvajal, M. Peña en S. Pérez-Elvira, „Autohydrolysis pretreatment of secondary sludge for anaerobic digestion,” *Biochemical Engineering Journal*, nr. 75, pp. 21-31, 2013.
- [11] H. Ge, P. D. Jensen en D. J. Batstone, „Pre-treatment mechanisms during thermophilic-mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge,” *Water Research*, nr. 44, pp. 123-130, 2010.

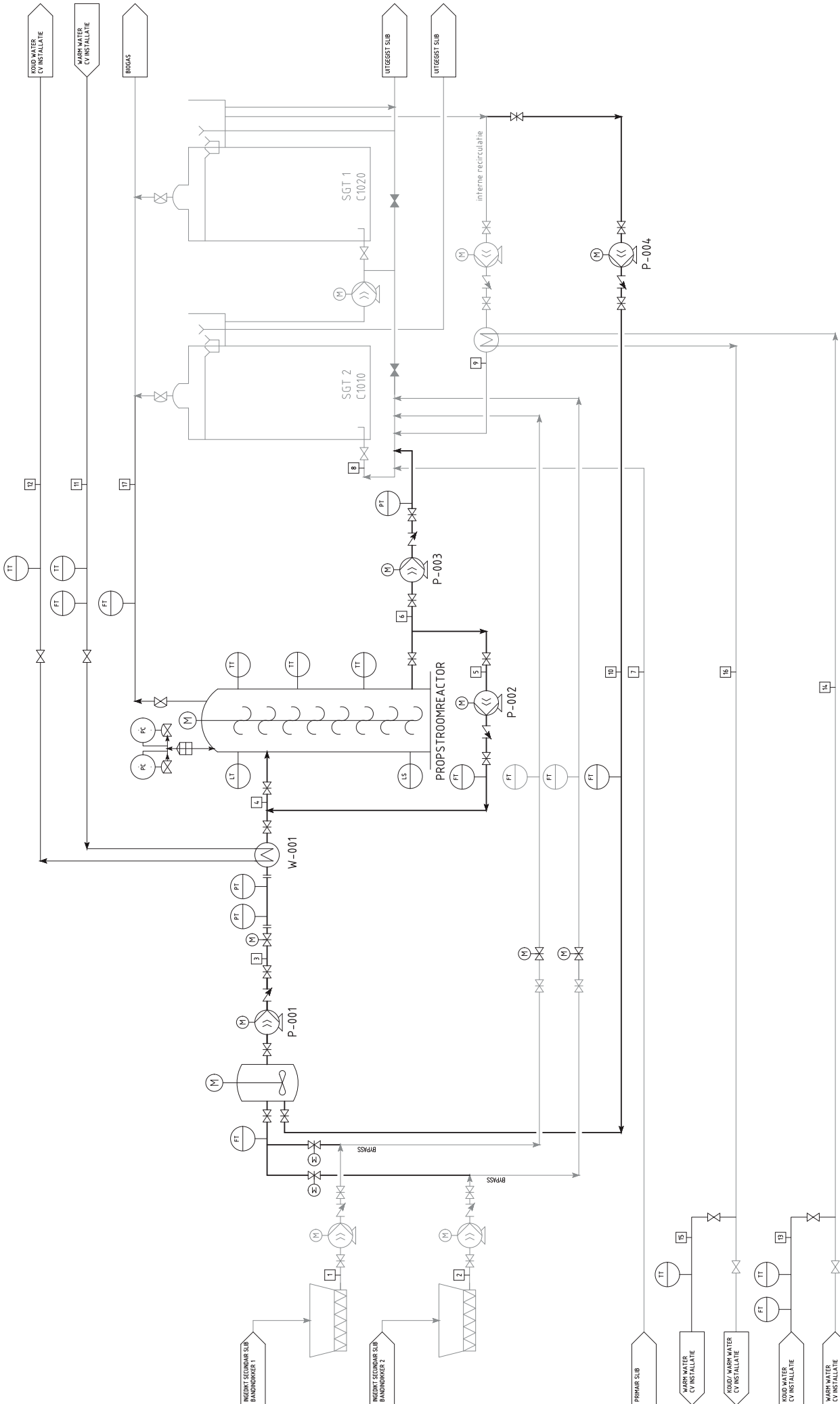
- [12] R. Borja, „Biogas Production,” in *Comprehensive Biotechnology*, 2nd Edition red., vol. 2, M. Moo-Young, Red., Amsterdam, Elsevier, 2011, pp. 785-798.
- [13] P. Foladori, S. Tamburini en L. Bruni, „Bacteria permeabilisation and disruption caused by sludge reduction technologies evaluated by flow cytometry,” *Water Research*, nr. 44, pp. 4888-4899, 2010.
- [14] H. H. Ding, S. Chang en Y. Liu, „Biological hydrolysis pretreatment on secondary sludge: Enhancement of anaerobic digestion and mechanism study,” *Bioresource Technology*, nr. 244, pp. 989 - 995, 2017.
- [15] S. Bungay en M. Abdelwahab, „Monsal Enzymic Hydrolysis - New Developments and Lessons Learnt,” in *13th European Biosolids & Organic Resources Conference & Workshop*, 2008.
- [16] B. Ruffino, G. Campo, G. Genon, E. Lorenzi, D. Novarino, G. Scibilia en M. Zanetti, „Improvement of anaerobic digestion of sewage sludge in a wastewater treatment plant by means of mechanical and thermal pre-treatments: Performance, energy and economical assessment,” *Bioresource Technology*, nr. 175, pp. 298 - 308, 2015.
- [17] B. Ruffino, S. Fiore, C. Roati, G. Campo, D. Novarino en M. Zanetti, „Scale effect of anaerobic digestion test in fed-batch and semi-continuous mode for the technical and economical feasibility of a full scale digester,” *Bioresource Technology*, nr. 182, pp. 302 - 313, 2015.
- [18] P. Winter, C. Gonzalez en S. R. Smith, „The influence of mesophilic temperature over 35C on anaerobic digester performance,” in *17th European Biosolids and Organic Resources Conference*, 2012.
- [19] H. Yi, Y. Han en Y. Zhuo, „Effect of combined pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process,” in *2013 International Symposium on Environmental Science and Technology*, 2013.
- [20] A. Elliott en T. Mahmood, „Pretreatment technologies for advancing anaerobic digestion of pulp and paper biotreatment residues,” *Water Research*, nr. 41, pp. 4273-4286, 2007.
- [21] Yadvika, Santosh, T. R. Sreekrishnan, S. Kohli en V. Rana, „Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - a review,” *Bioresource Technology*, nr. 95, pp. 1-10, March 2004.
- [22] L. A. Fdez.-Guelfo, C. Alvarez-Gallego, D. Sales en L. I. Romero, „The use of thermochemical and biological pretreatments to enhance organic matter hydrolysis and solubilization from organic fraction of municipal solid waste,” *Chemical Engineering Journal*, nr. 168, pp. 249-254, 2011.
- [23] W. Wiegant, “Voorspelling van de biogasproductie en de slibafbraak tijdens slibgisting,” WT-Afvalwater, jaargang 12, nr 2, pp 4-13, april 2012.



# BIJLAGE(N)

**BIJLAGE I**


# PFD THERMFILLY OP RWZI GARMERWOLDE



variabele	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
debiet	144	144	432	600	168	432	192	3024	2400	144
d5 gehalte	6%	6%	7%	7%	7%	7%	5%	5%	5%	5%
droge stofvacht	11.520	11.520	30.240	42.000	11.760	30.240	9.600	152.210	112.370	7.200
Temperatuur winter	20	20	26	45	45	45	20	37	37	37
Temperatuur zomer	8	8	18	45	45	45	8	36	37	37

BIJLAGE II

# CHEN-HASHIMOTOMODEL

		Calculation of biogas production from sewage sludge <b>Input and output values</b>			
project client projectcode date	Thermifilly STOWA GN210-2 25 January 2019	prepared by checked by approved by revision	A. Hofstede MSc Senior Engineer Project Manager	Signature <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>	
<b>INPUT</b>					
Process input		primary sludge	secondary sludge	total	
Total DS in	kg/d	6570,00	6555,00	13125,00	
Chemical sludge	kg/d	-	-	-	
DS excl. chem. sludge	kg/d	6570,00	6555,00	13125,00	
ash-content excl. chem sludge	%	25%	30%	27%	
DS content	%	5%	6%	5,45	
Sludge volume	m3/d	131,40	109,25	240,65	
Organic material in	kg/d	4927,50	4588,50	9516,00	
Minimum SRT (Temperature dependend)	d	2,18	2,18		
Maximum reductie ODS	%	65%	40%	0,53	
Degradation constant	-	1,00	1,50		
Reduction ODS	%	57,9%	33,8%	46,3%	
kg COD/kg ODS	kg/kg	1,80	1,42		
<b>Biogas</b>					
Methane content	%	62%			
Caloric value methane	MJ/m3	36			
Gas flair during peakloads	%	2,5%			
Gas flair during downtime CHP	%	2,5%			
CHP-suppliers margin	%	5%			
Electrical efficiency CHP	%	38%			
Thermal efficiency CHP	%	40%			
Intern biogas consumption	Nm3/d	0,00			
Intern electrical consumption	kWh/year	0,00			
<b>OUTPUT</b>					
Process output		primary sludge	secondary sludge	total	
total ODS out	kg/d	2,074	3,038	5,111	
DS OUT	kg/d	3,716	5,004	8,720	
DS reduction	%	43%	24%	34%	
Methane production	Nm3/d	1,798	771	2,569	
Biogas production	Nm3/d	2,900	1,243	4,143	
biogas / kg degraded ODS	L/kg ods degraded	1,016	802	941	
biogas/kg total supplied DS	L/kg ds supplied	441	190	316	
Net methane production	Nm3/d	1,618	694	2,312	
Caloric potential	MJ/day	2,610	1,119	3,729	
Electricity production CHP	MJ/day	58,100	24,900	83,000	
Thermal production CHP	MJ/day	22,100	9,500	31,500	
Electricity production CHP	MJ/year	8,067,000	3,468,000	11,498,000	
Thermal production CHP	kWh/day	6,100	2,600	8,800	
Electricity production CHP	kWh/year	2,226,500	949,000	3,212,000	
Thermal production CHP	MJ/day	23,200	10,000	33,200	
Electricity production CHP	MJ/year	8,468,000	3,650,000	12,118,000	
Thermal production CHP	kWh/day	6,400	2,800	9,200	
Electricity production CHP	kWh/year	2,352,000	1,014,000	3,366,000	

Model Input			
Minimal SRT	d		2,85
FT mesophilic	-		1,08
FT thermophilic			1,35
Sludge retention time	d		20,00
Temperature	C		37,00
TPH	Chose: Yes/No		No
TPH effect on ODS reduction d%	%		0,00
Biogas retention time	h		3,00

Dimensions		
Digester volume	m3	6100,00
Biogas holder	m3	517,87
CHP	kWe	366,67

## BIJLAGE III

## DROGESTOFBALANS

		1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3a	3b
<b>Slibproductie</b>											
<b>Primair slib uit voorbezinktank</b>											
Primair slib productie	kg ds/d	2920	2920	2920	2920	7300	7300	7300	7300	10667	10667
Primair slib Drogestofgehalte	ds%	2%	2%	2%	2%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	2%	2%
Primair slib Organische drogestofgehalte	ods%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
Primair slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	172	172	172	172	429	429	429	429	627	627
<b>Secundair slib uit nabezinktank</b>											
Secundair slib productie	kg ds/d	2760	2760	2760	2760	6900	6900	6900	6900	24253	24253
Secundair slib Drogestofgehalte	ds%	1%	1%	1%	1%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	1%	1%
Secundair slib Organische drogestofgehalte	ods%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Secundair slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	345	345	345	345	863	863	863	863	3032	3032
<b>Voorindikking</b>											
<b>Primair slib</b>											
Afscheiding	%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Primairslib Drogestofgehalte na indikken	ds%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Primairslib Drogestofvracht na indikken	kg ds/ d	2628	2628	2628	2628	6570	6570	6570	6570	9600	9600
Primairslibafvoer na indikken	m <sup>3</sup> /d	52,56	52,56	52,56	52,56	131,4	131,4	131,4	131,4	192	192
<b>Secundair slibindikking (Bandindikker)</b>											
Afscheiding	%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Secundairslib Drogestofgehalte na indikken	ds%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Secundairslib Drogestofvracht na indikken	kg ds/ d	2628	2628	2628	2628	6570	6570	6570	6570	23040	23040
Secundairslibafvoer na indikken	m <sup>3</sup> /d	53	53	53	53	131	131	131	131	288	288
<b>Polymeerverbruik</b>											
Specifiek polymeergebruik	g PE/ kg ds	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Polymeerverbruik	kg/d	11	11	11	11	28	28	28	28	97	97
Specifiek energieverbruik	kWh/ton ds	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Energieverbruik	MWh.j	45	45	45	45	113	113	113	113	398	398

<b>Thermfilly</b>											
Slib Drogstof vracht	kgds/d	2622	2622	2622	6555	6555	6555	23040			
Secundair slib toevoer	m <sup>3</sup> /d	44	29	29	109	73	73	288			
Extern secundair slib toevoer	m <sup>3</sup> /d		15			36		0			
Recirculatie sliblijn debiet	m <sup>3</sup> /d	22	22	15	55	55	36	144			
Totaal ingaande stroom (incl. recirculatie)	m <sup>3</sup> /d	66	66	44	164	164	109	432			
Tankvolume (effectief)	m <sup>3</sup>	14	14	9	34	34	23	90			
Tankvolume (totaal)	m <sup>3</sup>	17	17	11	43	43	28	113			
Recirculatie debiet Thermfilly intern	m <sup>3</sup> /d	25	25	17	64	64	42	168			
<b>Slibgisting</b>											
Tankvolume aanwezig (benodigd)	m <sup>3</sup>	2500	2500	2500	2500	6100	6100	6100	6100	11400	11400
Tankvolume per tank	m <sup>3</sup>	1250	1250	1250	1250	3050	3050	3050	3050	5700	5700
Gistingsvolume (benodigd)	m <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000	2440	2440	2440	2440	4560	4560
vergister recirculatie tov sec slib input	%	833%	833%	833%	833%	833%	833%	833%	833%	833%	833%
vergister 'interne' recirculatie	m <sup>3</sup> /d	364	364	364	243	910	910	910	607	2400	2400
<b>Slibaanvoer</b>											
Primairslib DS gehalte	ds%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Primairslib DS vracht	kg ds/ d	2628	2628	2628	2628	6570	6570	6570	6570	9600	9600
Primairslib ODS vracht	kg ds/ d	1971	1971	1971	1971	4927,5	4927,5	4927,5	4927,5	7200	7200
Primairslib Debiet	m <sup>3</sup> / d	52,56	52,56	52,56	52,56	131,4	131,4	131,4	131,4	192	192
Secundairslib DS gehalte	ds%	6%	6%	9%	9%	6%	6%	9%	9%	8%	8%
Secundairslib DS vracht	kg ds/ d	2622	2622	2622	2622	6555	6555	6555	6555	23040	23040
Secundairslib ODS vracht	kd ds/ d	1835	1835	1835	1835	4589	4589	4589	4589	16128	16128
Secundairslib Debiet	m <sup>3</sup> / d	44	44	29	29	109	109	73	73	288	288
Totaalslib DS gehalte	ds%	5,5%	5,5%	6,8%	6,4%	5,5%	5,5%	6,8%	6,4%	6,8%	6,8%
Totaalslib ODS gehalte	ods%	72,5%	72,5%	72,0%	72,5%	72,5%	72,5%	72,0%	72,5%	71,5%	71,5%
Totaalslib DS vracht	kg ds/ d	5250	5250	6561	5250	13125	13125	16403	13125	32640	32640
Totaalslib ODS vracht	kg ods/d	3806	3806	4724	3806	9516	9516	11810	9516	23328	23328
Totaalslib ASH vracht	kg ash/d	1444	1444	1837	1444	3609	3609	4592	3609	9312	9312
Totaalslib Debiet	m <sup>3</sup> /d	96	96	96	82	241	241	241	204	480	480
<b>Slibafbraak</b>											
Primair slib toename ods-afbraak	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Secundair slib toename ods-afbraak	%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Totaal extra ods-afbraak	%	4,8%	5,8%	4,8%	4,8%	4,8%	5,8%	4,8%	4,8%	7%	
Primair slib ds-afbraak	%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%
Primair slib ods-afbraak	%	58%	58%	58%	58%	58%	58%	58%	58%	58%	58%
Primair slib ods-afbraak	kg/d	1142	1142	1142	1142	2854	2854	2854	2854	4170	4170
Secundair slib ds-afbraak	%	24%	26%	26%	26%	24%	26%	26%	26%	24%	26%
Secundair slib ods-afbraak	%	34%	37%	37%	37%	34%	37%	37%	37%	34%	37%
Secundair slib ods-afbraak	kg/d	620	682	1024	682	1551	1706	2559	1706	5451	5996
Totaal slib ds-afbraak	%	34%	35%	33%	35%	34%	35%	33%	35%	29%	31%
Totaal slib ods-afbraak	%	46%	48%	46%	48%	46%	48%	46%	48%	41%	44%
Totaal slib ods-afbraak	kg/d	1762	1824	2165	1824	4405	4560	5413	4560	9621	10166

<b>Slibafvoer</b>											
Uitgegist slib Drogestofgehalte	%	3,2%	3,1%	4,3%	3,7%	3,6%	3,1%	4,3%	3,7%	5,0%	4,9%
Uitgegist slib Organisch drogestofgehalte	%	59%	58%	58%	58%	59%	58%	58%	58%	60%	58%
Uitgegist slib Volume	m <sup>3</sup> /d	109,4	109,4	109,4	91,92	240,65	273,50	273,50	229,80	480	480
Totaalslib DS vracht	kg ds/ d	3488	3426	4396	3426	8720	8565	10990	8565	23019	22474
Totaalslib ODS vracht	kg ods/d	2045	1983	2559	1983	5111	4956	6398	4956	13707	13162
Totaalslib ASH vracht	kg ash/d	1444	1444	1837	1444	3609	3609	4592	3609	9312	9312
Totaalslib Debiet	m <sup>3</sup> /d	96	96	96	82	241	241	241	204	480	480
<b>Ontwatering (centrifuge)</b>											
Afscheiding eindontwatering	%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Drogestofgehalte na ontwateren (centrifuge)	%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%
Polymeerverbruik centrifuge	kg/d	56	55	70	55	140	137	176	137	368	360
Energieverbruik centrifuge	kWh/ton ds	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
<b>Afvoer naar slibsilo</b>											
Drogestofvracht	kg ds/d	3418,4	3357,6	4308,0	3357,6	8546	8394	10770	8394	22559	22025
Slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	15	15	19	15	37	36	47	36	98	96
<b>Reductie slibafzet</b>											
Slibafzet in referentie	m <sup>3</sup> /d	15	15	21	15	37	37	51	37	98	98
Slibafzet in scenario	m <sup>3</sup> /d		15	19	15		36	47	36		96
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /d		0,3	1,8	0,3		0,7	4,6	0,7		2,3
Reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /j		96	669	96		241	1.672	241		848

## BIJLAGE IV

## WARMTEBALANS

		1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3a	3b
<b>Input voor warmtebalans</b>											
Thermifilly warmteverlies	W/m2K	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Tankvolume	m3		17	17	11		43	43	28		113
Diameter Thermifilly reactor	m		1	1	1		2	2	2		2
Hoogte Thermifilly reactor	m		13	13	11		18	18	15		24
wandoppervlak thermifilly	m2		43	43	38		60	60	52		86
<b>Gegevens massabalans</b>											
Primairslibafvoer na indikken	m3/d	53	53	53	53	131	131	131	131	192	192
Secundairslibafvoer na indikken	m3/d	44	44	29	29	109	109	73	73	288	288
ecirculatie slibgister 50%	m3/d		22	22	15		55	55	36		144
Extern slib Debiet	m3/ d			15				36			
Recirculatie thermifilly	m3/d		25	25	17		64	64	42		168
<b>Winter</b>											
<b>Uitgangspunten</b>											
Temperatuur primair slib	C	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Temperatuur secundair slib	C	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Temperatuur extern secundair slib	C	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Buitemtemperatuur referentie	C	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
Temperatuur Thermifilly	C		45	45	45		45	45	45		45
Recirculatie temperatuur vergister	C	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Warmteverlies Thermifilly-reactor	kW		1	1	1		1	1	1		2
<b>Voorverwarming Thermifilly</b>											
Temperatuur koude zijde in	C		18	18	18		18	18	18		18
Temperatuur recirculatie thermifilly	C		46	46	46		45	45	45		45
Voorverwarming Thermifilly	GJ/d		8	8	5		19	19	13		50
<b>Voorverwarming gistingstank</b>											
Recirculatie voorverwarming gistingstank	C	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Recirculatie voorverwarming gistingstank	m3/d	364	364	364	243	910	910	910	607	2.400	2.400
Secundair slib debiet	C	8	45	45	45	8	45	45	45	8	45
Secundair slib debiet	m3/d	44	66	66	44	109	164	164	109	288	432
Primair slib na indikken	C	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Primair slib na indikken	m3/d	53	53	53	53	131	131	131	131	192	192
Totaal debiet	m3/d	460	482	482	339	1.151	1.206	1.206	848	2.880	3.024
Gemiddelde temperatuur	C	31	35	35	34	31	35	35	34	32	36
Voorverwarming gistingstank	GJ/d	12	4	4	5	29	10	10	12	58	9



**Zomer****Uitgangspunten**

emperatuur primair slib	C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Temperatuur secundair slib	C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Temperatuur extern secundair slib	C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Buitentemperatuur referentie	C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Temperatuur Thermifilly	C		45	45	45		45	45	45		45
Recirculatie temperatuur vergister	C	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Warmteverlies Thermifilly-reactor	kW		0,4	0,4	0,3		0,5	0,5	0,4		0,7

**Voorverwarming Thermifilly**

Temperatuur koude zijde in	C		26	26	26		26	26	26		26
Temperatuur recirculatie thermifilly	C		45	45	45		45	45	45		45
Voorverwarming Thermifilly	GJ/d		5	5	4		13	13	9		35

**Voorverwarming gistingstank**

Recirculatie voorverwarming gistingstank	C	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Recirculatie voorverwarming gistingstank	m3/d	364	364	364	243	910	910	910	607	2.400	2.400
Secundair slib debiet	C	20	45	45	45	20	45	45	45	20	45
Secundair slib debiet	m3/d	44	66	66	44	109	164	164	109	288	432
Primair slib na indikken	C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Primair slib na indikken	m3/d	53	53	53	53	131	131	131	131	192	192
Totaal debiet	m3/d	460	482	482	339	1.151	1.206	1.206	848	2.880	3.024
Gemiddelde temperatuur	C	33	36	36	35	33	36	36	35	34	37
Voorverwarming gistingstank	GJ/d	7	2	2	2	17	4	4	6	34	-1

**Warmtekrachtkoppeling**

Netto biogas productie	m3/d	1.491	1.536	1.782	1.536	3.729	3.841	4.456	3.841	7.746	8.139
Elektriciteitsproductie	kWh/d	3.520	3.626	4.207	3.626	8.800	9.064	10.516	9.064	18.281	19.210
Toename elektriciteitsproductie	kW	-	4	29	4	-	11	72	11	-	39
WKK warmteproductie	MJ/d	13.280	13.678	15.870	13.678	33.200	34.196	39.675	34.196	68.971	72.472
Warmteproductie gemiddeld	GJ/d	13	14	16	14	33	34	40	34	69	72
Warmteoverschot winter	GJ/d	2	2	4	4	4	5	10	9	11	14
Warmteoverschot zomer	GJ/d	6	7	9	8	16	17	22	20	35	38

**Thermifilly**

Voedingspomp Thermifilly	kW		1,4	1,4	1,0		3,6	3,6	2,4		9,5
Recirculatiepomp Thermifilly	kW		0,2	0,2	0,1		0,4	0,4	0,3		1,1
Voedingspomp gistingstank	kW		0,5	0,5	0,4		1,3	1,3	0,9		3,5
Recirculatiepomp gegist slib	kW		0,0	0,0	0,0		0,1	0,1	0,1		0,2
Menger Thermifilly	kW		1,1	1,1	1,1		2,2	2,2	2,2		5,8
Menger homogenisatietank	kW		0,1	0,0	0,1		0,1	0,1	0,1		0,3
<b>Totaal elektriciteitsgebruik</b>	<b>kW</b>		<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>2,6</b>		<b>7,7</b>	<b>7,7</b>	<b>5,9</b>		<b>20,4</b>

## BIJLAGE V

## FINANCIËLE ANALYSE

		1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3a	3b
<b>Directe bekende bouwkosten</b>											
Warmtewisselaar			€ 26.200	€ 26.200	€ 17.500		€ 53.500	€ 53.500	€ 35.700		€ 141.100
homogenisatietank incl. menger			€ 10.000	€ 10.000	€ 10.000		€ 18.000	€ 18.000	€ 18.000		€ 35.000
Thermifilly tank			€ 28.500	€ 28.500	€ 19.000		€ 41.200	€ 41.200	€ 27.500		€ 82.500
Thermifilly menger			€ 28.500	€ 28.500	€ 24.900		€ 35.000	€ 35.000	€ 30.600		€ 48.400
Voeding gistingstank pomp			€ 8.000	€ 8.000	€ 8.000		€ 10.000	€ 10.000	€ 10.000		€ 14.000
Recirculatie vergist slib pomp			€ 5.000	€ 5.000	€ 5.000		€ 6.000	€ 6.000	€ 6.000		€ 8.000
Thermifilly interne recirculatie pomp			€ 5.000	€ 5.000	€ 5.000		€ 6.000	€ 6.000	€ 6.000		€ 8.000
Leidingwerk en appendages			€ 98.000	€ 98.000	€ 98.000		€ 98.000	€ 98.000	€ 98.000		€ 140.000
Civiel			€ 27.700	€ 27.700	€ 25.400		€ 33.900	€ 33.900	€ 30.900		€ 43.000
Bekende directe bouwkosten W			€ 209.200	€ 209.200	€ 187.400		€ 267.700	€ 267.700	€ 231.800		€ 476.900
Bekende directe bouwkosten E			€ 315.000	€ 315.000	€ 315.000		€ 315.000	€ 315.000	€ 315.000		€ 315.000
Bekende directe bouwkosten C			€ 27.700	€ 27.700	€ 25.400		€ 33.900	€ 33.900	€ 30.900		€ 43.000
Totaal bekende directe bouwkosten			€ 551.900	€ 551.900	€ 527.800		€ 616.600	€ 616.600	€ 577.600		€ 834.900
Totale bouwkosten			€ 767.100	€ 767.100	€ 733.600		€ 857.100	€ 857.100	€ 802.900		€ 1.160.500
<b>Totale investering</b>			<b>€ 1.227.300</b>	<b>€ 1.227.300</b>	<b>€ 1.173.700</b>		<b>€ 1.371.300</b>	<b>€ 1.371.300</b>	<b>€ 1.284.600</b>		<b>€ 1.856.800</b>
<b>Jaarlijkse kosten</b>											
<b>Voorindikker</b>											
Elektriciteitsgebruik	MWh/jaar	45	45	45	45	113	113	113	113	398	398
kosten elektriciteit	€/jaar	4.600	4.600	4.600	4.600	11.400	11.400	11.400	11.400	39.900	39.900
PE gebruik	kg/dag	11	11	11	11	28	28	28	28	97	97
PE kosten	€/jaar	19.100	19.100	19.100	19.100	47.600	47.600	47.600	47.600	167.100	167.100
Kosten voorindikker	€/jaar	23.600	23.600	23.600	23.600	58.900	58.900	58.900	58.900	207.000	207.000
<b>Thermifilly</b>											
Energieverbruik pompen	MWh/jaar		19	19	13		47	47	32		125
Energieverbruik mengers	MWh/jaar		10	10	10		20	20	20		53
Kosten elektrisch gebruik	€/jaar		3.000	2.900	2.300		6.800	6.800	5.200		17.900
<b>WKK</b>											
Elektriciteitsproductie	MWh/jaar	1.300	1.400	1.600	1.400	3.300	3.400	3.900	3.400	6.700	7.100
	€/jaar	-128.500	-132.400	-153.600	-132.400	-321.200	-330.900	-383.900	-330.900	-667.300	-701.200
Overschot warmte WKK	GJ/jaar	1.500	1.600	2.400	2.100	3.700	4.000	6.000	5.300	8.400	9.500
Baten warmte aardgasequivalent	€/jaar	-23.100	-24.700	-37.300	-32.800	-57.800	-62.400	-94.000	-82.800	-131.000	-149.700
WKK totale baten	€/jaar	-151.600	-157.000	-190.800	-165.200	-379.000	-393.300	-477.800	-413.600	-798.300	-850.800

<b>Ontwatering</b>											
Polymeerverbruik centrifuge	kg/dag	56	55	70	55	140	137	176	137	368	360
Energieverbruik centrifuge	MWh/jaar	160	160	200	160	390	380	490	380	1.010	990
Kosten PE	€/jaar	96.200	94.500	121.200	94.500	240.400	236.100	302.900	236.100	634.400	619.400
Kosten elektrisch	€/jaar	15.300	15.100	19.300	15.100	38.200	37.600	48.200	37.600	100.900	98.500
<b>slibafvoer</b>											
Slibafvoer rwzi	m <sup>3</sup> /dag	15	15	19	15	37	36	47	36	98	96
kosten slibeindverwerking (variabel + vast)	€/ton ontw. slib	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
kosten slibverwerking	€/jaar	434.000	426.300	547.000	426.300	1.085.000	1.065.700	1.367.400	1.065.700	2.864.000	2.796.200
afvoer slib extern als niet verwerkt	m <sup>3</sup> /d			6				14			
kosten alternatief slibverwerking	€/jaar			-166.500				-416.100			
<b>Onderhoudskosten</b>											
onderhoudskosten W	€/jaar		10.500	10.500	9.400		13.400	13.400	11.600		23.900
onderhoudskosten E	€/jaar		7.900	7.900	7.900		7.900	7.900	7.900		7.900
onderhoudskosten C	€/jaar		200	200	200		200	200	200		300
<b>Annuiten</b>											
annuiteit C	€/jaar		1.200	1.200	1.100		1.500	1.500	1.300		1.800
annuiteit W	€/jaar		17.300	17.300	15.500		22.100	22.100	19.100		39.300
annuiteit E	€/jaar		26.000	26.000	26.000		26.000	26.000	26.000		26.000
<b>totaal kapitaallasten</b>	<b>€/jaar</b>		<b>44.300</b>	<b>44.300</b>	<b>42.400</b>		<b>49.400</b>	<b>49.400</b>	<b>46.300</b>		<b>67.000</b>

## BIJLAGE VI

# ACHTERGRONDEN LABONDERZOEK

Voor het onderzoek met de continu-reactoren zoals beschreven in hoofdstuk 2 en om input te leveren voor de praktijkinstallatie en businesscases zijn er meerdere deelonderzoeken uitgevoerd op labschaal. Deze deelonderzoeken worden in dit hoofdstuk nader beschreven.

## VI.1 METINGEN EN MEETNAUWKEURIGHEDEN

De wens in ieder onderzoek is om zoveel mogelijk data te verzamelen gedurende een experiment om hypothesen te kunnen toetsen. Het is echter zaak om vooraf te bepalen of deze data ook significante informatie kan opleveren waarop conclusies getrokken kunnen worden. Om deze reden is er gekeken naar de reproduceerbaarheid van bestaande meetmethodes, de nauwkeurigheid van de meetmethodes en de altijd aanwezige variaties vanuit het materiaal.

### VI.2.1 T-N, CZV, DS EN ODS

Bij de afbraak van secundair slib komt gebonden stikstof vrij in de vloeistoffase van het slib. Deze kan gemeten worden door het stikstofgehalte (T-N) te meten van het centraat van het gistingsslib. Om deze reden wordt deze parameter in onderzoeken ook gebruikt als extra verificatie om de afbraak van secundair slib te kunnen bepalen. Het is mogelijk om vooraf te berekenen wat de nauwkeurigheid moet zijn van bestaande meetmethoden om deze analyse te kunnen doen.

In de gangbare methodes voor batch-gistingen, zoals de protocollen van AMPTS<sup>1</sup> en VDI 4630<sup>2</sup>, wordt een mengverhouding gehanteerd van 1:1 tot maximaal 4:1 op basis van het organisch droge stofgehalte uit gistingsslib, ten opzicht van het organisch droge stofgehalte uit het substraat. Dit, om te waarborgen dat het slib goed afgebroken wordt en de resultaten representatief zijn. Het gistingsslib van Garmerwolde heeft een relatief hoge concentratie T-N, circa 1.600 – 1.800 mg/L. Het secundaire slib van Garmerwolde, wat als voedingsmateriaal gebruikt wordt in dit onderzoek, bevat circa 1.000 mg/L zoals ook te zien is in Tabel VI.1. In Tabel VI.1.1 is uitgerekend wat de verhoudingen van massa en T-N zijn voor een batch voor en na de gisting, bij een mengverhouding van 1:1. In de laatste kolom is aangegeven hoe hoog de T-N meting kan worden als er door een Thermfilly behandeling 30% extra afbraak van secundair slib plaatsvindt.

TABEL VI.1 T-N GEHALTE VAN EEN BATCHGISTING, BIJ EEN VERHOUDING VAN 1:1 OP ODS BASIS

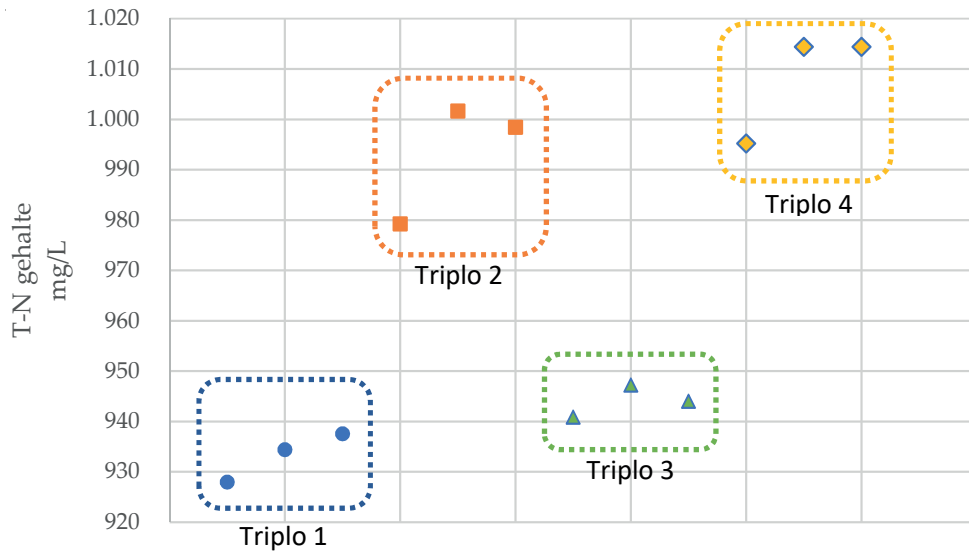
	DS %	ods %	Massa in batch (gram)	T-N gehalte in mg/L		
				Voor gisting	Na gisting	Na gisting (+30% afbraak)
SS aandeel	10%	79%	61,2	322	580	657
GS aandeel	5%	60%	128,8	1.220	1.220	1.220
Totaal			190,0	1.542	1.800	1.877

- 1 Automatic Methane Potential Test System van BioProcess Control
- 2 Technische richtlijn 4630 van Verein Deutsche Ingenieure

Met behulp van standaard metingen via een cuvetten-test van Hach is het T-N gehalte bepaald van een onbehandeld slibmonster. Om de spreiding van monsternamen en analyse te kunnen meten is er viermaal een monster genomen, om deze vervolgens in triplo te meten. Hiervoor is uiterste zorg gedragen dat het slib goed gemengd is, en dat alle monsters gelijk behandeld zijn. De resultaten staan weergegeven in Figuur VI.1.

FIGUUR VI.1

CONCENTRATIE T-N IN HETZELFDE SUBSTRAAT, GEMETEN ALS TRIPLO 'S VAN VIER MONSTERNAMES; CIRKEL, EERSTE MONSTERNAMES; VIERKANT,



Het gemiddelde van de eerste triplo-meting geeft de laagste waarde aan van 928 mg/L T-N. Het gemiddelde van de laatste triplo meting geeft de hoogste waarde aan met een T-N gehalte van 1.014 mg/L. Het verschil in T-N gehalte in eenzelfde slibmonster kan hiermee 9,3% uit elkaar liggen. Wanneer twee unieke metingen verricht worden van het slib, zal het gemiddelde een nauwkeurigheid hebben van  $\pm 4,4\%$ . Uit Tabel VI.1 is op te maken dat bij een maximaal verwachte afbraak, het T-N gehalte met 4,2% toe kan nemen van 1.800 mg/L naar 1.877 mg/L. Deze toename is met een zeer gestandaardiseerde meetmethode niet nauwkeurig genoeg te meten in een batchgisting.

Deze zelfde analyses zijn uitgevoerd voor CZV-, droge stof-, en organisch droge stofgehalten. Hierbij is een vergelijkbaar beeld te zien, waarbij de gevraagde nauwkeurigheid van de standaard meetmethodes en apparatuur niet voldoende is op batch-schaal om afbraak aan te kunnen tonen.

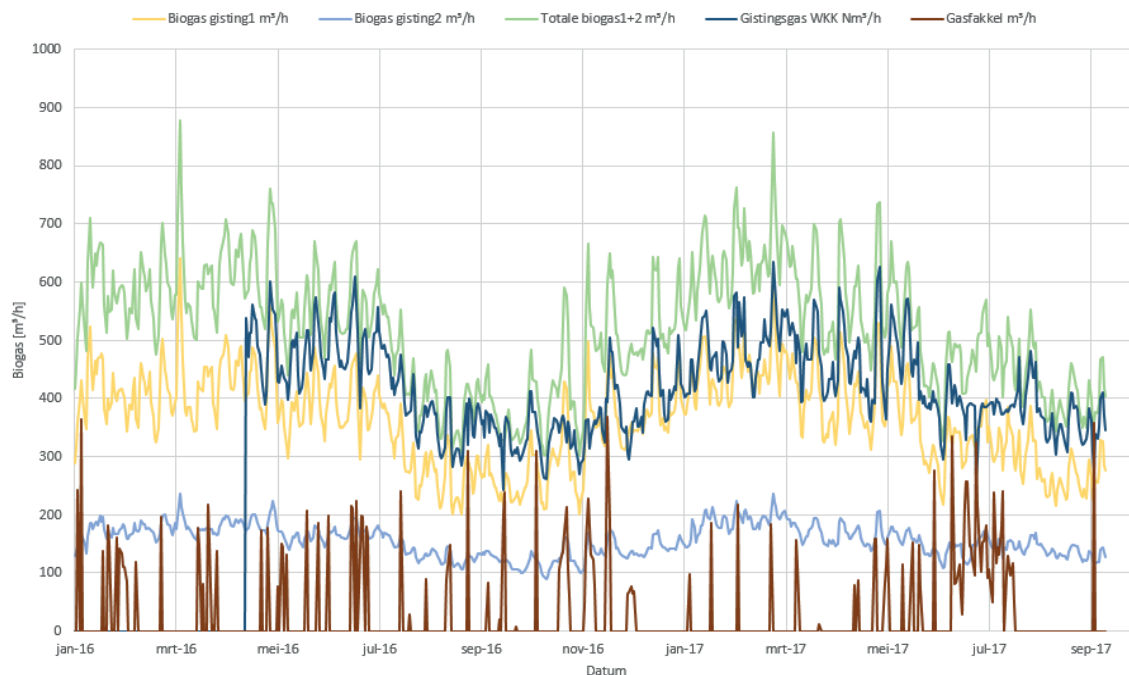
### VI.2.2 BIOGASPRODUCTIE

In het Pasturi-destructie onderzoek is er gedurende meerdere maanden getest met secundair slib, waarbij voor ieder experiment slib is gebruikt wat minder dan drie dagen oud was. Gedurende dit onderzoek kwam naar voren dat bij de batchgistingen het niet mogelijk is om kwantitatief de gasopbrengsten te vergelijken, doordat het referentie-materiaal beter of slechter vergistbaar is gedurende de tijd. Binnen het huidige Thermfilly onderzoek is hier extra aandacht aan besteed om te onderzoeken hoe groot de variatie in biogasopbrengst is vanuit slib, en wat de invloed hiervan is.

Om te beginnen is er een sterke seizoensinvloed zichtbaar bij de vergister van Garmerwolde, zoals te zien is in Figuur VI.2. Vanaf januari t/m mei is de natgasproductie ca. 600 m<sup>3</sup>/u terwijl dit van juli t/m oktober ca. 400 m<sup>3</sup>/u is bij eenzelfde gemiddelde voedingsnelheid en droge-

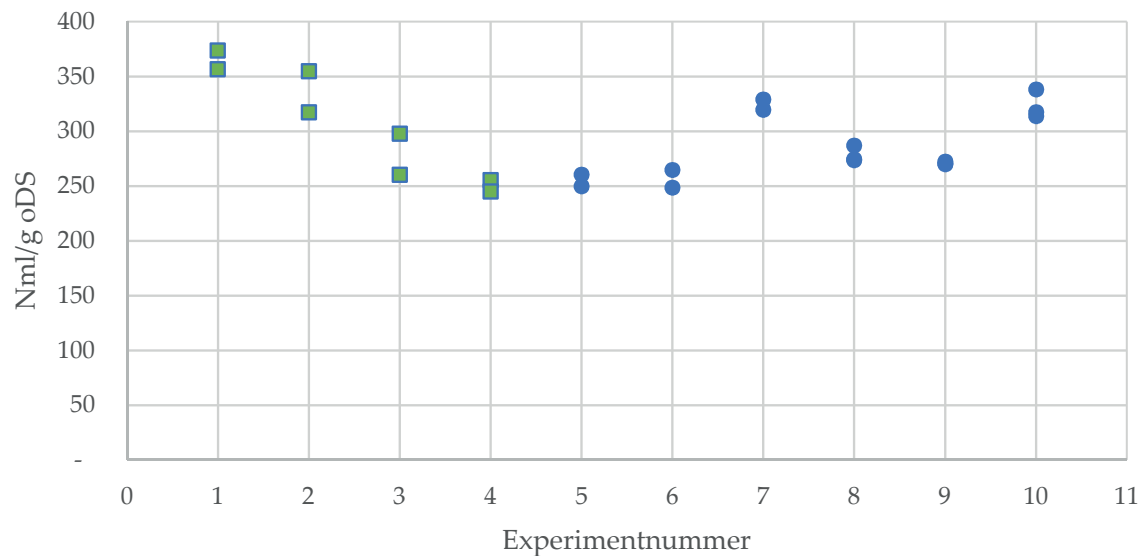
stofgehalte van dik secundair slib. Daarnaast is ook een wisseling te zien in de biogasopbrengst over een dag en gedurende een week, door variaties in het slib.

FIGUUR VI.2 BIOGASDEBIETEN VAN GARMERWOLDE OVER DE TIJD



Dit patroon is ook zichtbaar wanneer alle gemeten biogasopbrengsten van onbehandeld slib van de periode juni t/m november 2017 worden vergeleken, zoals te zien is in Figuur VI.3. De eerste reeks experimenten, aangegeven met een groen vierkant, zijn experimenten waar gebruik gemaakt wordt van een herhaalexperiment. De tweede reeks experimenten, aangegeven door een blauwe stip, is één experiment verdeeld over twee tot drie flessen.

FIGUUR VI.3 SPREIDING EN VARIATIE IN BIOGASOPBRENGSTEN GEDURENDE DE EXPERIMENTEN REEKS TUSSEN JUNI EN NOVEMBER 2017: GROENE VIERKANTEN, EXPERIMENTENREEKS OP RUG; BLAUWE STIPPEN, EXPERIMENTEN MET AMPTS BIJ HANZEHOGESCHOOL GRONINGEN EN DELFLUENT



Uit de resultaten zijn meerdere conclusies te trekken. Te zien is dat er gedurende de experimentenreeksen een wisselende biogasopbrengst uit het slib te halen is. Hieruit valt op te maken dat het vergelijken van biogasopbrengst met andere experimenten in de literatuur en uit eerdere STOWA onderzoeken in absolute zin niet mogelijk is. Daarnaast is te zien dat bij beide meetmethodes een spreiding in de biogasopbrengst te verwachten is van  $\pm 2\%$  tot  $\pm 9\%$ . Dit betekent tevens dat een toename in biogasopbrengst significant hoger moet liggen dan bij een batchexperiment om een verhoging van de maximale afbraak aan te tonen.

Deze spreiding valt binnen het bereik dat in de literatuur aangehaald wordt voor biomassa. In een recent (2011) internationaal onderzoek onder 16 verschillende universiteiten en onderzoekslaboratoria blijkt voor meerdere organische componenten de gemiddelde spreiding in biogasproductie te liggen op  $\pm 10\%$ . (Raposo, et al., 2011)

Binnen het Thermfilly onderzoek betekent deze informatie het volgende:

- Biogasopbrengst wordt uitgedrukt in een percentage toe- of afname, ten opzichte van het onbehandelde referentie monster om experimenten met elkaar te kunnen vergelijken
- Een behandelingsmethode onderzocht via batchgistingen moet tenminste 10% meer biogas produceren, als ondergrens, om met zekerheid te kunnen stellen dat dit door de behandelingsmethode veroorzaakt wordt.

### VI.3 MATERIAAL EN METHODE / DOEL EN OPZET OVERIGE EXPERIMENTEN

#### VI.3.1 BATCHEXPERIMENTEN

##### DOEL EN TOEPASSINGSGEBIED

Uit het Pasturi-onderzoek is gebleken dat de maximale vergistbaarheid van een voorbehandelingsmethode niet goed te voorspellen is door CZV-metingen, en dat alleen het daadwerkelijk vergisten van het materiaal uitsluitend kan geven. Voor de selectie van de optimale temperatuur en verblijftijdcombinatie voor het Thermfilly proces betekent dit dat iedere combinatie door middel van een gisting onderzocht dient te worden. Voor optimale vertaling naar de praktijksituatie heeft het de voorkeur om alle varianten middels continu-gistingen te onderzoeken. Dit vergt echter een dusdanige investering in tijd en/of apparatuur dat dit niet economisch te verantwoorden is. Om deze reden wordt met behulp van batchgistingen kwalitatief beoordeeld welke varianten interessant zijn om op continubasis verder te onderzoeken.

Fermentatie-onderzoeken op batchschaal geven informatie over het volgende (naar VDI 4630):

- Bepaling van de potentiële biogasopbrengst en/of de potentiële anaerobe afbraakpotentie van een substraat
- Kwalitatieve bepaling van de anaerobe afbraaksnelheid van een substraat
- Kwalitatieve bepaling van mogelijke remmende effecten van het substraat bij wisselende concentraties

Fermentatie-onderzoek op deze schaal geeft nadrukkelijk **geen** voorspellende informatie voor het volgende (naar VDI 4630):

- Processtabiliteit in reactoren die continu gevoed worden met het substraat dat onderzocht wordt
- Biogasopbrengst onder praktijkomstandigheden vanwege mogelijke versterkende of verzwakkende combinatie-effecten
- De grenzen van de toelaatbare organische vracht

Daarnaast is de uitkomst van fermentatie-onderzoek sterk afhankelijk van het volgende (naar VDI 4630):

- De microbiologische activiteit van het te gebruiken entmateriaal (inoculant), wat op zijn beurt afhankelijk is van de temperatuur, bewaarcondities, leeftijd, samenstelling en efficiëntie van het actieve materiaal
- Gehanteerde verzameling van biogasproductiegegevens en de juiste evaluatie hiervan

Dit betekent tevens dat bij het vergelijken van biogasopbrengsten uit andere experimenten rekening gehouden dient te worden met het gebruikte substraat, de gehanteerde vergistingsmethode en het protocol.

### OPZET

De batch-fermentatieproeven zijn gebaseerd op meerdere bestaande protocollen: een “bellenteller” voor kwantitatief fermentatieonderzoek geproduceerd door het National Centre for Biotechnology Education (NCBE) van de University of Reading; een protocol van het Verein Deutscher Ingenieure, VDI 4630, voor het vaststellen van de vergistbaarheid van organisch materiaal; en het AMPTS systeem van BioProcess Control. Tijdens het onderzoek is contact gezocht met zowel de Hanzehogeschool Groningen als Delfuent Services B.V. die in het bezit zijn van een AMPTS systeem. Op deze systemen is parallel-onderzoek uitgevoerd voor verdere verificatie van de onderzoeksresultaten.

Met behulp van batch-gistingen worden de volgende temperatuur- en verblijftijdscombinaties getest:

TABEL VI.2

MATRIX MET IN TE ZETTEN EXPERIMENTEN

	2 uur	4 uur	6 uur
45 °C	x	x	x
50 °C	x	x	x
55 °C	x	x	x
60 °C	x	x	x

Dit brengt het aantal te onderzoeken Thermfilly varianten in eerste instantie op 12. Uit de onderzoeksresultaten van de eerste reeks gistingproeven zal blijken of 6 uur behandeling ook onderzocht dient te worden voor de tweede reeks. Bij deze proeven zal ent-materiaal uit de continu-gisting gebruikt worden.

In verband met mogelijk bijmengen van behandeld slib of gistingsslib zal in de eerste reeks gistingen ook gekeken naar de invloed hiervan op de biogasproductie. Hiervoor zal het substraat van 9% d.s. verdund worden tot 6% d.s. met slib uit de gistingreactor. Dit heeft een behandeling ondergaan van vier uur bij 55 °C om vervolgens volgens standaardprotocol vergist te worden. Dit is vergeleken met gistingsslib wat eenzelfde behandeling is ondergaan gedurende vier uur op 55 °C. Dit behandelde gistingsslib is ingezet worden volgens standaard protocol.

Er zijn proeven ingezet met onbehandeld slib die dienen als referentie voor de biogasproductie. Daarnaast zijn er blanco experimenten ingezet met alleen “uitgehongerd” gistingsslib om eventuele achtergrondproductie van biogas uit te kunnen sluiten.

Dit brengt het totaal te onderzoeken varianten op 16 waarbij alles in duplo getest is.



## GEHANTEERDE METHODEN EN APPARATUUR

Op basis van het eerdergenoemde systeem van NCBE is een nieuw systeem ontwikkeld tijdens het Pasturi-project wat meerdere gistingen in de tijd kan bijhouden. Dit systeem is doorontwikkeld aan de Rijksuniversiteit Groningen op basis van aanvullingen uit VDI 4630 en het AMPTS protocol. De teller maakt gebruik van een waterslot gevuld met vloeistof waar een infraroodsensor op geplaatst is. Wanneer voldoende gas is gevormd, verplaatst het zich als een bel door het waterslot waar deze door de infraroodsensor gedetecteerd wordt. Het volume van iedere gasbel is een functie van de dimensies van het systeem, zoals de grootte van het waterslot en het gekozen werkvolume. Het signaal van de sensor wordt gestuurd naar een Arduino DUE die zo maximaal 63 tellers, en dus gistingen, kan bijhouden in de tijd. De gegevens van de gistingen worden via de Arduino aan een computer doorgegeven waar het met een tijdstip wordt gekoppeld en opgeslagen in een .csv-bestand.

Het batchprotocol voor de fermentaties is gebaseerd op VDI 4630 wegens gebrek aan standaardisaties in de bestaande literatuur, waardoor resultaten uit batchgistingen ook slecht vergelijkbaar zijn over meerdere onderzoeken. Door licentiebeperkingen kunnen de details niet openbaar gemaakt worden van het protocol: het document is in te zien bij de Rijksuniversiteit Groningen. De belangrijkste richtlijn is de noodzaak om het gebruikte entmateriaal eerst door een uithongeringsfase te laten gaan om te zorgen dat het entmateriaal geen biogasproductie van zichzelf teweeg kan brengen, wat ook in het AMPTS protocol wordt gehanteerd. Daarnaast wordt de verhouding van organisch materiaal van het substraat ten opzichte van het entmateriaal op 1:3 gehouden.

Als fermentatiereactors zijn glazen flessen gebruikt van 250 ml. Als entmateriaal is gistingsslib gebruikt uit eigen continu reactors dat gegroeid is op secundair slib van rwzi Garmerwolde. Slib, behandeld of onbehandeld, is op basis van de droge stof fractie gemengd met entmateriaal. De reactors zijn vervolgens gevuld met 180 gram materiaal, afgesloten met een waterslot met sensor en geplaatst in een waterbad van 37 °C voor mesofiele gisting.

De bellentellers zijn geijkt met behulp van een zogenaamde syringe pump, waarbij nauwkeurig het debiet van een gas kan worden gedoseerd. Bij verschillende debieten blijkt iedere bel in het huidige systeem 380 µL gas te bevatten. Deze gasvolumes worden vervolgens terugerekend naar standaardcondities, volgens rekenmethodes gehanteerd in VDI 4630 en het AMPTS protocol.

Het AMPTS systeem maakt gebruik van glazen flessen van 500 ml die continu geroerd worden. Het protocol schrijft voor dat een enkel experiment wordt uitgevoerd, waarna dit over drie flessen wordt verdeeld waarvan de gasproductie gemeten wordt. Dit is nadrukkelijk anders dan een standaard duplo of triplo. Bij een standaard duplo of triplo, wordt een experiment twee (duplo) of drie (triplo) keer afgewogen, uitgevoerd en ingezet. Om deze reden dienen de AMPTS experimenten opgevat te worden als één experiment per reeks. In het standaard protocol wordt tevens CO<sub>2</sub> afgevangen zodat alleen de methaan-productie gemeten kan worden.

FIGUUR VI.4 BATCHREACTOR MET BELLENTELLER



FIGUUR VI.5 HET AMPTS SYSTEEM VAN BIOPROCESS CONTROL



### INGEZETTE EXPERIMENTEN

Gedurende de periode juni t/m augustus 2017 zijn op het lab van de Rijksuniversiteit Groningen batch-experimenten uitgevoerd. In Tabel VI.3 staat een overzicht van de onderzochte temperatuur- en verblijftijdscombinaties.

TABEL VI.3 INGEZETTE EXPERIMENTEN MET BEHULP VAN BELLENTELLERS

Experiment	Periode	Temperatuur	Tijd (uren)	Herkomst slib	Bijzonderheden
Orig. Labonderzoek	Juni	45, 50 °C	2, 4, 6	GMW	Biogas, duplo
Reeks 1	Juli	45, 50, 55, 60 °C	2, 4, 6	GMW	Biogas, duplo
Reeks 2	Augustus	45, 50, 55, 60 °C	2, 4, 6	GMW	Biogas, duplo
Reeks 3	Augustus	45, 50, 55, 60 °C	2, 4, 6	GMW	Biogas, duplo

Tevens is er tijdens het onderzoek contact gezocht met Delfluent Services B.V. en de Hanzehogeschool Groningen, die beide gebruik maken van het AMPTS systeem om afbraak van substraten te bepalen. In Tabel VI.4 staan de experimenten weergegeven die met dit systeem zijn ingezet.

TABEL VI.4 INGEZETTE EXPERIMENTEN MET BEHULP VAN AMPTS

Experiment	Periode	Thermifilly variant		Herkomst slib	Bijzonderheden
		Temperatuur	Tijd (uren)		
AMPTS 1	Augustus	50 °C	4	GMW	Biogas en methaan, duplo
AMPTS 2	Juli	55 °C	1, 2, 3, 4, 5, 24	HNP	Methaan, solo
AMPTS 3	Juli	55 °C	2, 4, 6	GMW	Methaan, solo
AMPTS 4	Juni	55 °C	4	HNP	Methaan, solo, GS <sup>1</sup>
AMPTS 5	November	45 °C	2, 4, 6	HNP	Methaan, solo
AMPTS 6	November	55 °C	2, 4, 6	HNP	Methaan, solo

<sup>1</sup>GS = in dit experiment is gistingsslib meebehandeld

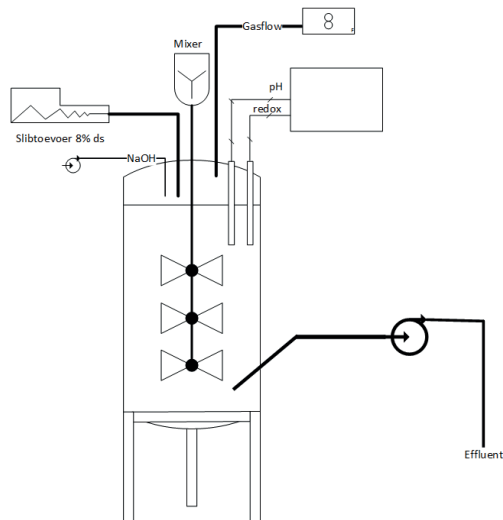
### VI.3.2 CONTINU-EXPERIMENTEN TOT SEPTEMBER 2018, 40 LITER SCHAAL

Gedurende de laboratoriumproeven zijn twee continu gistingen actief. De eerste wordt gevoed met secundair slib, en de tweede wordt gevoed met behandeld slib. De gehanteerde behandeling wordt gebaseerd op de resultaten van de batch-gistingen. De biogasproductie van beide reactoren zal continu gemonitord worden gedurende de gehele periode. Hieruit zal blijken of iedere toename in biogasproductie ook over de tijd constant blijft, of dat dit toe- of afneemt door een verandering in de samenstelling van de gistingbacteriën. Daarnaast zal periodiek het slib worden geanalyseerd uit beide reactoren met behulp van droge stof, asrest en vrij-N-bepalingen.

In twee identieke continu gistingen is onderzocht of er bij een verblijftijd van 20 dagen een toename te zien is in de biogasopbrengst van thermisch behandeld secundair slib ten opzichte van onbehandeld secundair slib. De reactoren zijn in getest en verder ontwikkeld tussen juni 2017 en september 2018 waarbij regelmatig grote aanpassingen zijn gedaan aan de apparatuur, mengverhouding en het pompmechanisme om te komen tot stabiele continu voeding van de reactoren.

De reactoren hebben een werkvolume van 40 liter en worden continu gemengd bij 100 RPM. Met behulp van continue pH- en redox-metingen van Consort worden de gistingen bewaakt om te voorkomen dat er ongewenste zuurstofintrede plaatsvindt door lekkages, of dat de reactor verzuurt door overvoeding of andere problemen. Verzuring van de reactoren is niet voorgekomen, waardoor de dosering van NaOH niet nodig bleek. Deze is daarom uiteindelijk verwijderd. De reactoren worden op 37 °C gehouden door middel van een verwarmingslint met temperatuurregeling (Figuur VI.6).

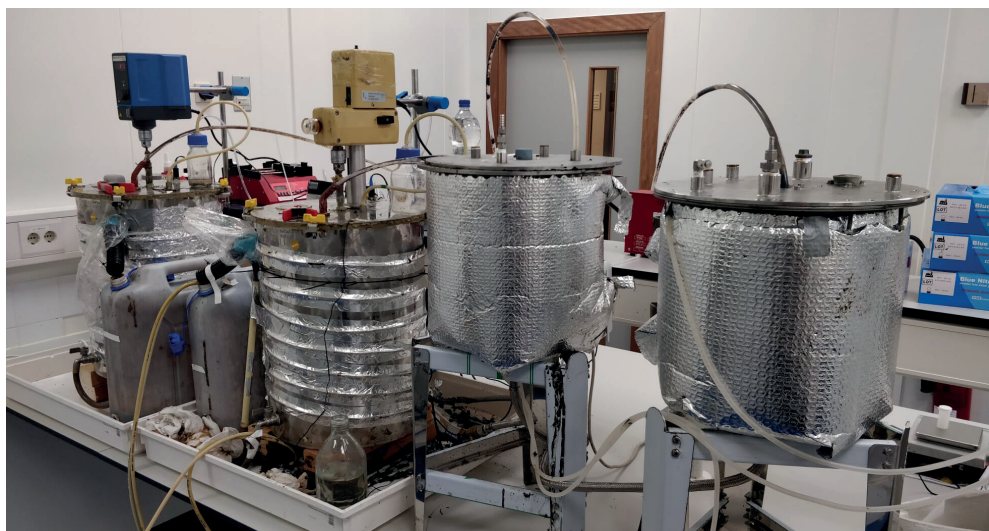
FIGUUR VI.6 DE OPSTELLING VAN DE CONTINU REACTOREN SCHEMATISCH (LINKS) EN IN DE PRAKTIJK (RECHTS) MET ROERWERK, GASUITVOER, PH- EN REDOXMETING EN GISTINGSSLIB OPVANG



Het geproduceerde gas wordt via de bovenkant van de reactor afgevoerd en gemeten via een MilliGasCounter van Ritter die gevuld is met een HCl-oplossing om ervoor te zorgen dat al het geproduceerde biogas gemeten wordt. De data van de gasteller wordt digitaal opgeslagen in een database zodat de gasproductie in de tijd gevolgd kan worden.

De voedingsvaten worden met een watermantel op 6 °C gehouden. Vanuit het voedingsvat wordt het materiaal door een slang met een grote diameter aangezogen en in de reactor gepompt vlakbij het roerwerk. Gistingsslib van de reactor wordt aan de onderkant van de reactor afgevoerd door middel van een stijgbuis waarmee het vloeistofniveau in de reactor constant gehouden wordt.

FIGUUR VI.7 DE VOORRAADVATEN (RECHTS) MET KOELMANTEL VAN WAARUIT DE CONTINU REACTOREN (LINKS) WORDEN GEVOED



Wekelijks is vers secundair slib opgehaald bij rwzi Garmerwolde, afkomstig van de bandindikker voordat het de gisting in wordt gepompt. Om het slib verpompbaar te houden is dit slib verdund van 8 – 10% DS tot 6% DS met leidingwater, en vervolgens behandeld of onbehandeld bijgemengd met gistingsslib. De gehanteerde mengverhouding is 12 l voedingslib op 6% DS met 4 l gistingsslib.

## VI.4 RESULTATEN OVERIGE EXPERIMENTEN

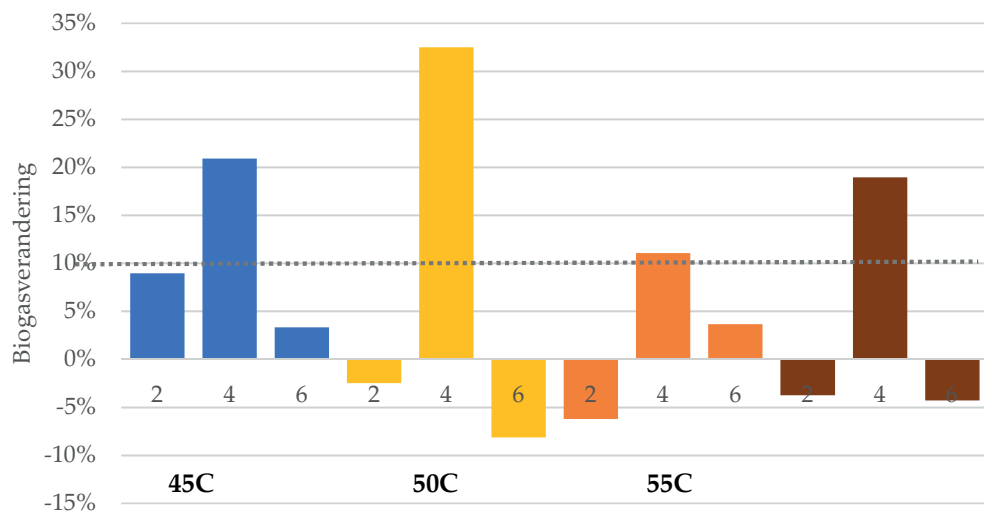
### VI.4.1 BATCHEXPERIMENTEN

Zoals beschreven, geven batchgistingen een indicatie over de maximale biogaspotentie, en een kwalitatieve indicatie over de afbraaksnelheid van het substraat. In deze sectie worden de resultaten uit de batchgistingen opgedeeld in de invloed op de biogaspotentie, en de invloed op de afbraaksnelheid. De resultaten worden weergegeven als relatieve toe- of afname ten opzichte van het referentiemateriaal. De minimale biogastoename die nodig is voor een verbetering van slibafbraak, is aangegeven als een grijze stippellijn bij 10%.

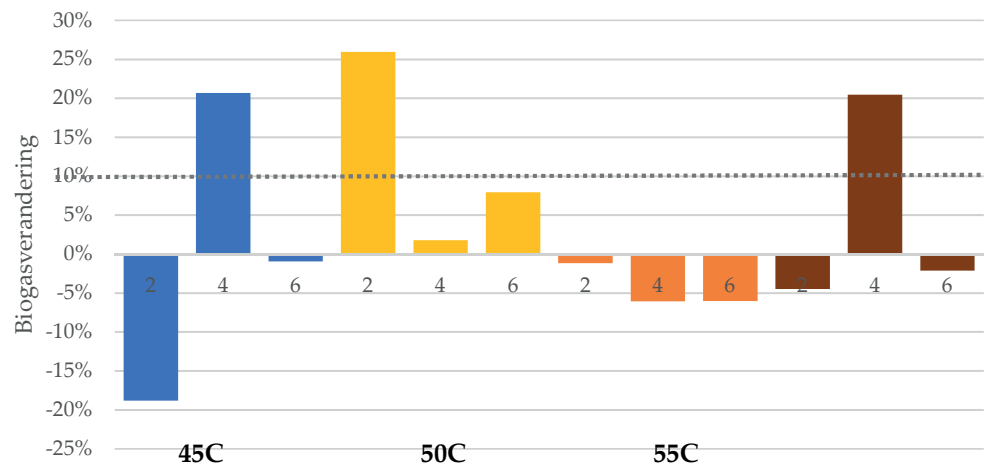
#### INVLOED BEHANDELINGSTIJD OP BIOGASPOTENTIE

In Figuur VI.8, Figuur VI.9 en Figuur VI.10 staan de relatieve biogasopbrengsten van de verschillende voorbehandelingsmethoden weergegeven. In het blauw staat een behandeling op 45°C, geel 50°C, oranje 55°C, bruin 60°C. Op de horizontale as staat de behandeltijd op de genoemde temperatuur.

FIGUUR VI.8 RELATIEVE BIOGASSTOENAME BIJ VERSCHILLENDE TEMPERATUREN EN VERBLIJFTIJDEN - REEKS 1

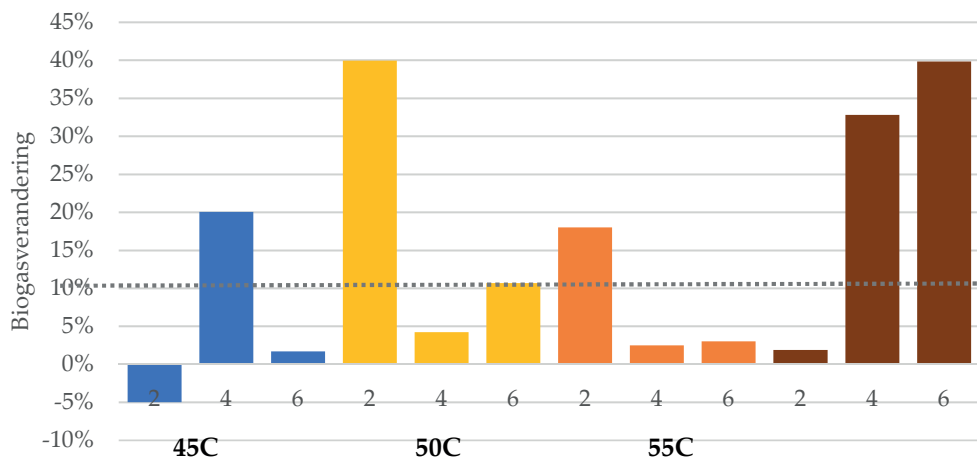


FIGUUR VI.9 RELATIEVE BIOGASSTOENAME BIJ VERSCHILLENDE TEMPERATUREN EN VERBLIJFTIJDEN - REEKS 2



FIGUUR VI.10

RELATIEVE BIOGASTOENAME BIJ VERSCHILLENDE TEMPERATUREN EN VERBLIJFTIJDEN - REEKS 3

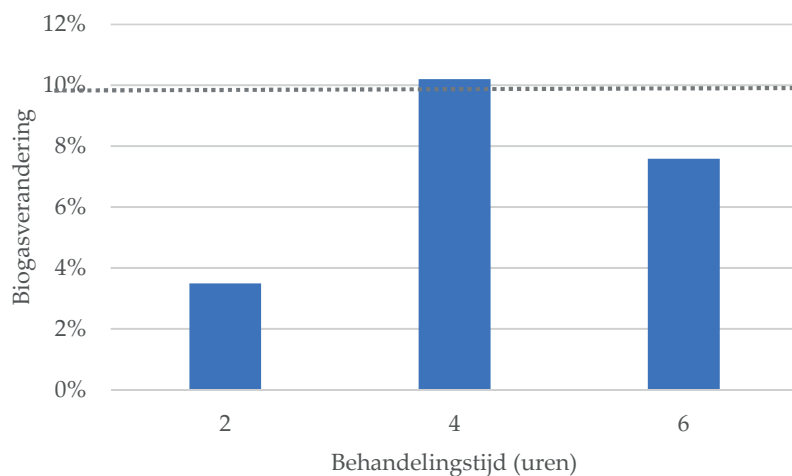


De biogasopbrengsten laten gezamenlijk een gevarieerd beeld zien. De behandelingen op 45°C gedurende vier uur, en 60°C gedurende vier uur laten beide een toename boven 10% zien, over zes experimenten. Voor de andere temperaturen en verblijftijden wordt de ene keer meer, en de andere keer minder biogas geproduceerd.

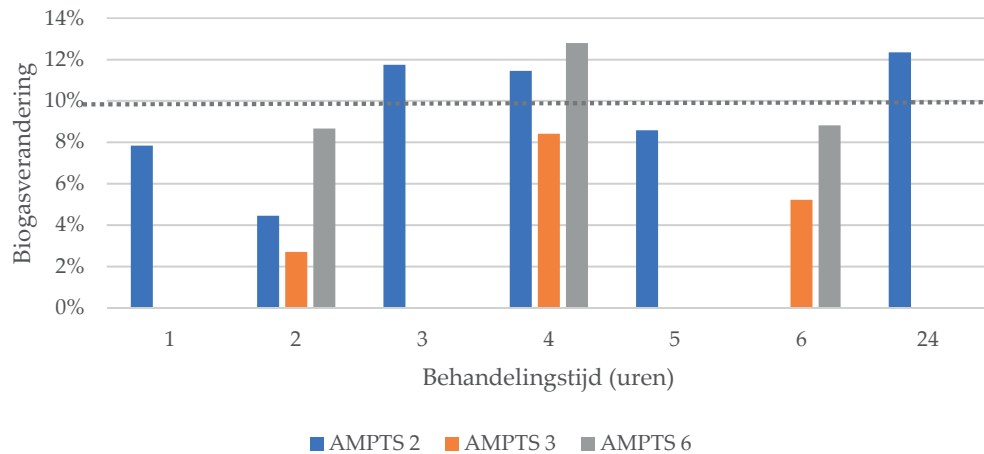
Met behulp van het AMPTS systeem is daarnaast nader gekeken naar de effecten van de behandelingsduur bij 45°C en 55°C (de variant uit het Pasturi-destructie onderzoek). De resultaten hiervan staan weergegeven in Figuur VI.11 en Figuur VI.12.

FIGUUR VI.11

RELATIEVE BIOGASTOENAME BIJ EEN BEHANDELING OP 45°C - AMPTS 5



FIGUUR VI.12 RELATIEVE BIOGASTOENAME BIJ EEN BEHANDELING OP 55°C – AMPTS 2, 3, 6



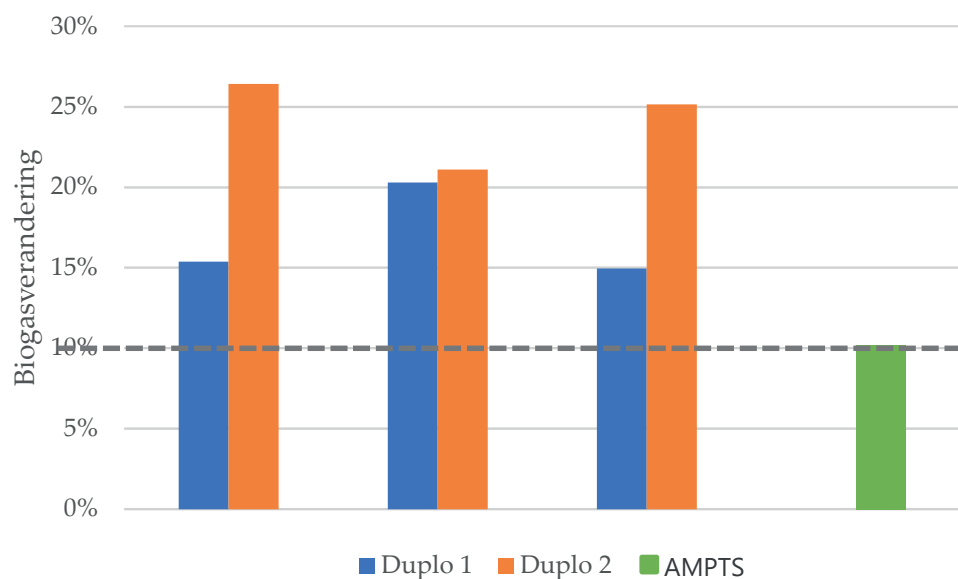
Voor zowel een behandeling op 45°C als op 55°C lijkt er bij langere behandelingstijd een toename op te treden in de biogasopbrengst. Na vier uur behandeling lijkt deze bij beide temperaturen weer af te nemen, om vervolgens bij een verblijftijd van 24 uur weer toe te nemen op 55°C.

Er lijkt een optimum te bestaan, relatief onafhankelijk van temperatuur bij een behandeltijd van ongeveer 4 uur. Bij beide AMPTS overzichten wordt echter de minimale toename van 10% amper bereikt, waardoor er niet met zekerheid gezegd kan worden dat de maximale afbraak toeneemt door de onderzochte voorbehandelingstijden.

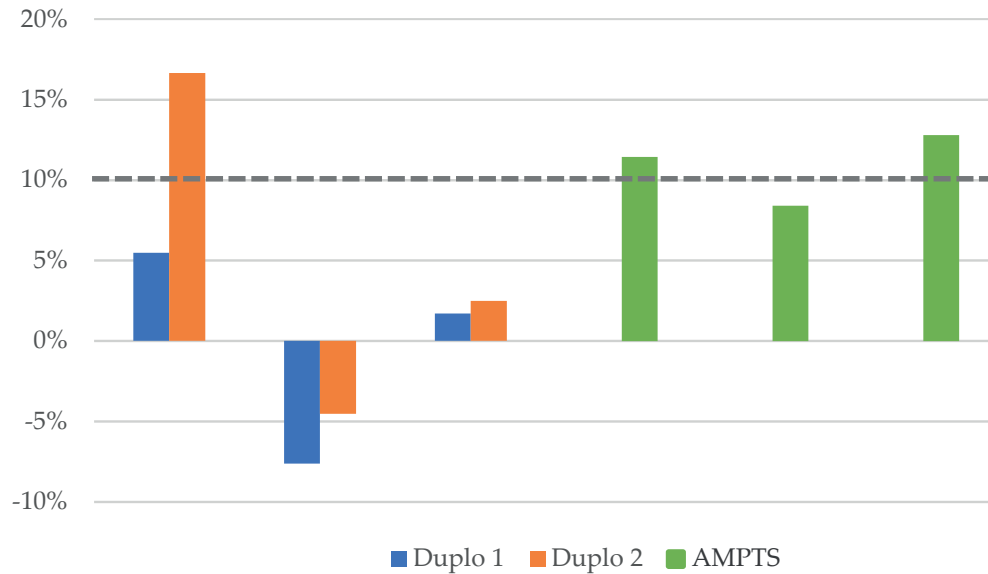
#### INVLOED BEHANDELTEMPERATUUR OP BIOGASPOTENTIE

In deze sectie wordt nader ingegaan op de invloed van de behandelingstemperatuur op de maximaal haalbare biogasopbrengst. Dit wordt gedaan door te kijken naar de resultaten over alle experimenten, en deze te vergelijken bij dezelfde behandelingstijd van vier uur. Deze resultaten staan weergegeven in Figuur VI.13, Figuur VI.14, Figuur VI.15 waarin de 10% minimale opbrengstlijn ook is aangegeven.

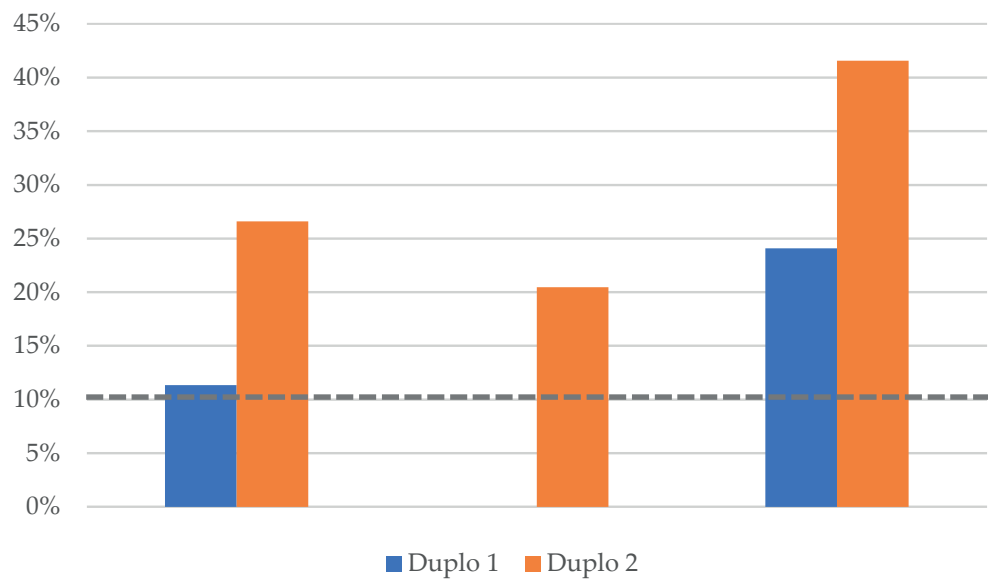
FIGUUR 7.13 RELATIEVE BIOGASOPBRENGST BIJ EEN BEHANDELING OP 45°C, 4 UUR



FIGUUR VI.14 RELATIEVE BIOGASOPBRENGST BIJ EEN BEHANDELING OP 55°C, 4 UUR



FIGUUR VI.15 RELATIEVE BIOGASOPBRENGST BIJ EEN BEHANDELING OP 60°C, 4 UUR; IN DE 2E REEKS IS DE GASMETING VAN DUPLO 1 LOSGERAAKT EN HIER BUITEN BESCHOUWING GELATEN



In de eerste reeksen met duplo-experimenten geven de behandelingstemperaturen 45°C en 60°C herhaaldelijk meer biogas ten opzichte van het onbehandelde monster. Bij 55°C lijkt dit effect minder sterk. Wanneer hier ook gekeken wordt naar de AMPTS resultaten wordt voor zowel 45°C als 55°C amper de grens van 10% toename in biogas bereikt. Dit houdt in dat er geen significante verandering lijkt op te treden in de maximale afbraak van het slib. Dit houdt tevens in, dat wanneer onbehandeld slib bij een oneindig lange verblijftijd in een gisting gehouden kan worden, de Thermfilly behandeling geen effect zal hebben. Deze situatie komt in de werkelijkheid echter zelden voor, omdat deze niet economisch is.

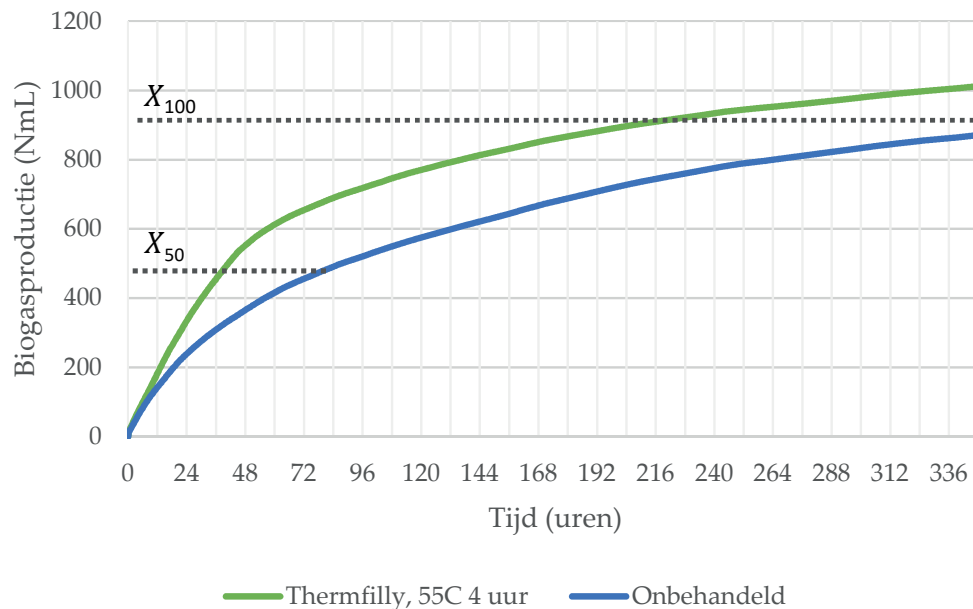
#### INVLOED BEHANDELING OP AFBRAAKSNELHEID

Bij batchgistingen is het tevens mogelijk om te onderzoeken wat de kwalitatieve verschillen zijn in afbraaksnelheid van een bepaald substraat of behandelingsmethode. In deze sectie wordt hier verder aandacht aan geschonken. Er is gekeken naar het verschil in afbraaksnel-



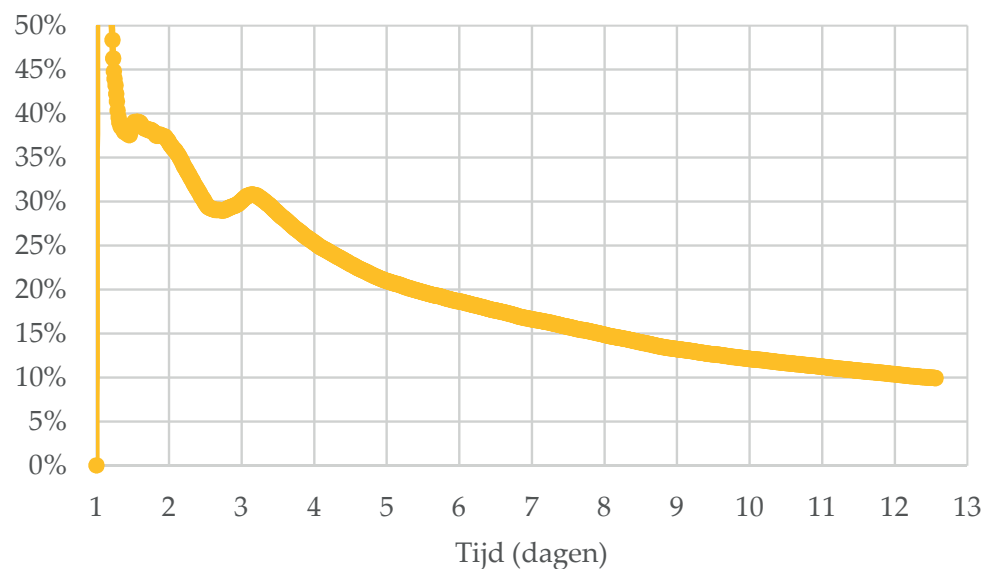
heid tussen een behandeld substraat, en die van het onbehandelde referentie substraat. Om het verschil te illustreren wordt in Figuur VI.16 het verloop van twee batchgistingen weergegeven. De groene lijn is de cumulatieve biogasproductie van slib dat een behandeling is ondergaan bij 55°C gedurende vier uur. De blauwe lijn is onbehandeld slib welke als referentie dient.

FIGUUR VI.16 CUMULATIEVE BIOGASPRODUCTIE VERGELEKEN VAN DE AMPTS METINGEN VOOR DE THERMFILLY BEHANDELING EN DE ONBEHANDELDE REFERENTIE

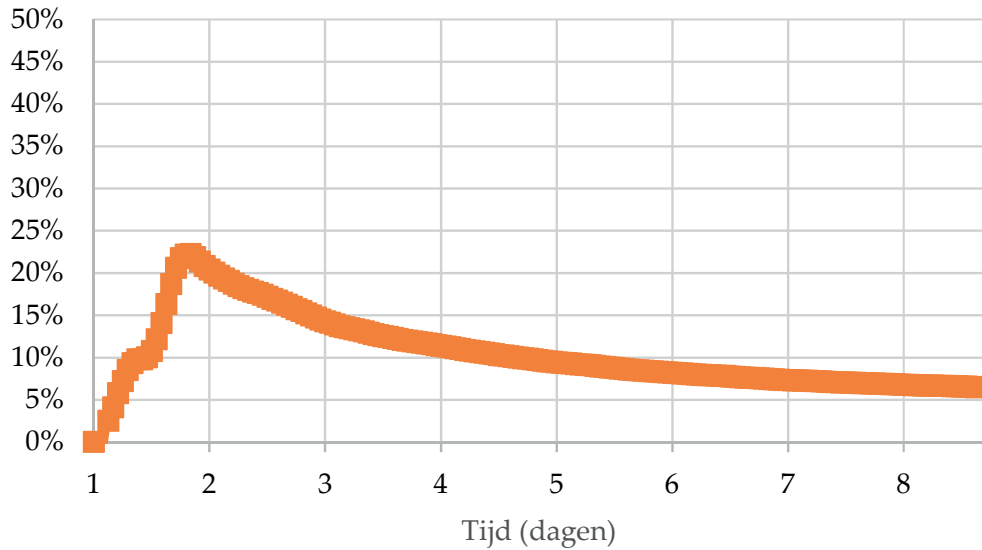


In Figuur VI.17, Figuur VI.18 en Figuur VI.19 is gedurende de loop van de experimenten, de snelheid van gasproductie weergegeven ten opzichte van het onbehandelde slib. Deze overzichten geven aan of een gisting sneller of langzamer verloopt wanneer er van een voorbehandeling gebruik gemaakt wordt.

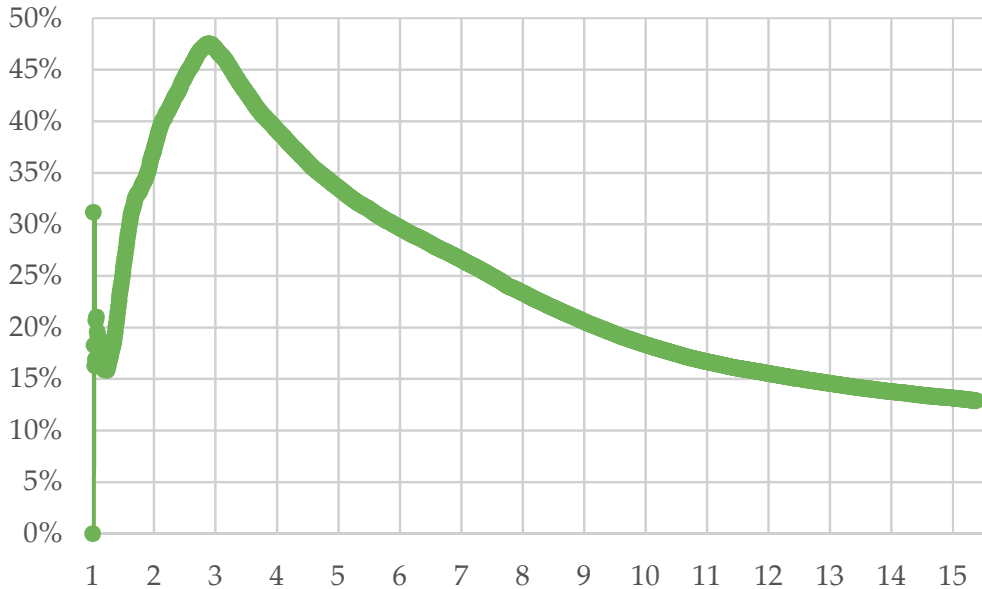
FIGUUR VI.17 RELATIEVE VOORSPRONG GASPRODUCTIE BIJ 45C, 4H



FIGUUR VI.18 RELATIEVE VOORSPRONG GASPRODUCTIE BIJ 50C, 4H



FIGUUR VI.19 RELATIEVE VOORSPRONG GASPRODUCTIE BIJ 55C, 4H



In alle grafieken is te zien dat de gasproductie van de behandelde monsters in de eerste dagen voorloopt op het onbehandelde referentie slib. Dit houdt in dat de afbraak van een behandeld monster in eerste instantie sneller verloopt. Tevens is te zien dat deze voorsprong steeds kleiner wordt gedurende de tijd. Dit houdt in dat wanneer er een oneindig lange verblijftijd gehanteerd kan worden de verschillen tussen behandeld en onbehandeld slib nagenoeg zullen verdwijnen.

Om de invloed op het gistingsproces aan te duiden is gekeken naar het tijdstip waarop 50% van de totale hoeveelheid biogas is geproduceerd vanuit onbehandeld slib, en de tijd die nodig is geweest om de uiteindelijke hoeveelheid biogas te produceren vanuit onbehandeld slib. Dit komt overeen met de lijnen  $X_{50}$  en  $X_{100}$  in Figuur VI.16. Vervolgens wordt vergeleken wanneer dit punt bereikt is voor behandeld slib. Deze resultaten staan in onderstaande tabellen weergegeven.

TABEL VI.5

TIJDSTIP WAAROP RESPECTIEVELIJK 50% EN 100% VAN DE BIOGASPRODUCTIE VAN ONBEHANDELD SLIB IS BEREIKT, BIJ 45°C

	Onbehandeld	45°C, 2 uur	45°C, 4 uur	45°C, 6 uur	
$X_{50}$	57	42	38	38	Uren
$X_{100}$	278	247	201	208	Uren

TABEL VI.6

TIJDSTIP WAAROP RESPECTIEVELIJK 50% EN 100% VAN DE BIOGASPRODUCTIE VAN ONBEHANDELD SLIB IS BEREIKT, BIJ 55°C

	Onbehandeld	55°C, 2 uur	55°C, 4 uur	55°C, 6 uur	
$X_{50}$	74	39	38	38	Uren
$X_{100}$	350	293	253	286	Uren

In de tabellen is te zien dat een thermische voorbehandeling in alle gevallen leidt tot een versnelling van de biogasproductie. Zo bereikt bij 45°C vier uur behandelingstijd de gisting 33% sneller het halverwege punt ( $X_{50}$  in 38 uur in plaats van 57 uur), en wordt de uiteindelijke biogasproductie van onbehandeld slib 27% sneller bereikt. Ditzelfde is te zien bij een behandeling van vier uur bij 55°C, waarbij het halverwege punt ( $X_{50}$ ) 48% sneller wordt bereikt, en de uiteindelijke biogasproduct van onbehandeld slib 27% sneller wordt behaald.

Op basis van deze gegevens blijkt kwalitatief dat de Thermfilly behandeling een versnellende werking blijkt te hebben op de biogasproductie. Op basis van de huidige analyse zou dit een verkorting van de verblijftijd in een gisting kunnen betekenen van 3 tot 4 dagen. Dit kan echter alleen middels continu-onderzoek vastgesteld worden.

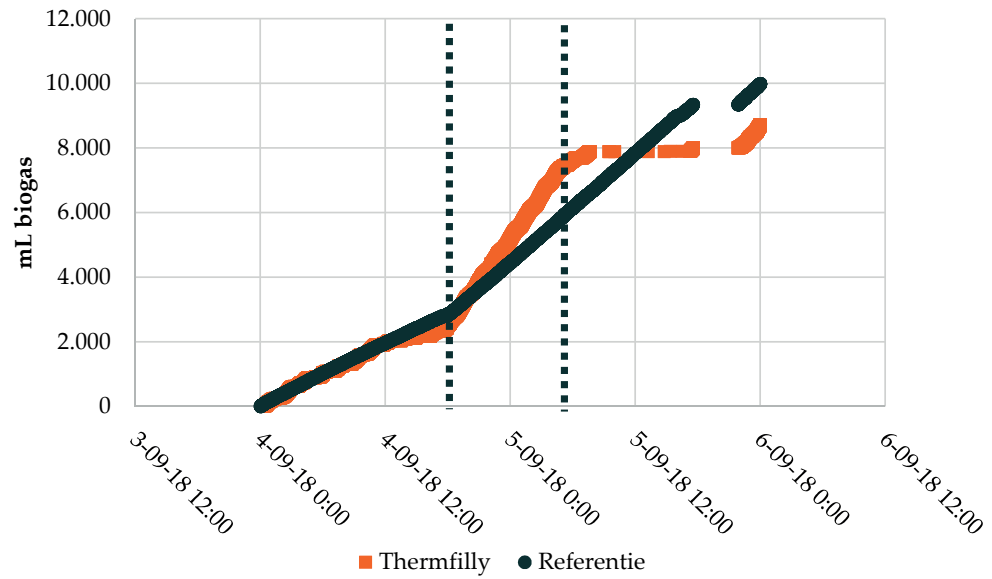
#### VI.4.2 CONTINU EXPERIMENTEN TOT SEPTEMBER 2018, 40 LITER SCHAAL

Er waren grote problemen met het continu voeden van de reactoren op deze schaal. Ondanks alle aanpassingen aan het voedingsmechanisme en de verlaging van het drogestofgehalte zijn deze problemen onverminderd gebleven. Deze problemen zijn het grootst bij de onbehandelde voeding die regelmatig verstoppingen heeft vertoond. Hierdoor is het problematisch gebleken om een goede referentie gasmeting op te zetten waarbij gedurende langere tijd de gasproductie van beide reactoren vergeleken kon worden. Desondanks zijn er zowel kwalitatief als kwantitatief enkele trends zichtbaar in de experimentele gegevens. Op basis hiervan is er tijdens de BC-vergadering van oktober 2018 besloten om op kleinere schaal de metingen voort te zetten. De geconstateerde trends en meetgegevens van de experimenten tot september 2018 worden in deze sectie verder toegelicht.

#### GASPRODUCTIE

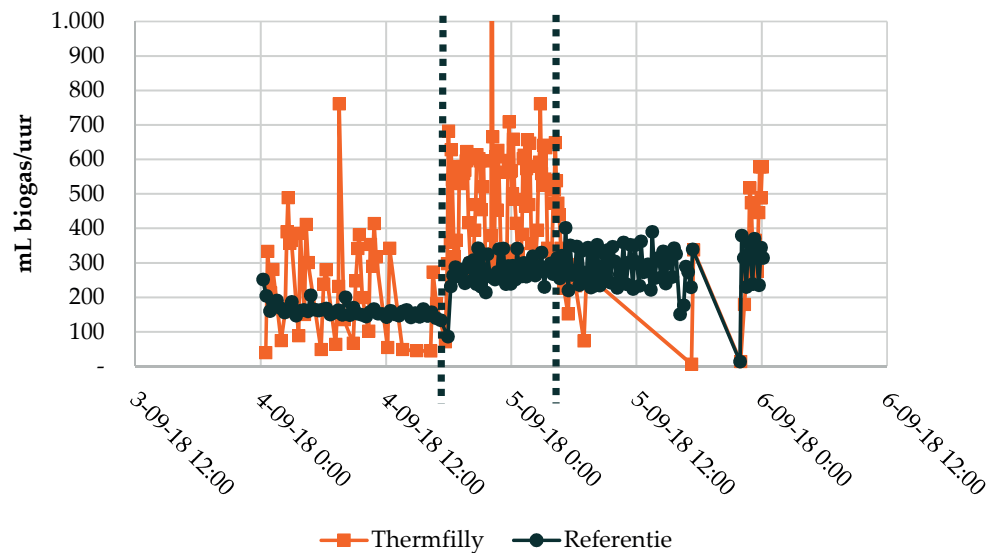
Door afwijkingen in de voeding voor de referentiereactor zijn de momenten waarop de reactoren 1-op-1 met elkaar vergeleken kunnen worden schaars. In Figuur VI.20 is een dergelijk moment weergegeven waarbij de cumulatieve gasproductie van beide reactoren is gevolgd, nadat er een verbetering in het voedingsmechanisme had plaatsgevonden (eerste gemarkeerde streep). De voedingssnelheid van beide reactoren is vanaf deze periode constant gebleven waardoor er een geschikt vergelijk mogelijk is. Bij het tweede gemarkeerde gebied is de voeding voor de Thermfilly reactor opgeraakt, waarna de gasproductie voor deze reactor vrij gauw is afgevlakt.

FIGUUR VI.20 CUMULATIEVE GASPRODUCTIE VAN DE REFERENTIE EN THERMFILLY REACTOREN. DE START VAN HET AANGEGEVEN GEBIED IS HET MOMENT DAT DE VOEDING VOOR BEIDE REACTOREN CONSTANT WAS. HET EINDE VAN HET AANGEGEVEN GEBIED GEEFT HET MOMENT AAN WAAROP DE THERMFILLY VOEDING OP RAAKTE



Tijdens de gemarkeerde periode in bovenstaande figuur is de gasproductie van de Thermifilly reactor 49% hoger dan de referentie. Dit is ook zichtbaar in de gasproductie van de reactoren zoals te zien is in *Figuur 7.21*.

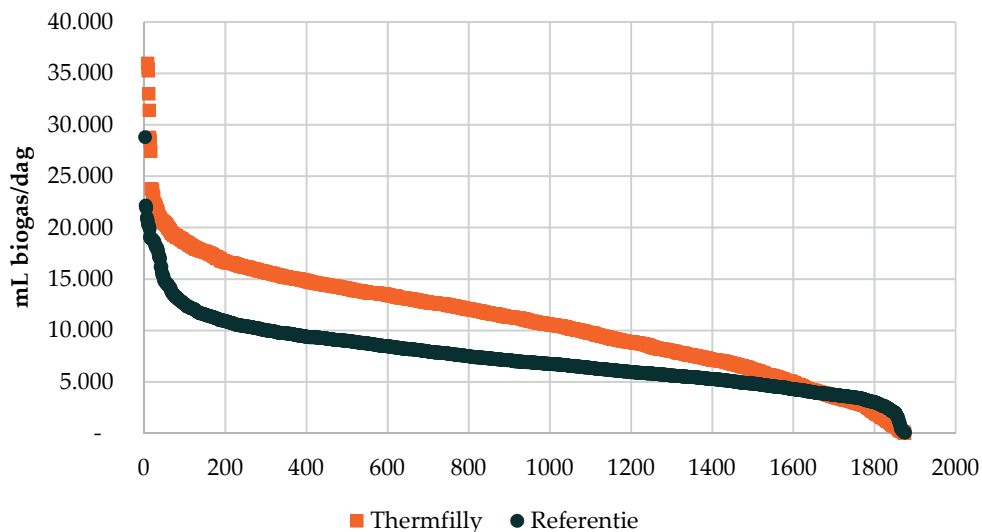
FIGUUR VI.21 PRODUCTIESNELHEID VAN DE REFERENTIE EN THERMFILLY REACTOREN VERGELEKEN. DE START VAN HET AANGEGEVEN GEBIED IS HET MOMENT DAT DE VOEDING VOOR BEIDE REACTOREN CONSTANT WAS. HET EINDE VAN HET AANGEGEVEN GEBIED GEEFT HET MOMENT AAN WAAROP DE THERMFILLY VOEDING OP RAAKTE



Na het verbeteren van het pompmechanisme reageren beide reactoren direct op de constantere toegenomen voeding. De onbehandelde referentie reactor laat een vrij stabiel beeld zien van de gasproductiesnelheid, terwijl de Thermifilly reactor een grilliger beeld laat zien met een forse toename ten opzichte van de referentie.

Om te kijken of er, onafhankelijk van problemen in de voeding van de reactoren, vaker een duidelijke toename in gasproductie zichtbaar is, is in Figuur VI.22 een zogenoemd frequentieplot gemaakt. Hiermee worden de metingen van de gasproductie van beide reactoren geteld en gesorteerd van hoog naar laag. Hierdoor ontstaat een kwalitatief beeld van welke reactor vaker een hoge gasproductie toont.

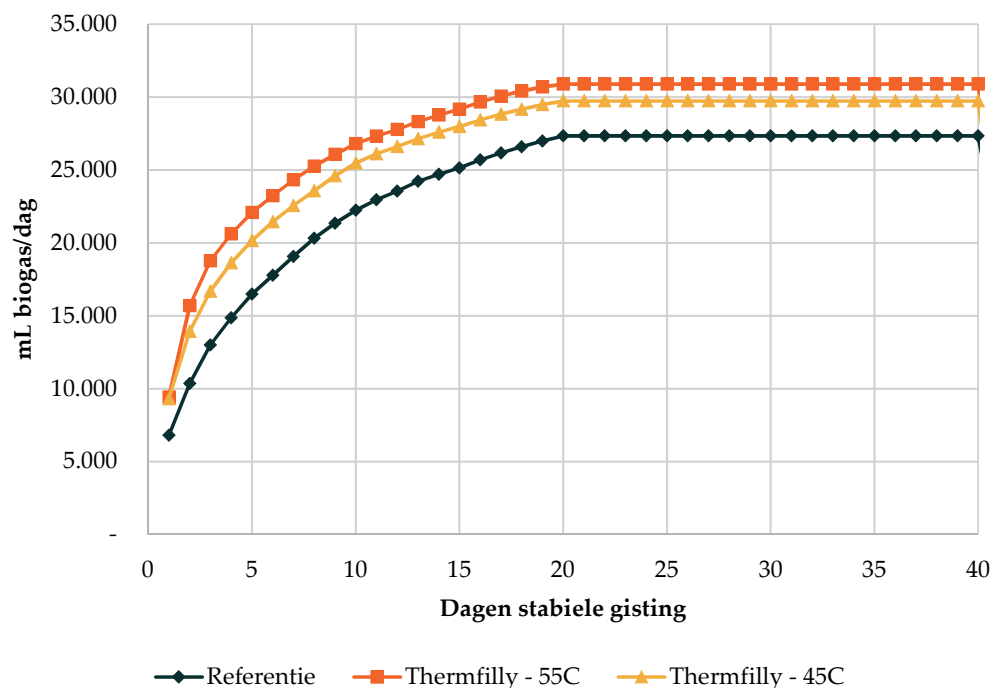
FIGUUR VI.22 FREQUENTIEPLOT GASPRODUCTIE VAN BEIDE REACTOREN. DE BIOGASPRODUCTIE PER UUR IS VERTAALD NAAR DAGELIJKSE GASPRODUCTIE OP BASIS VAN MEEETGEGEVENS GEDURENDE DE EXPERIMENTPERIODE. DE THERMFILLY GASPRODUCTIE IS STELSELMATIG HOGER GEBLEKEN DAN DE REFERENTIE



Opvallend in de figuur is dat Thermfilly over de dataset met regelmaat een hogere gasproductie weergeeft. Wat daarnaast opvalt is dat de gasproductie van beide reactoren lager is dan verwacht zou worden op basis van de batchexperimenten bij deze hoeveelheid voeding. In Figuur VI.23 is weergegeven welke gasproductie verwacht kan worden bij stabiele voeding gedurende langere tijd, op basis van de experimentele batch-data. Wanneer we deze gegevens combineren met de frequentieplot blijkt dat de Thermfilly reaktor slechts 30% van de tijd langer dan twee dagen een stabiele voeding heeft gekregen (gasproductie hoger dan 14.000 ml/dag). Voor de referentie reaktor is dit zelfs maar 10% van de tijd. Dit is een verdere indicatie dat er tijdens de gehele periode zelden een situatie is geweest waarin een individuele reaktor gedurende lange tijd een stabiele voeding heeft gehad.

FIGUUR VI.23

GEModelleerde verwachte gasproductie op basis van de uitgevoerde batchexperimenten bij de gehanteerde HRT van 20 dagen en bijbehorende voedingssnelheid



Voor beide reactoren is geen data beschikbaar van een stabiele situatie met 20 dagen constante voeding. Hierdoor is het niet mogelijk om met deze gegevens uitsluitend te geven over het langdurige effect van de Thermfilly behandeling, of om te staven of de modellering van de batchexperimenten zich rechtstreeks vertaalt naar de praktijksituatie. Uit de continu-metingen in hoofdstuk 2 blijkt echter dat de modellering van de batchgisting met Thermfilly-behandeling op 45 °C gedurende 5 uur goed overeenkomt bij een HRT van 12 dagen.

## VI.5 CONCLUSIE EN DISCUSSIE OVERIGE EXPERIMENTEN

### VI.5.1 BATCHEXPERIMENTEN

#### GEVOLGTREKKINGEN VOOR VAN HET BATCHONDERZOEK VOOR HET CONTINU-ONDERZOEK EN OPSCHALING

Op basis van de huidige experimentele data kunnen er een aantal conclusies worden getrokken over de effectiviteit van de onderzochte voorbehandelingsvarianten. Met behulp van batchgistingen kunnen alleen uitspraken gedaan worden over de maximaal haalbare biogasopbrengst bij een oneindige verblijftijd in een gisting, en over de snelheid van biogasproductie.

Allereerst is er wat betreft de maximale biogasopbrengst niet een duidelijk beeld naar voren gekomen van een temperatuur en verblijftijdscombinatie die consequent ruim meer dan 10% hogere biogasopbrengst oplevert. Ook wanneer de resultaten van beide testmethodes gecombineerd worden blijkt de toegenomen biogasopbrengst bij een oneindige verblijftijd onder de 10%, en is daarmee niet statistisch significant. Dit houdt in dat de maximale biogasopbrengst bij een oneindige verblijftijd niet significant verbetert door de onderzochte behandelmethodes.

Wanneer er vervolgens gekeken wordt naar de snelheid van biogasproductie wordt het effect van een temperatuurbehandeling echter wel zichtbaar. Zowel een behandeling op 45 °C als

een behandeling op 55 °C gedurende vier uur leidt ertoe dat er in kortere tijd meer biogas geproduceerd kan worden. Bij elke behandelingsduur is er een verhoging in de biogasproductiesnelheid te zien, maar er lijkt een optimum te zijn bij vier uur behandelingstijd voor beide temperaturen. Wanneer de behandelingsduur verhoogd wordt van vier uur naar zes uur blijkt de effectiviteit bij 55 °C scherp af te nemen, terwijl dit effect minder sterk te zien is bij 45 °C. Dit kan erop duiden dat het proces stabiel verloopt bij 45 °C, wat in de bedrijfsvoering meer vrijheid kan geven. Voor beide temperaturen geldt dat een temperatuurbehandeling van vier uur ervoor zorgt dat er met 3 – 4 dagen kortere verblijftijd, evenveel biogas geproduceerd wordt als met onbehandeld slib.

Wanneer dit effect zich ook voordoet bij continu-gistingen, houdt dit een van de volgende twee zaken in:

- Bij een kortere verblijftijd in de gisting kan evenveel biogas geproduceerd worden per ton droge stof; hierdoor zullen huidige gistingsinstallaties meer biomassa kunnen verwerken
- Bij gelijkblijvende verblijftijd zal er meer biogas geproduceerd worden per ton droge stof

Dit houdt tevens in dat wanneer de verblijftijd in een continu-gisting te lang gekozen is, de voordelen van een thermische behandeling zullen afnemen. Anderzijds geldt ook dat er een praktische ondergrens bestaat voor de verblijftijd in een continugisting, waardoor mogelijk niet optimaal gebruik gemaakt kan worden van de voordelen van een thermische behandeling. In het onderzoek bij de continu-gistingen wordt hier nader naar gekeken.

#### **VI.5.2 CONTINUGISTINGEN TOT SEPTEMBER 2018, 40 LITER SCHAAL**

Doordat er weinig resultaten beschikbaar zijn van momenten waarop de reactoren gedurende langere tijd stabiel gevoed zijn, is het zeer waarschijnlijk dat de toename in gasproductie uitvergroot is voor de Thermfilly reactor. Uit de batch-experimenten is gebleken dat er vooral in de beginperiode van de gisting een grote toename is in de gasproductiesnelheid, en dat deze langzaam afvlakt naarmate de batchgisting vordert. Hierdoor kan naar verwachting de kortstondige toename in gasproductie van 49% uit Figuur VI.21, in een stabiele gisting afnemen tot circa 10% zodra beide gistingen stabiel draaien op een verblijftijd van 20 dagen. Met de beschikbare data kan zowel de gasproductiesnelheid als de totale gasproductie met bijbehorende drogestofafbraak niet betrouwbaar vastgesteld worden.

De belangrijkste oorzaak voor het gat in de data is veroorzaakt door haperingen in de voeding van de reactoren. Door de afmetingen van de reactoren, het continu en onbeheerd willen voeden, gecombineerd met de wens om een zo hoog mogelijk drogestofgehalte te voeden is het niet mogelijk gebleken om op deze schaal stabiel te voeden. Door verdunningen met leidingwater en gistingslib is het drogestofgehalte verlaagd tot ca. 5,5% DS. Om de reactoren continu te kunnen voeden moest er een voldoende groot voorraadvat zijn, waardoor standtijd gecreëerd is voor een mengsel met gistingslib en voeding. Bij de onbehandelde voeding van de reactor leverde dit ongewenste neveneffecten op. Gedurende de standtijd dikte de voeding namelijk langzaam in tot 9% DS waarbij er gasvorming is opgetreden (zie Figuur VI.24). Het gevolg hiervan is dat het slib moeilijker verpompaar wordt over de tijd, en dat er ingesloten gas verpompt wordt. Beide factoren zorgen er voor dat er na verloop van tijd minder voeding de reactor in komt. Deze effecten traden doorgaans op na 1 tot 2 dagen standtijd.

**FIGUUR VI.24** ONBEHANDELD SLIB GEMENGD MET GISTINGSLIB IN EEN GEKOELD VOORRAADVAT VERTOOND TEKENEN VAN GASPRODUCTIE EN DIKT IN VAN 6% DS NAAR 9% DS GEDURENDE DE STANDTIJD



Een vergelijkbaar effect treedt daarentegen niet op bij het Thermfilly behandeld slib (zie Figuur VI.25). Zowel de gasvorming als de indikking wordt niet waargenomen gedurende de standtijd. Het slib blijft laag in viscositeit en drogestofgehalte, waardoor hier minder problemen optreden bij het verpompen. Dit is tevens een mogelijke verklaring waarom er minder problemen zijn opgetreden rondom de voeding van de Thermfilly reactor.

**FIGUUR VI.25** THERMFILLY BEHANDELD SLIB GEMENGD MET GISTINGSLIB IN EEN GEKOELD VOORRAADVAT VERTOOND GEEN TEKENEN VAN GASPRODUCTIE EN BLIJFT LAAG IN VISCOSITEIT ZONDER INDIKKING GEDURENDE DE STANDTIJD



Wat tevens opvalt in Figuur VI.25 is dat er een wittige waas is gevormd bovenop het behandelde slib die niet aanwezig is bij het onbehandelde slib. De oorsprong en samenstelling van deze laag is niet verder onderzocht.

Beide waarnemingen duiden er op dat er bij een langere standtijd ongewenste neveneffecten kunnen optreden, waardoor het slib van samenstelling lijkt te veranderen. Dit zou kunnen betekenen dat er delen van het behandelde of onbehandelde slib omgezet worden voordat



het aan de gisting gevoed wordt, waardoor er een onvolledig beeld ontstaat met betrekking tot de gasproductie.

Een andere factor die invloed kan hebben op de gasproductiemetingen is het batchgewijs behandelen van het Thermfilly slib. Voor de Thermfilly behandeling wordt secundair slib in luchtdichte zakken geplaatst die voor 80% gevuld zijn. Tijdens de temperatuurbehandeling komt er gas vrij waardoor de zakken opbollen, zoals te zien in Figuur VI.26. Na terugkoelen van het slib neemt de hoeveelheid gas niet merkbaar af, wat doet vermoeden dat er gas is geproduceerd tijdens de behandeling. Doordat de zakken onvermijdelijk geopend moeten worden om het slib te kunnen voeden aan de reactor gaat dit geproduceerde gas verloren, wat anders het gistingsresultaat ten goede zou zijn gekomen.

**FIGUUR VI.26** THERMFILLY BEHANDELD SLIB IN LUCHTDICHTE ZAKKEN. TIJDENS DE BEHANDELING IS GAS VRIJGEKOMEN WAT NA AFKOELING NOG STEEDS DE ZAK OP SPANNING HOUDT



Op basis van bovenstaande meetgegevens en ervaringen is het noodzakelijk om aanpassingen te doen aan de opzet van de continu-experimenten. Het bijmengen van gistingsslib om de viscositeit te verlagen is niet aan te raden in deze opzet vanwege het feit dat voeding dan gedurende meerdere dagen in contact is met gistingsslib, hetgeen vroegtijdige gasvorming tot gevolg kan hebben, en niet representatief is voor de praktijksituatie. Om een stabiele voeding te krijgen is het tevens noodzakelijk om op deze schaal het drogestofgehalte verder te verlagen tot onder de 6% DS. Hiermee wordt de weerstand in de leidingen lager en kunnen verstoppingen voorkomen worden. Tevens dient eventueel gevormd gas door middel van continue menging uit de voeding gehaald te worden om de volume stroom naar de reactor constant te

houden. Tot slot kan de Thermfilly behandeling het beste in-line met de opstelling uitgevoerd worden, zodat gevormd gas bij de reactor ingevoerd wordt.

## VI.6 VISCOSITEIT

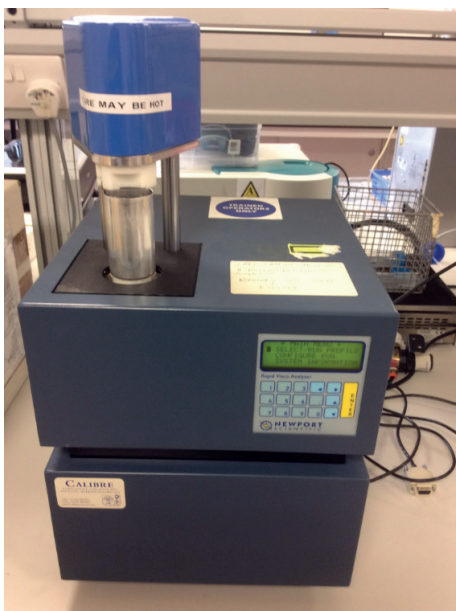
### VI.6.1 INTRODUCTIE

Voor de praktijkinstallatie voor Thermfilly zal de viscositeit van het slib een belangrijke rol spelen in het ontwerp van de warmtewisselaars en pompen, alsook het benodigde pompvermogen. Om deze reden is er gekeken naar de viscositeit van onbehandeld en Thermfilly slib, en is er gekeken naar mogelijke strategieën om, indien nodig, de viscositeit te verlagen.

### VI.6.2 METHODE

De viscositeit van gistingsslib, onbehandeld secundair slib, en Thermfilly behandeld secundair slib is onderzocht met behulp van een RVA-4 Rapid Visco Analyzer van Newport Scientific bij de Rijksuniversiteit Groningen. Hierbij is gekeken naar het pure slib, alsook naar de effecten van het bijmengen van behandeld en gistingsslib en het veranderen van de temperatuur.

FIGUUR VI.27 NEWPORT SCIENTIFIC RVA-4



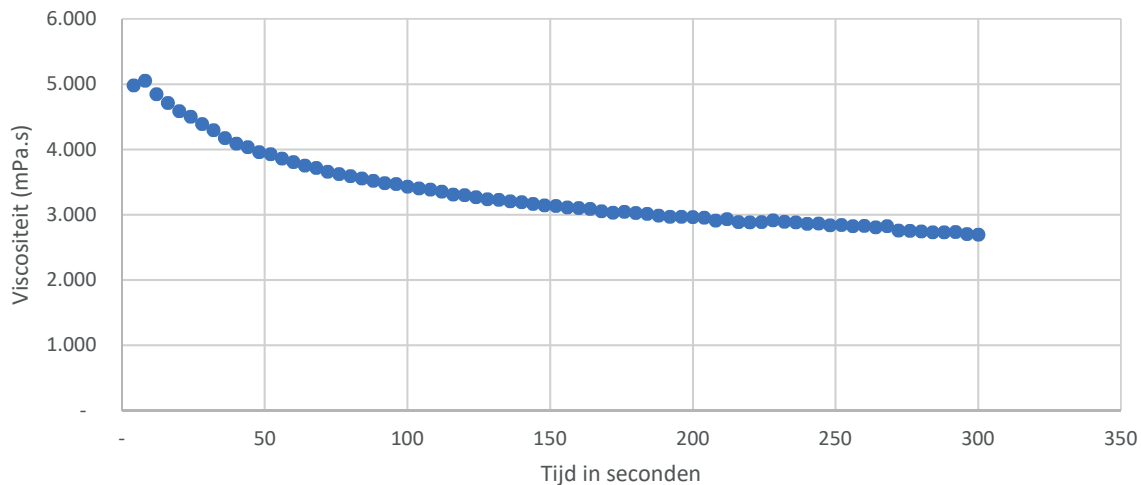
FIGUUR VI.28 MONSTERCUP EN ROERWERK



De monstercup (Figuur VI.28) wordt gevuld met het te meten materiaal, waarna een roerwerk in het monster wordt geplaatst. Het monster wordt op de gewenste temperatuur gebracht, waarna de meting start. Vanwege het thixotrope gedrag wordt de viscositeit gedurende vijf

minuten gemeten bij een constante temperatuur, waardoor zowel de piekviscositeit als de langzaam afnemende viscositeit gemeten wordt.

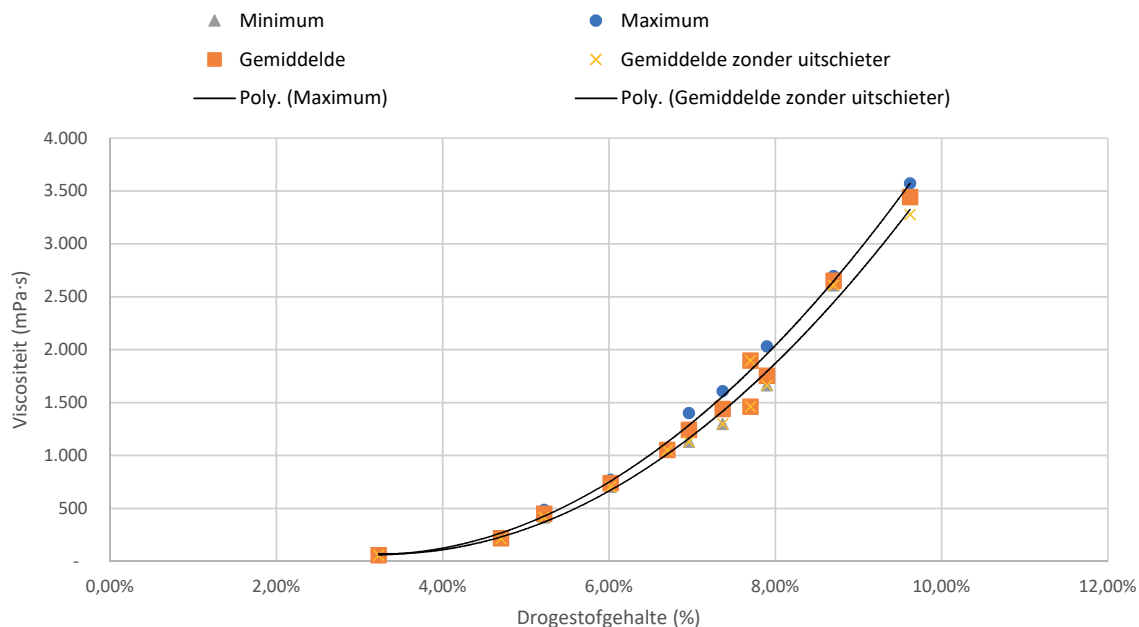
FIGUUR VI.29 VISCOSITEITSVERLOOP VAN ONBEHANDELD SLIB (9% DS)



### VI.6.3 EFFECT VAN DROGESTOFGEHALTE VERSUS BIJMENGEN MET GISTINGSLIB

De viscositeit van onbehandeld secundair slib is onderzocht als functie van het drogestofgehalte, waarna het vergeleken is met het effect van het bijmengen met gistingslib. Secundair slib is hierbij verdund met leidingwater om drogestofgehalten te verkrijgen van 3% tot 10% d.s. Vervolgens is met behulp van gistingslib van rwzi Garmerwolde (4,7% d.s.) secundair slib verdund tot 6,0%; 6,7%; 7,4%; en 7,9%. Alle monsters zijn vervolgens gemeten op 37 °C om het effect van temperatuur uit te sluiten. De monsters zijn vergeleken op de gemeten viscositeit na 5 minuten. De resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 1.4.

AFBEELDING VI.1 VISCOSITEIT ALS FUNCTIE VAN DROGESTOFGEHALTE



Uit de metingen in figuur 1.4 blijkt dat, wanneer gemeten wordt bij 37 °C, de monsters waar gistingslib bijgemengd is geen significant hogere of lagere viscositeit vertonen dan men zou verwachten op basis van het drogestofgehalte. Hieruit blijkt dat de viscositeit vooral een

functie is van het drogestofgehalte, ongeacht of dit verkregen is door verdunning met leidingwater, of met gistingsslib.

Het effect van de temperatuur wordt in de volgende sectie nader bekeken.

#### VI.6.4 EFFECT VAN TEMPERATUUR OP BIJMENGING MET GISTINGSSLIB

Naast het verdunnend effect van gistingsslib zal in de bedrijfssituatie het secundair slib ook opgewarmd worden door het bijmengen. Dit effect is onderzocht door vers onbehandeld secundair slib (8,7% d.s.) bij te mengen met gistingsslib (4,7% d.s.) en de viscositeit te meten bij zowel 37 °C, als bij de bedrijfstemperatuur die wordt verkregen wanneer het slib gemengd wordt. De resultaten hiervan staan in Tabel VI.7, Tabel VI.8 en Figuur VI.30.

TABEL VI.7

VISCOSITEIT BIJ BEDRIJFSTEMPERATUUR

Monster	Drogestofgehalte	Temperatuur (°C)	Viscositeit (mPa.s)
Onbehandeld	8,7%	15	2.872
GS 25%	7,9%	15	2.125
GS 50%	7,4%	18	1.771
GS 75%	7,0%	22	1.322
GS 100%	6,7%	25	1.160
GS puur	4,7%	37	225

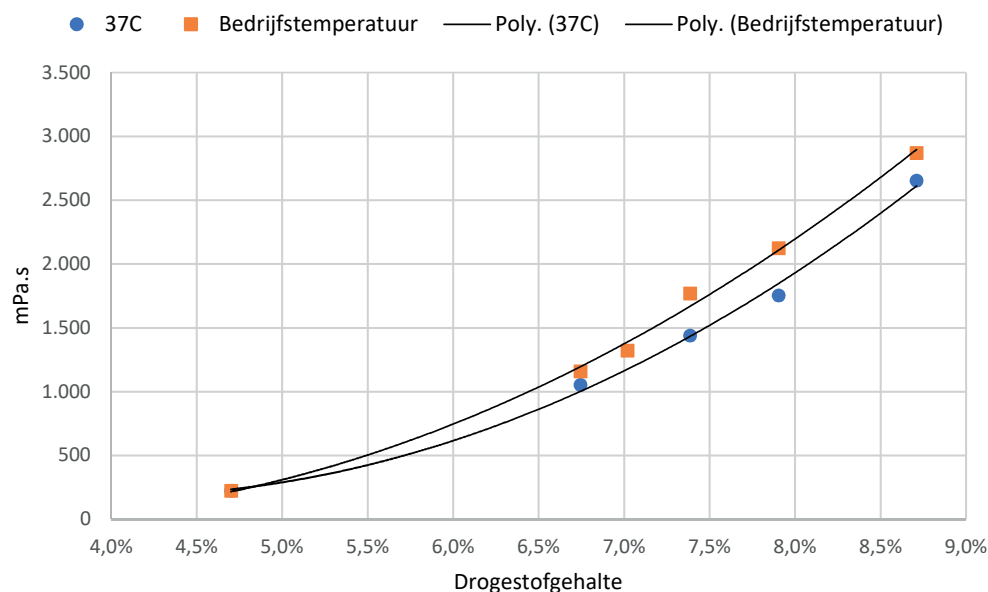
TABEL VI.8

VISCOSITEIT BIJ CONSTATE TEMPERATUUR

Monster	Drogestofgehalte	Temperatuur (°C)	Viscositeit (mPa.s)
Onbehandeld	8,7%	37	2.653
GS 25%	7,9%	37	1.755
GS 50%	7,4%	37	1.441
GS 100%	6,7%	37	1.055
GS puur	4,7%	37	225

FIGUUR VI.30

GECOMBINEERD TEMPERATUUR EN VERDUNNEFFECT OP DE VISCOSITEIT WANNEER GISTINGSSLIB WORDT BIJMENGEND



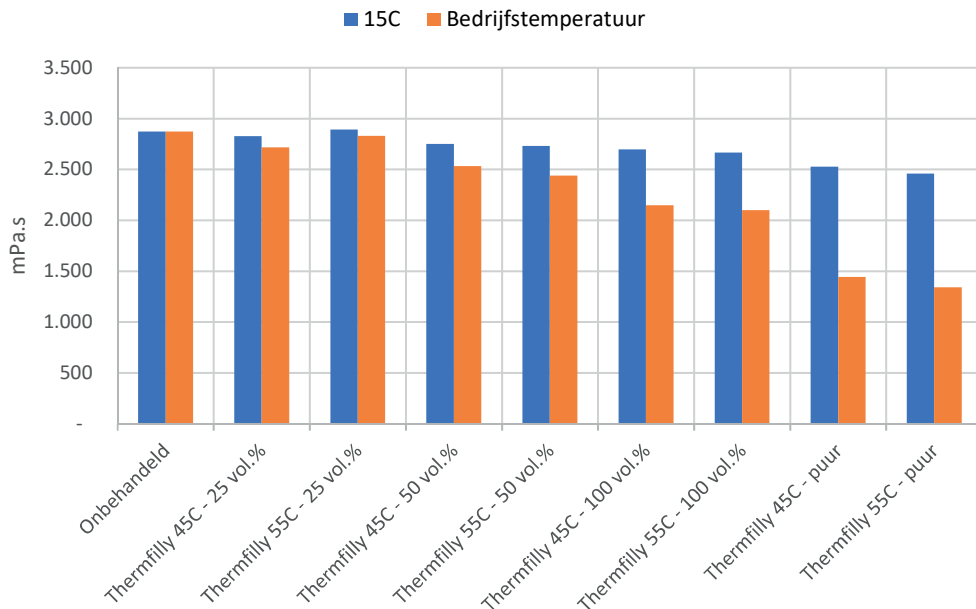
Het verschil in viscositeit van onbehandeld slib (8,7% d.s.) bij 15 °C en 37 °C bedraagt 8%. Het verdunnen van 8,7% d.s. naar 7,9% d.s. heeft een veel groter effect, namelijk een afname in de viscositeit van 26% op een bedrijfstemperatuur van 15 °C. Dit doet vermoeden dat het verlagende effect van het bijmengen van gistingsslib hoofdzakelijk komt door het verlagen van het drogestofgehalte, en in mindere mate door het verhogen van de temperatuur.

### VI.6.5 EFFECT VAN THERMFILLY BEHANDELING OP SECUNDAIR SLIB

De viscositeit van behandeld Thermfilly slib is bekeken bij twee behandelcombinaties: 5 uur op 45 °C en 4 uur bij 55 °C. Hiervoor is vers secundair slib (8,7% d.s.) behandeld volgens bovenstaande temperatuur- en verblijftijdscombinaties, en vervolgens gemeten op 15 °C en op de bedrijfstemperatuur (45 °C of 55 °C). Daarnaast is gekeken naar het effect van het bijmengen van Thermfilly slib met onbehandeld slib bij verschillende volume toevoegingen. De resultaten hiervan staan weergegeven in onderstaande figuur, waar een 25 vol.% mengverhouding betekent dat op 100 ml onbehandeld slib 25 ml Thermfilly slib is toegevoegd.

FIGUUR 7.31

EFFECT VAN THERMFILLY BEHANDELING OP VISCOSITEIT BIJ VERSCHILLENDE MENGVERHOUDINGEN EN TEMPERATUREN



Uit de resultaten blijkt dat de Thermfilly behandeling de viscositeit van het slib verlaagt met 12% en 14% voor behandeling op respectievelijk 45 °C en 55 °C wanneer dit op 15 °C wordt gemeten. Deze verlaging is hoger bij de bedrijfstemperatuur met respectievelijk 50% afname in viscositeit bij 45 °C en 53% afname bij 55 °C.

Ook het bijmengen van Thermfilly slib heeft een viscositeitsverlagend effect. Wanneer onbehandeld slib 1-op-1 (100 vol.%) wordt gemengd met Thermfilly slib, verlaagt dit de viscositeit met 6%-7% bij 15 °C, en 25%-27% op de bedrijfstemperatuur.

### VI.7 THEORIE, ACHTERGROND EN LITERATUUR

Het Thermfilly concept is voortgevloeid uit het Pasturi Destructie onderzoek (STOWA2015-W07 [1]) als één van de behandelingsvarianten die een potentiële verhoging van de biogasopbrengst kan opleveren. Bij deze behandelingsvariant is potentieel minder energie en een lagere investering nodig voor de behandeling van slib ten opzichte van relatief kapitaal- en energie-intensieve thermische drukhydrolyse processen, waardoor Thermfilly mogelijk ook geschikt is voor kleinere gistinginstallaties. De belangrijkste conclusies uit dat onderzoek

worden hier kort samengevat en aangevuld met bevindingen uit relevante literatuur. Voor een uitgebreidere uiteenzetting van verschillende voorbehandelingsmethoden wordt de lezer verwezen naar het Pasturi Destructie rapport (STOWA2015-W07 [1]).

#### **VI.7.1 ACHTERGROND VOORBEHANDELINGSMETHODEN – UIT STOWA2015-W07**

Zoals de meeste voorbehandelingsmethoden richt Thermfilly zich op het verbeteren of versnellen van de afbraak van rioolwaterzuiveringsslib. Tijdens hydrolyse worden hoog molecuulair gewicht componenten omgezet naar laag molecuulair gewicht componenten en monomeren door exo-enzymen van anaerobe bacteriën. [3], [4] Hydrolyse wordt in de literatuur aangeduid als snelheidslimiterende stap in de anaerobe gisting [1], [2], [3] en wordt gezien als de oorzaak van lage afbraak van organische componenten, resulterend in langere benodigde verblijftijden in gistingen. Voor optimalisatie van gistingen, wordt daarom gekeken naar het versnellen van de afbraak van organische componenten. Hiervoor worden hoofdzakelijk twee strategieën aangemerkt als kansrijk; co-vergisting met andere organische stromen en voorbehandeling.

Voorbehandeling richt zich op het afbreken van cellen door het kapot maken van celwanden. Hierbij worden hoog molecuulair gewicht moleculen afgebroken naar lager molecuulair gewicht moleculen. Op deze manier wordt de hydrolyse stap versneld of omzeild [3].

In de literatuur worden verschillende manieren van biomassa voorbehandeling aangegeven; chemische voorbehandeling (20-60% verhoogde afbraak), mechanische voorbehandeling (20-90%), ultrasone voorbehandeling (40-80%), thermische voorbehandeling (50-90%) en enzymatisch versnelde hydrolyse (tot 210%). [5] Hierbij is het niet ongebruikelijk om een of meerdere van deze manieren te combineren.

#### **VI.7.2 THERMISCHE VOORBEHANDELING**

Het positieve effect van thermische voorbehandeling van slib op de gisting werd al aangetoond in 1970. [4] In de literatuur wordt een breed temperatuurbereik aangegeven, liggend tussen de 150 - 200 °C met drukken variërend tussen de 600 en 2500 kPa [4], [6]. Lagere temperaturen worden ook gebruikt [7], maar op dit punt wordt ook de biologische activiteit van het slib gestimuleerd, wat betekent dat enzymatische (biologische) en thermische hydrolyse tegelijkertijd plaatsvinden [4], [8], [9].

De temperatuurverhoging bij thermische voorbehandeling verstoort molecuulbindingen van celwanden en celmembranen, zodat eiwitten vrijkomen die anders beschermd zijn tegen enzymatische hydrolyse.

De resultaten van thermische voorbehandeling variëren in hoge mate, wat verklaard kan worden door de verscheidenheid aan substraat (slib) composities. De verhoging van de destructiegraad hangt af van de hoeveelheid aanwezig structuurmateriaal. Een hoge fractie van dit materiaal heeft daarnaast een meer intensieve voorbehandeling nodig [2]. Ook heeft thermische behandeling een groter effect op biogas productie bij gisting voor een mesofiele gisting dan voor een thermofiele gisting [2].

#### **VI.7.3 BIOLOGISCHE VOORBEHANDELING**

Biologische voorbehandeling is een verzamelnaam voor verschillende processen die als doel hebben om de hydrolyse te verbeteren. [6] Een goed voorbeeld van zo'n proces is een temperatuur-gefaserde anaerobe gisting (TPAD) die milde temperaturen toepast om thermofiele activiteit te stimuleren. Gebruikte temperaturen zijn in het thermofiele (rond 55 °C) [10] of

hyper-thermofiele (60–70 °C) gebied, zowel aerob als anaerob. [6], [11] Bij een voorbehandeling van slib gedurende 12 uur bij 55 °C is bijvoorbeeld een toename in de methaanproductie gemeten van 23% [10].

Door het gehanteerde temperatuurbereik van Thermfilly lijkt het hoofdzakelijk een vorm van biologische voorbehandeling. Echter, de behandeltijd is hierbij korter dan bestaande varianten en er wordt niet specifiek gestuurd op specifieke bacterie-activiteit.

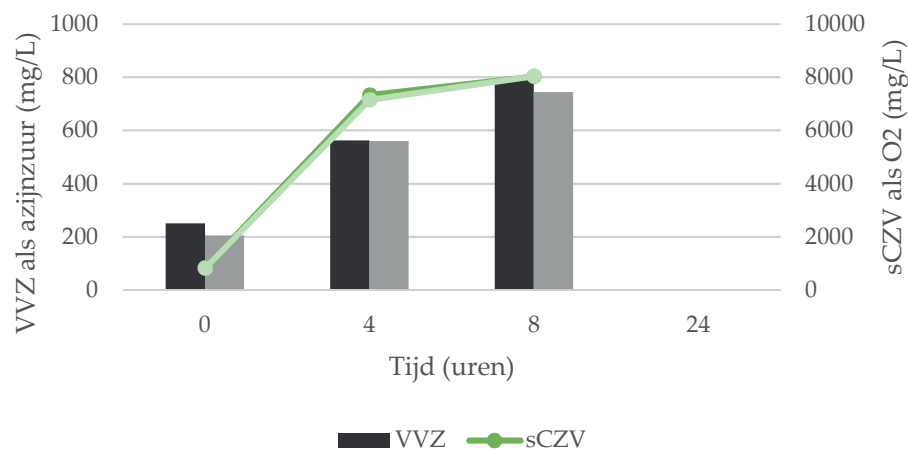
## VI.8 BEVINDINGEN PASTURI DESTRUCTIE ONDERZOEK

In het Pasturi Destructie onderzoek zijn vele aspecten onderzocht om te pogen een volledig beeld te krijgen van de invloed van verschillende behandelstappen. Naast een lage temperatuur pasteurisatie-stap die cellen afdood, speelden de aspecten van verzuring door omzetting naar vrije vetzuren, en de desintegratie van de slib flocstructuur een belangrijke rol in het Pasturi Destructie concept. Deze aspecten blijven relevant in het Thermfilly concept, en de relevante conclusies uit het Pasturi onderzoek worden hier toegelicht.

### VI.8.1 RELATIE SCZV EN VVZ TEN OPZICHTE VAN BIOGASPRODUCTIE

Tijdens het Pasturi Destructie onderzoek is er eerst gekeken naar de effectiviteit van de verschillende voorbehandelingsstappen, voordat er gekozen is voor een combinatie van behandelingsstappen voor het Pasturi Destructie concept. Hierbij is zowel het chemisch zuurstofverbruik (CZV) en de concentratie vrije vetzuren (VVZ) gebruikt om de behandelingen te vergelijken. Hieruit bleek dat een langere c.q. intensievere behandeling van slib niet per se een significante toename in sCZV of VVZ laat zien. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar in Figuur VI.32 waarbij het verschil tussen vier uur en acht uur behandeling een kleinere toename in sCZV laat zien dan de eerste vier uur behandeling. Hierdoor is tijdens het Pasturi Destructie onderzoek de hypothese ontstaan dat een kortere behandeltijd wellicht effectiever kan zijn dan de onderzochte vier uur behandeltijd bij de batchgistingen. Daarnaast kwam naar voren dat intensievere behandeling niet noodzakelijk een hogere biogasproductie laat zien, waardoor een mildere behandelvariant mogelijk aantrekkelijker is dan een intensieve voorbehandeling.

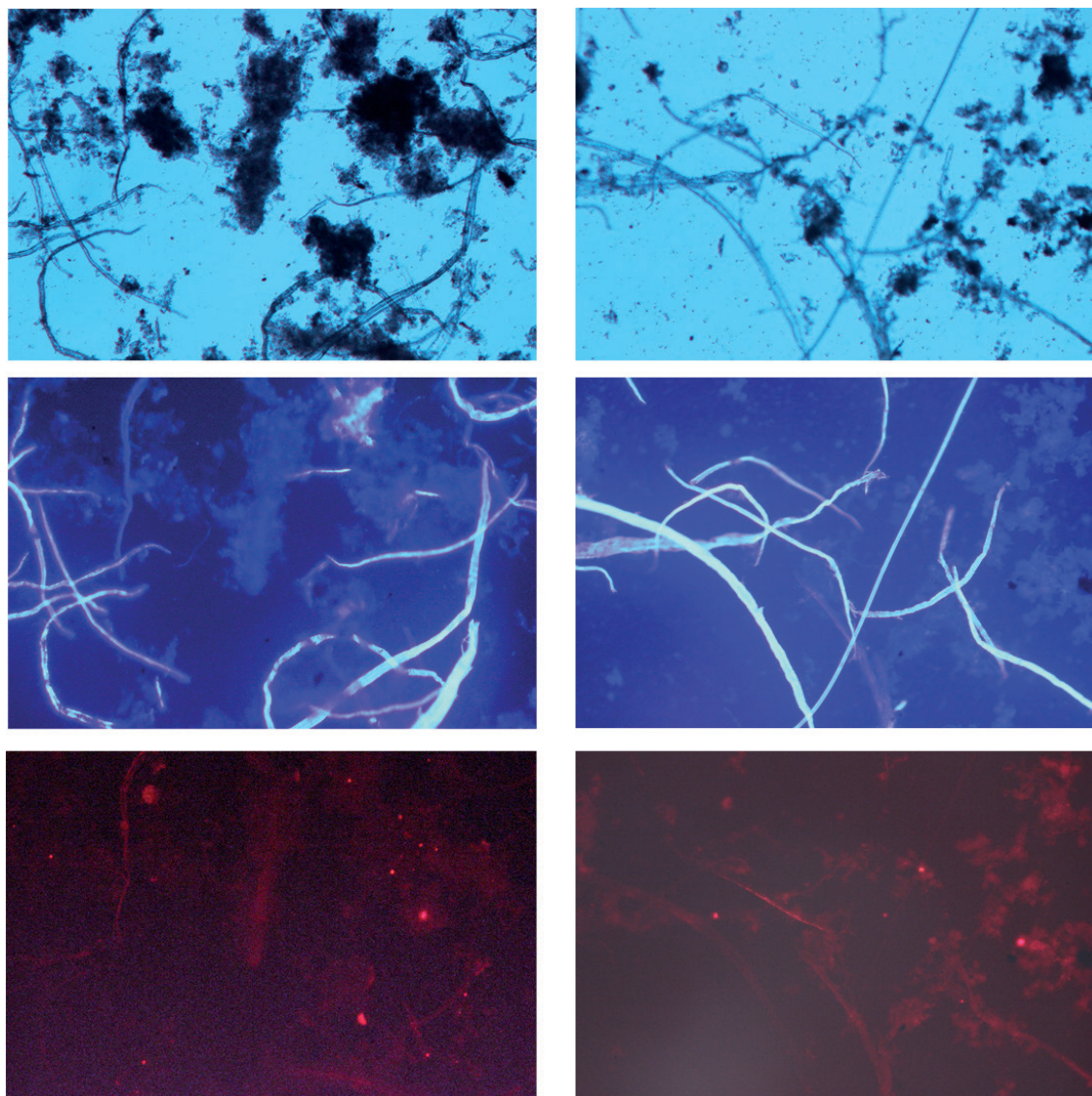
FIGUUR VI.32 VERANDERING IN VVZ EN SCZV, ONDER ANAEROBE CONDITIES, 55°C, 5,9 WT.% D.S.



### VI.8.2 INVLOED BEHANDELING OP SLIBSTRUCTUUR EN INTEGRITEIT

Eén van de verwachte voordelen van de onderzochte slibvoorbehandelingsmethoden is dat de deeltjesgrootte verandert door de behandeling, waardoor er een groter specifiek oppervlak beschikbaar komt voor biochemische reacties. Dit heeft als gevolg dat deze biochemische reacties sneller kunnen verlopen. [12] Daarnaast kunnen zowel thermische als mechanische behandelingen cellen afdoden of afzwakken, waardoor deze makkelijker af te breken zijn tijdens een anaerobe gisting. Tijdens het Pasturi Destructie onderzoek zijn deze effecten onderzocht met behulp van fluorescentie microscopie (naar [13]). Hierbij wordt met behulp van DNA-kleuring vastgesteld welke fractie van de celwanden permeabel is geworden, hetgeen een indicatie is van afsterving van de cel.

FIGUUR VI.33 FLUORESCENTIE METINGEN UIT HET PASTURI-ONDERZOEK VOOR EEN "THERMFILLY" BEHANDELING OP GEDURENDE VIER UUR (RECHTS) VERGELEKEN MET ONBEHANDELD SLIB (LINKS). VAN BOVEN NAAR BENEDEN: LICHTMICROSCOPISCH BEELD, DAPI-FLUORESCENTIE (ALLE DNA), PI-FLUORESCENTIE (VRIJGEKOMEN DNA). VERGROTING 200X



De opvallendste verandering bij het behandelde slib (rechts in bovenstaande figuur) is de aanwezigheid van kleinere groepen cellen ten opzichte van onbehandeld slib (links in bovenstaande figuur). Doordat er minder cellen samengeklonterd zijn is er meer specifiek oppervlak gecreëerd waardoor het slib mogelijk sneller afgebroken kan worden.



Een minder opvallende verandering is de toegenomen hoeveelheid cellen die oplichten bij de rode kleuring voor het behandelde monster ten opzichte van onbehandeld slib<sup>3</sup>. De toegenomen rode kleur duidt erop dat er bij een behandeling van 4 uur op 55 °C al een licht pasteuriserend effect optreedt wat cellen heeft afgedood. Dit effect is zwakker dan bij een pasteurisatie van 1 uur bij 70 °C [1], maar kan desondanks bijdragen aan een hogere afbraaksnelheid waardoor mogelijk uiteindelijk ook een hogere totale afbraak mogelijk wordt.

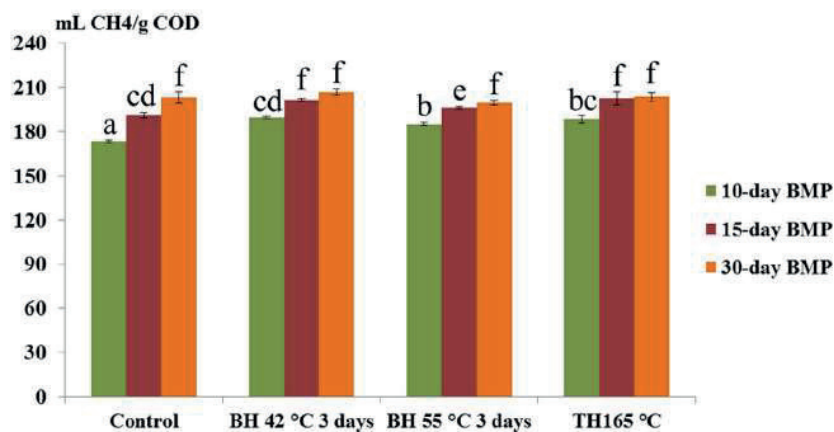
### VI.8.3 AANVULLINGEN UIT DE LITERATUUR

Thermfilly is actief in hetzelfde temperatuurbereik als biologische hydrolyse processen. In het Verenigd Koninkrijk wordt dit breed toegepast in de vorm van het Monsal Enzymic Hydrolysis proces sinds 2002, inmiddels in bedrijf op minstens 11 locaties. Hierbij is gemerkt dat de hydrolyse versneld wordt, waardoor er een kortere verblijftijd in de gisting mogelijk is van 10 – 14 dagen. Hierdoor is het mogelijk om de organische vracht naar de gisting te verhogen om de vrijgekomen ruimte in de gisting optimaal te benutten. Tevens wordt er een verbetering in de ontwatering gemeten, waarbij drogestofgehalten worden behaald van boven de 28% DS. [4] In de basis wordt slib van 6% - 8% DS eerst op 42 °C in aparte batch reactoren gehydrolyseerd gedurende 1,5 dag, gevolgd door een verhoging in temperatuur naar 55 °C gedurende vijf uur. Het thermisch behandelde slib wordt vervolgens teruggekoeld en gevoed aan de mesofiele gisting. Hierbij moet opgemerkt worden dat de totale hydraulische verblijftijd (HRT) in het gehele systeem van voorbehandeling en mesofiele gisting hiermee tussen de 12 en 16 dagen HRT komt te liggen.

De ervaringen bij de ontwikkeling van het Monsal-proces zijn dat een hoger drogestofgehalte een positief effect heeft op de effectiviteit van de behandeling. De hydrolyse wordt versterkt bij een hoger drogestofgehalte doordat de omgevingsstress voor bacteriën hoger wordt, waardoor deze eenvoudiger afsterven. [4] Dit is in lijn met eerdere ervaringen van thermische behandeling op lage temperatuur waarbij het effect op *E. coli* gebruikt is als indicatie. [5], [6]

De geconstateerde veranderingen bij biologische hydrolyse processen hebben ook een merkbaar effect op de gasproductie en daarbij vooral op de snelheid. In Figuur VI.34 wordt de gasproductie van twee biologische hydrolyse processen vergeleken met een referentie en een thermische hydrolyse variant, van 30 minuten op 165 °C. [6]

FIGUUR VI.34 VERGELIJKING VAN METHAANPRODUCTIE VAN ONBEHANDELD, 3-DAGEN BIOLOGISCHE HYDROLYSE BIJ 42 °C OF 55 °C, EN EEN 30 MINUTEN THERMISCHE HYDROLYSE BIJ 165 °C NA 10, 15 EN 30 DAGEN VERGISTING. DE LETTERS GEVEN STATISTISCH SIGNIFICANTE VERSCHILLEN AAN IN METHAANPRODUCTIE. [6]



- 3 Dit effect lijkt kleiner dan het in werkelijkheid is doordat het onbehandelde slib een langere belichtingstijd (10 seconden versus 8 seconden) nodig had om überhaupt een bruikbaar beeld te krijgen.

Uit de gasproductie van de batchreactoren over de tijd valt op te maken dat alle behandelvarianten een significante voorsprong laten zien in biogasproductie gedurende de eerste 10 dagen van de batchgisting, ten opzichte van de onbehandelde referentie. Na 15 dagen in de batchgisting hadden de reactoren met behandelde voeding evenveel gas geproduceerd als de referentiereactor na 30 dagen. Bij 30 dagen verblijftijd in de batchreactoren lijkt het voordeel van de behandelvarianten grotendeels verdwenen te zijn. [6] Dit effect wordt in andere onderzoeken ook onderschreven, waarbij er doorgaans gekozen wordt voor een verkorting van de HRT in combinatie met een behandelvariant. [4], [7], [8]

Een andere terugkerende constatering is dat thermische voorbehandeling de structuur van het slib merkbaar heeft veranderd. Het effect kan samengevat worden als volgt: de viscositeit van een thermisch behandeld slib was gelijk aan onbehandeld slib met de helft van het drogestofgehalte. Bijvoorbeeld, de viscositeit van slib met 9% d.s. wat thermisch behandeld is staat gelijk aan onbehandeld slib met 4% DS. [7] Bij het Monsal-proces is een vergelijkbaar effect gemeten, waarbij behandeld slib van 8% DS een vergelijkbaar vloeigedrag heeft als onbehandeld slib van 5,5% DS. [4]

Tot slot wordt in de literatuur opgemerkt dat ondanks decennia onderzoek naar biologische hydrolyse, en praktijkervaring sinds 2002, de exacte mechanismen en optimale procescondities voor dergelijke biologische hydrolyse processen onbekend zijn. [6], [4] Hierdoor bestaat het vermoeden dat er nog altijd een optimalisatieslag te maken is in zowel procestemperaturen als verblijftijden.