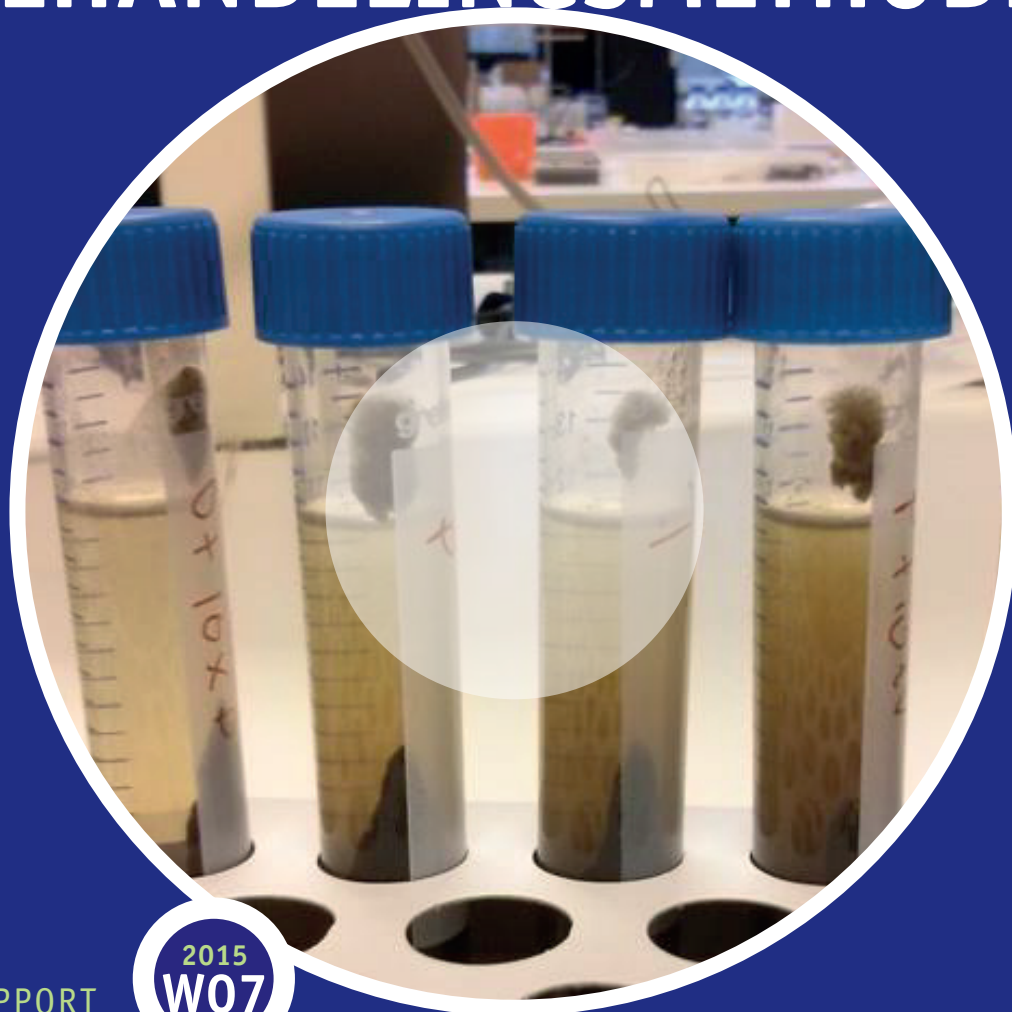


# PASTURI DESTRUCTIE: ONTWIKKELING VAN EEN NIEUWE SLIBVOOR- BEHANDELINGSMETHODE



RAPPORT

2015  
W07

PASTURI DESTRUCTIE: ONTWIKKELING VAN EEN  
NIEUWE SLIBVOORBEHANDELINGSMETHODE

RAPPORT

2015  
**W07**



# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

## PROJECTUITVOERING

Aaldrik Haijer, Water and energy solutions  
Arjen van Nieuwenhuijzen, Witteveen+Bos  
Peter Vast, Water and energy solutions  
Anna Veldhoen, Witteveen+Bos

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Willy Poiesz, Waterschap Noorderzijlvest  
Harm Baten, Hoogheemraadschap van Rijnland  
Ruud van Dalen, Waterschap Vallei en Veluwe  
Dirk Koot, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Chris Reijken, Waternet  
Marc Vermeulen, Waterschap Rivierenland  
Cora Uijterlinde, STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau  
STOWA STOWA 2015-W07

**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

De waterschappen willen in 2020 minstens 40% van het energieverbruik zelf opwekken. In de Meerjarenaafspraken energie-efficiency (2008), Klimaatakkoord (2010), Lokale Klimaatagenda (2011), Green Deal (2014), Ketenakkoord Fosfaatkringloop (2011) en het SER Energieakkoord (2013) zijn beleidsmatige afspraken gemaakt tussen waterschappen en rijksoverheid over energie- en fosfaatterugwinning. Energie- en kostenbesparing zijn belangrijke uitdagingen voor de toekomst. Voor rwzi's zijn de organische bestanddelen in het afvalwater en het zuiveringsslib de belangrijkste componenten voor (bio)energieproductie in de vorm van biogasproductie via de gistingroute.

Het is al langer bekend dat door toepassing van voorbehandelingstechnieken voor slibdesintegratie meer zuiveringsslib in het gistingproces kan worden omgezet in biogas. Hiervoor zijn verschillende technieken en uitvoeringsvormen op de markt waarvan de thermische drukhydrolyse (TDH) momenteel de bekendste is, terwijl rond 2005 veel onderzoek werd ingezet op akoestische destructietechnieken. De Nederlandse waterschappen zoeken nog steeds naar alternatieven om efficiëntie en investeringskosten te verbeteren. Een nieuw concept is 'Pasturi destructie': een combinatie van een biologische, thermische én mechanische voorbehandeling.

Er zijn verschillende Pasturi-varianten, waarvan op basis van dit onderzoek blijkt dat venturicirculatie en thermofiele voorbehandeling kansrijke alternatieven voor TDH-concepten lijken. Het uitgevoerde laboratoriumonderzoek heeft aangetoond dat beide Pasturi-varianten een 30% hogere organische-drogestofafbraak en biogasproductie bereiken ten opzichte van een onbehandeld slibmonster. Dit is vergelijkbaar met het effect van TDH. Ook financieel lijken de Pasturi-varianten interessant omdat de noodzakelijke investeringskosten relatief laag zijn voor inpassing in de sliblijn. Hoewel het technische onderzoek en de business case veelbelovende uitkomsten voor het Pasturi-concept leveren, zijn er nog enkele voorbehouden die verder onderzoek vragen. Het technisch inhoudelijke onderzoek, de vergelijkende business case en de nodige vervolgstappen worden in dit STOWA-werkrapport nader toegelicht.



# SAMENVATTING

## AANLEIDING

De reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot, verlaging van slibverwerkingskosten en een verwacht toekomstig tekort aan fossiele grondstoffen zijn de drijvende kracht om het afvalwaterzuiveringsproces en de slibverwerking verder te optimaliseren. Dit is de aanleiding voor de waterschappen in Nederland om verder na te denken over de toekomstige inrichting en uitvoering van de (centrale) slibverwerking en in STOWA-verband onderzoek uit te voeren op dit gebied. Onder aanvoering van Waterschap Noorderzijlvest is in een consortium een nieuwe innovatieve slibverwerking bedacht, waarbij de nadruk ligt op een betere voorbehandeling van het slib: de Pasturi-destructie; bestaande uit een combinatie van venturi-destructie en pasteurisatie. Deze voorbehandeling is, net als andere slibdestructietechnieken, gericht op een verhoogde ontsluiting van organische stof uit het secundaire slib. Hiermee wordt beoogd door verbeterde afbraak de biogasproductie bij gisting per aangevoerde kg droge stof (ds) te verhogen en een verbeterde ontwaterbaarheid van het digestaat te bereiken.

Het concept, genaamd "Pasturi Destructie", is ontwikkeld als eenvoudig en energetisch gunstig alternatief voor de complexere en relatief kapitaalintensieve methode van Thermische Druk Hydrolyse. Pasturi Destructie is een combinatie van een biologische, thermische, en mechanische voorbehandeling. Door deze combinatie van stappen is een theoretisch energiepositieve voorbehandeling voorgesteld, wat inhoudt dat meer energie vrijkomt door de behandeling dan in de stappen verbruikt wordt. Naar verwachting is het concept vanwege de lage investeringskosten ook voor kleine gistingstanks inzetbaar.

## OPZET ONDERZOEK

Dit STOWA-rapport is het resultaat van onderzoek naar de technische haalbaarheid van het principe van Pasturi-destructie op labschaal en een studie naar de financiële haalbaarheid in de vorm van een business case. Allereerst zijn met literatuurstudie en laboratoriumonderzoek twee kansrijke Pasturi-varianten gedefinieerd: venturi-circulatie en thermofiele voorbehandeling. Nadat de technische haalbaarheid was aangetoond is een business case opgezet, waarin de concepten onderling en ten opzichte van TDH zijn vergeleken.

## UITKOMSTEN TECHNISCHE HAALBAARHEID

Op basis van literatuurgegevens en een theoretische evaluatie van de technische haalbaarheid van pasturi-destructie is het aantal onderzoeksvariabelen voor de individuele processtappen afgebakend. Het labonderzoek heeft nuttige inzichten opgeleverd, maar heeft ook beperkingen laten zien. Zo zijn er tijdens enkele meetreeksen verstoringen opgetreden, waardoor niet alle gegevens bruikbaar zijn. Ook bleken de biogasproductie en droge-stofafbraak niet direct aan elkaar gecorreleerd te kunnen worden. Na analyse van de onderzoeksdata is vervolgens geconcludeerd dat alleen een select aandeel van de laboratoriumtesten (zie detaillering in hoofdstuk 8 - 12) geschikt was voor interpretatie voor het STOWA-onderzoek. Uit de resultaten van het laboratoriumonderzoek naar de afzonderlijke en gecombineerde processtappen blijkt dat bijvoorbeeld de combinatie van een thermofiele voorbehandeling gevolgd door een mechanische desintegratie door venturi-cavitatie elkaar tegenwerkt. Een belangrijke oorzaak daarbij is dat de slibstroom in de laboratoriumopstelling van de venturistap belucht wordt, waardoor organisch materiaal geoxideerd wordt en de uiteindelijke biogasopbrengst negatief beïnvloed wordt. Deze onderzoekslijn is vervolgens als technisch onhaalbaar bestempeld. Uit

het technische onderzoek zijn twee interessante behandelingsvarianten naar voren gekomen die een significante biogastoename vertonen:

- Een thermofiele voorbehandeling onder anaerobe omstandigheden op gedurende vier uur, aangeduid als Thermofiele Voorbehandeling (TVB). Deze variant laat op labschaal een toename in ods-afbraak en biogasproductie zien van 30 – 40% na 20 dagen mesofiele gisting en een verbetering van de ontwateringsgraad van circa 5%ds bij een 20% hogere PE-dosering ten opzichte van referentieslib.
- Een venturi-nabehandeling, waarbij gistingsslib na 20 dagen verblijftijd mechanisch behandeld is door het rond te pompen over een venturibuis, waarna het behandelde slib nogmaals vergist is. Bij deze tweede mesofiele vergisting gedurende 20 dagen is een extra biogasopbrengst van 30% aangetoond ten opzichte van de oorspronkelijke productie bij gisting gedurende 20 dagen. Het onbehandelde referentieslib produceerde in die periode nauwelijks extra biogas. Voor deze variant dient opgemerkt te worden dat technische haalbaarheid uitgaat van 10 keer recirculeren over de venturi met een additionele verblijftijd van 20 dagen in de gisting (daarmee wordt 40 dagen verblijftijd bereikt) terwijl deze variant voor de business case uitgewerkt is als een venturi-circulatie met een recirculatievoud van 10 over de gisting met een theoretisch bepaalde toename van afbraak en biogasproductie van 30 – 40%. Mogelijke afsterving van methanogenen a.g.v. van de recirculatie over de venturi-destructieinstallatie is hierbij niet meegenomen. De ontwateringsprestaties van deze variant zijn vergelijkbaar met de TVB-variant.

#### **UITKOMSTEN BUSINESS CASES**

Op basis van de resultaten uit het laboratoriumonderzoek zijn business cases uitgerekend voor de varianten venturi-circulatie en TVB. Deze business cases zijn vergeleken met een referentiesituatie en een algemeen toepasbare TDH-variant op basis van kentallen uit referentie-installaties.

Uit de business cases bleek dat de terugverdientijd van de varianten venturi-circulatie en TVB ongeveer even lang is, met als opmerking dat de prestaties van de venturi-circulatie gebaseerd is op de uitkomsten van de labschaaltesten met een zeer lange verblijftijd (40 dagen). Beide varianten hebben een terugverdientijd van vijf tot zes jaar, terwijl deze voor TDH in dit geval twaalf jaar bedraagt volgens de uitgangspunten van dit onderzoek. Dit komt vooral door de verschillen in realisatiekosten en PE-verbruik voor voorontwatering, die voor venturi en TVB substantieel lager zijn dan voor TDH.

TDH leidt tot een sterk verbeterde slibontwatering en daarmee lagere slibafzetkosten. Dit is van groot belang, maar onvoldoende om de kortere terugverdientijd bij venturi of TVB te compenseren.

Naast slibontwatering zijn de kosten van slibeindafzet een bepalende factor. Hogere kosten leiden tot een kortere terugverdientijd en een klein verschil tussen de varianten. Biogasproductie is in de business case belangrijk maar niet van doorslaggevend belang om de varianten in de business case te rangschikken of haalbaar te maken.

De benodigde aanpassingen zijn sterk afhankelijk van de locatie. Wanneer een rwzi bijvoorbeeld voldoende WKK-capaciteit heeft of het biogas op een andere manier in kan zetten, is de terugverdientijd korter. In algemenere zin moet er voldoende ruimte zijn om een tweede recirculatieleiding aan te leggen of voorbehandelingstank of TDH-installatie te plaatsen.

## CONCLUSIE

De variant van thermofiele voorbehandeling is een potentieel interessante methode die technisch haalbaar is en financiële voordelen biedt ten opzichte van complexere voorbehandelingstechnieken. De venturi recirculatie variant heeft op basis van de uitkomsten van de technische haalbaarheid enkele beperkingen (additionele verblijftijd van 20 dagen en mogelijke afsterving methanogen) in de testopzet. Voor de technische haalbaarheid van beide varianten zijn de volgende aspecten van belang:

- De resultaten van het technische haalbaarheidsonderzoek moeten voor de venturi-circulatie worden bevestigd met aanvullend onderzoek op labschaal. Het tot nu toe uitgevoerde labonderzoek bevat (te) veel onzekerheden (zoals de te lange additionele verblijftijd in de gisting) om de variant door te ontwikkelen op grotere schaal. Tijdens extra labonderzoek moet een relatie tussen biogasproductie en organische drogestofafbraak definitief vast worden gelegd en moeten anaerobe omstandigheden beter gewaarborgd worden.
- Wanneer de venturi-variant overwogen wordt, moet het effect van venturi-recirculatie worden vastgesteld zonder dat de verblijftijd in de slibgisting toeneemt.
- Het effect op eventuele afdoding of inactivatie van venturi-destructie in de recirculatielijn moet onderzocht worden.
- Opschaling van de TVB-variant naar demonstratieschaal is nader uit te werken. Hiervoor wordt een geschikte locatie gezocht waarbij vergelijkend onderzoek mogelijk is en de eigenaar voordeel in verhoogde afbraak en biogasproductie kan benutten. De onderzoeksfinanciering kan zo deels via de eigenaar van de gisting worden terugverdiend.

Algemeen wordt aanbevolen om het effect van voorbehandelingstechnieken op de ontwaterbaarheid definitief door verder onderzoek vast te stellen. Dit geldt in principe voor alle vergaande gistingmethoden, zowel voor venturi, thermofiele voorbehandeling, thermofiele gisting én TDH.

# 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 zelfvoortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

# PASTURI DESTRUCTIE: ONTWIKKELING VAN EEN NIEUWE SLIBVOORBEHANDELINGSMETHODE

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN 'T KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Doel onderzoek	1
	1.2 Deelvragen	2
	1.3 Business case	2
	1.4 Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>CONCEPT EN ACHTERGROND</b>	<b>3</b>
	2.1 Concept	3
	2.2 Uitvoering	4
	2.3 Herkomst slibmonsters	4
	2.3.1 Testlocatie rwzi Garmerwolde	4
	2.3.2 Slibstromen	5
	<b>TECHNISCHE HAALBAARHEID EN BUSINESS CASE</b>	
<b>3</b>	<b>TECHNISCHE HAALBAARHEID</b>	<b>7</b>
	3.1 Selectie van varianten	7
	3.2 Interpretatie van experimenten	8
	3.3 Biogasproductie en ods-afbraak	9
	3.3.1 Vergelijking biogasproductie laboratoriumonderzoek	9
	3.3.2 Specifieke biogasopbrengst referentiesituatie	9
	3.3.3 Specifieke biogasproductie venturi-circulatie	10
	3.3.4 Specifieke biogasproductie van thermofiele voorbehandeling	11
	3.3.5 Verwachte biogasopbrengsten op basis van experimenten	11

<b>3.4</b>	Vertaling biogasproductie naar de praktijk	11
3.4.1	Vergelijking model en experimentele waarden	12
<b>3.5</b>	Slibontwatering	14
3.5.1	Ontwateringstesten	14
3.5.2	Vertaling naar praktijk	14
<b>3.6</b>	Samenvatting van input voor de business case	16
<b>3.7</b>	Uitgangspunten thermische drukhydrolyse (TDH)	17
3.7.1	Voorontwatering	17
3.7.2	Organische drogestofafbraak (ods-afbraak)	17
3.7.3	Eindontwatering	18
3.7.4	Technologische input business case TDH	18
<b>4</b>	UITGANGSPUNTEN BUSINESS CASE	19
<b>4.1</b>	Omschrijving referentie en varianten	19
4.1.1	Referentie	19
4.1.2	Pasturi-Destructie	21
4.1.3	Thermische drukhydrolyse	21
<b>4.2</b>	Ods-afbraak en biogasproductie	22
<b>4.3</b>	Ontwatering uitgegist slib	23
<b>4.4</b>	Rejectiewaterbehandeling	23
<b>4.5</b>	Warmte- en elektriciteitsvraag	23
<b>4.6</b>	Financieel-economische uitgangspunten	24
<b>4.7</b>	Aanpak gevoeligheidsanalyse	25
<b>5</b>	RESULTATEN BUSINESS CASE	27
<b>5.1</b>	Inleiding	27
<b>5.2</b>	Drogestofbalans	27
<b>5.3</b>	Energieproductie en -gebruik	27
<b>5.4</b>	Bouw- en investeringskosten	28
<b>5.5</b>	Jaarlijkse kosten en terugverdientijd	30
<b>5.6</b>	Gevoeligheidsanalyse	31
5.6.1	Ods-afbraak	31
5.6.2	Ontwaterbaarheid uitgegist slib	31
5.6.3	Slibeindverwerkingskosten	32
5.6.4	Investeringskosten	33
<b>6</b>	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	34
<b>6.1</b>	Technische haalbaarheid	34
6.1.1	Thermofiele voorbehandeling is technisch haalbaar	34
6.1.2	Venturi-circulatie variant is theoretisch haalbaar	34
<b>6.2</b>	Business case	35
6.2.1	Vergelijkbare terugverdientijd Venturi-circulatie en TVB	35
6.2.2	Invloed van ods-afbraak is beperkt	35
6.2.3	Ontwaterbaarheid uitgegist slib van essentieel belang	35
6.2.4	Sterke invloed kosten slibeindverwerking	36
6.2.5	Energievoordeel gerelateerd aan besparing elektriciteitsverbruik	36
6.2.6	Groot aandeel investeringskosten WKK	36
6.2.7	Sterke locatieafhankelijkheid	36
<b>6.3</b>	Doorkijk naar de toekomst	36

**LITERATUUR- EN LABONDERZOEK**

<b>7</b>	<b>LITERATUUR</b>	<b>38</b>
<b>7.1</b>	Rheologie	38
<b>7.2</b>	Anaerobe gisting	39
7.2.1	Hydrolyse	40
7.2.2	Acidogenese	40
7.2.3	Acetogenese	40
7.2.4	Methanogenese	40
<b>7.3</b>	Relevante procesparameters gisting	40
7.3.1	Parameter – Specifiek oppervlak van materiaal	41
7.3.2	Parameter – Desintegratie	42
<b>7.4</b>	Voorbehandelingsmethoden	43
<b>7.5</b>	Full-scale voorbehandelingstechnologieën	43
<b>8</b>	<b>VERZURING</b>	<b>45</b>
<b>8.1</b>	Theorie	45
<b>8.2</b>	Laboratorium opstelling	45
<b>8.3</b>	Resultaten	46
8.3.1	Micro-aerobe experimenten	46
8.3.2	Anaerobe experimenten	46
8.3.3	Conclusie/discussie	47
<b>9</b>	<b>PASTEURISATIE</b>	<b>49</b>
<b>9.1</b>	Theorie	49
<b>9.2</b>	Experimenteel	49
<b>9.3</b>	Resultaten	50
<b>9.4</b>	Conclusie/discussie	52
<b>10</b>	<b>VENTURI DESTRUCTIE</b>	<b>54</b>
<b>10.1</b>	Theorie	54
<b>10.2</b>	Experimenteel	55
<b>10.3</b>	Resultaten	56
10.3.1	Effect van cavitatie op onbehandeld slib	56
10.3.2	Effect van cavitatie op verzuurd slib	56
10.3.3	Effect van cavitatie op gepasteuriseerd slib	57
10.3.4	Effect van cavitatie op vergist slib	58
10.3.5	Effect van voorbehandeling op deeltjesgrootte	58
<b>10.4</b>	Discussie/conclusie	59
<b>11</b>	<b>GISTING</b>	<b>60</b>
<b>11.1</b>	Experimenteel	60
11.1.1	Continu-gistingen	60
11.1.2	Batch gistingen	62
<b>11.2</b>	Resultaten	64
11.2.1	Mesofiele gistingen, november	64
11.2.2	Thermofiele gistingen	65
11.2.3	Mesofiele gistingen, december - januari	67
11.2.4	Droge-stofmetingen	68
11.2.5	Centraat	69
<b>11.3</b>	Conclusie/discussie	69

<b>12</b>	<b>ONTWATERING</b>	<b>71</b>
	<b>12.1</b> Resultaten ontwatering	<b>72</b>
	<b>12.2</b> Conclusie/discussie	<b>73</b>
<b>13</b>	<b>VISCOSITEIT</b>	<b>74</b>
	<b>13.1</b> Resultaten	<b>75</b>
<b>14</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>77</b>
	Appendix A: Uitgangspunten TDH	82
	Appendix B: Chen-Hashimotomodel	87
	Appendix C: Warmtebalans	88
	Appendix D: Drogestofbalans	89
	Appendix E: Kostenramingen - achtergrond	93
	Appendix F: Kentallen van primair en secundair slib	96
	Appendix G: Relevante proces parameters gisting	97
	Appendix H: Voorbehandelingsmethoden	104
	Appendix I: Full-scale voorbehandelingstechnologieën	109
	Appendix J: Verzuringsexperimenten	112
	Appendix K: Ruwe data vergistingsexperimenten	117
	Appendix L: Centraat	120
	Appendix M: Viscositeit data	122



# 1

## INLEIDING

De reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot, verlaging van slibverwerkingskosten en een verwacht toekomstig tekort aan fossiele grondstoffen zijn de drijvende kracht om het afvalwaterzuiveringsproces en de slibverwerking verder te optimaliseren. Dit is de aanleiding voor de waterschappen in Nederland om verder na te denken over de toekomstige inrichting en uitvoering van de (centrale) slibverwerking en in STOWA-verband onderzoek uit te voeren op dit gebied.

In één van deze onderzoekssporen heeft Waterschap Noorderzijlvest samen met vier andere waterschappen laboratoriumonderzoek uitgevoerd naar de optimalisatie van mesofiele slibgisting. Parallel daaraan is door de samenwerkende Noordelijke Waterschappen een slibstrategiestudie uitgevoerd waarin de potentie van nieuwe technologieën geëvalueerd is.

Binnen deze onderzoeken is een nieuwe innovatieve slibverwerking bedacht, waarbij de nadruk ligt op een betere voorbehandeling van het slib: de Pasturi-destructie; bestaande uit een combinatie van venturi-destructie en pasteurisatie. Deze voorbehandeling is, net als andere slibdestructietechnieken, gericht op een verhoogde ontsluiting van organische stof uit het secundaire slib. Hiermee wordt beoogd door verbeterde afbraak de biogasproductie bij gisting per aangevoerde kg droge stof (ds) te verhogen en een verbeterde ontwaterbaarheid van het digestaat te bereiken. Pasturi-destructie is bedoeld als eenvoudig alternatief voor complexe en relatief kapitaalintensieve destructieprocessen zoals thermische drukhydrolyse (TDH) of elektrisch-mechanische destructietechnieken en lijkt vanwege de voorziene beperkte investeringskosten mogelijk ook voor kleine gistingstanks inzetbaar.

Het bedachte concept Pasturi-destructie is vervolgens onderzocht op technische en financiële haalbaarheid binnen het STOWA-onderzoek Pasturi-destructie. Hiervoor is in eerste instantie een literatuurstudie uitgevoerd. Hierbij is de relevante kennis over slibgisting en beschikbare voorbehandelingstechnieken gebundeld. Vervolgens is onderzoek uitgevoerd op laboratoriumschaal naar de toepasbaarheid van de behandelingsstappen verzuring, pasteurisatie, venturidestructie en de effecten op slibgisting en slibontwatering. Het labonderzoek is uitgevoerd met secundair slib (B-trap-slib) van de rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) Garmerwolde, waarbij verondersteld is dat B-trapslib vergelijkbaar is met conventioneel actief-slib.

### 1.1 DOEL ONDERZOEK

Het STOWA-project heeft als doel om de technische haalbaarheid van twee verschillende uitvoeringsvormen van Pasturi-destructie op labschaal te verkennen en de economische potentie ervan te bepalen via een business case.

## 1.2 DEELVRAGEN

Voor het onderzoek zijn de volgende deelvragen opgesteld:

- Dragen voorgeschakelde verzuring, pasteurisatie en venturidestructie bij aan een verbeterde ontsluiting van slib?
- Draagt een verhoogde ontsluiting van slib bij aan een verhoogde biogasopbrengst en een verbeterd ontwateringsresultaat?
- Is het thermofiel voorbehandelen van slib of het toepassen van venturidestructie op uitgestig slib energetisch en kostentechnisch gunstig?
- Welke slibdestructiemethode is de meest technisch en economisch geschikte techniek?

## 1.3 BUSINESS CASE

Naar aanleiding van het labonderzoek is voor de business case de volgende onderzoeksvraag geformuleerd: wat is de terugverdientijd van full-scale toepassing van venturi in de recirculatie van een slibgisting en van thermofiele slibvoorbehandeling in relatie tot conventionele slibgisting en door TDH ondersteunde slibgisting? De gevoeligheid van de terugverdientijd van de Pasturi-concepten is bepaald voor de aspecten organische drogestofafbraak, ontwaterbaarheid, slibeindafzetkosten en investeringskosten.

## 1.4 LEESWIJZER

Het labonderzoek heeft aangetoond dat het concept Pasturi-destructie een andere haalbare uitvoeringsvorm heeft dan aanvankelijk bedacht. Er zijn namelijk twee technieken naar voren gekomen die technische eenvoudig inpasbaar zijn en zodoende de afbraak in de gisting en de biogasproductie substantieel kunnen verhogen: thermofiele voorbehandeling en recirculatie-venturidestructie van het uitgestig slib. Omdat beide uitvoeringsvormen eenvoudig inpasbaar zijn en een substantiële toename van de biogasproductie vertoonden, is een business case uitgewerkt om de financiële haalbaarheid ervan te bepalen. Het voorliggende rapport presenteert de resultaten van de literatuurverkenning, het labonderzoek en de business case.

Hoofdstuk 2 licht het concept Pasturidestructie en de achtergronden ervan toe. Dit concept is verder onderzocht door literatuuronderzoek, labonderzoek, een technische haalbaarheidsstudie en een business case. Dit rapport beschrijft het volledige onderzoek, maar is voor de juiste focus verdeeld in twee delen:

- Hoofdstuk 3 t/m 6 is onafhankelijk van de navolgende hoofdstukken leesbaar en beschrijft de technische haalbaarheidsstudie en de business case en sluit af met overkoepelende conclusies en aanbevelingen. Zo is direct duidelijk waar de kansen en beperkingen van pasturidestructie liggen.
- Hoofdstuk 7 t/m 14 is een aanvulling op hoofdstuk 3 t/m 6 en presenteert vervolgens de verantwoording voor uitgangspunten voor de technische haalbaarheidsstudie en de business case door toelichting op de literatuurstudie en details van het labonderzoek.

Het volledige rapport wordt daarnaast ondersteund door essentiële bijlagen.

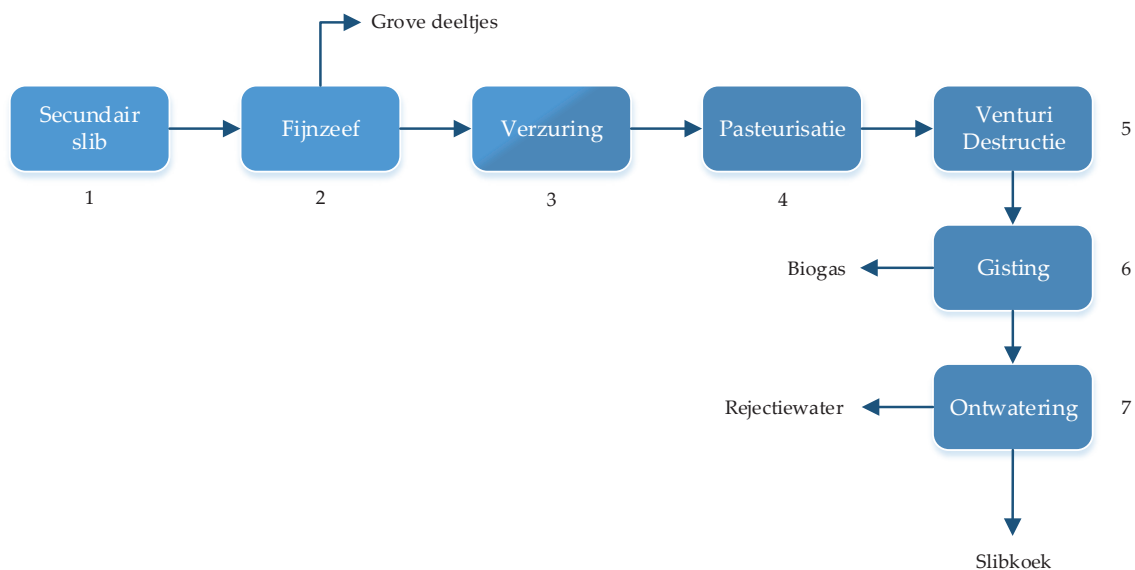
# 2

## CONCEPT EN ACHTERGROND

### 2.1 CONCEPT

Het basisidee van Pasturi-destructie voor slibvoorbehandeling bestaat achtereenvolgens uit een verzuringsstap, een pasteurisatiestap en een venturi-destructiestap. Het voorgestelde proces is schematisch weergegeven in Figuur 2.1.

FIGUUR 2.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN PROCESSTAPPEN PASTURI-DESTRUCTIE



Figuur 2.1 onderscheidt zeven processtappen:

- 1 Ingedikt secundair slib wordt ingenomen.
- 2 Het materiaal wordt door een fijnzeef (ca. 3 mm) gepompt om de grove bestanddelen te verwijderen.
- 3 De gezeefde slibfractie wordt in een geroerde verzuringstank gedurende 3 tot 12 uur door middel van wandverwarming verwarmd tot aan de uiteindelijke pasteurisatietemperatuur. Door de temperatuurverhoging vindt een verzuringsreactie plaats en veranderen de chemische en fysische eigenschappen van het slib. De verzuringsstap dient als opwarmtraject voor de pasteurisatie, waarbij gelijktijdig de biologische activiteit gestimuleerd kan worden.
- 4 Het slib wordt vervolgens gedurende 60 tot 240 minuten gepasteuriseerd bij een (omgekeerd-tijdsafhankelijke) temperatuur van 45 tot 70 °C. Bij deze verhoogde temperatuur treedt denaturatie van eiwitten op, waardoor bereikbaarheid voor exo-enzymen in de opvolgende gistingfase kleiner wordt. Procesmatig wordt verondersteld dat door deze thermofiele behandeling celwanden van aanwezige micro-organismen permeabel (zwak) worden, waardoor intracellulaire stoffen vrijkomen. Deze zogenaamde ontsluiting van biomassa maakt naar verwachting een hogere afbraak en de daaraan gerelateerde hogere biogasproductie bij gisting mogelijk [1],[2],[3].
- 5 Na de pasteurisatiestap worden de bacteriën door een venturibuis gepompt. Door de verlaag-

de druk in de vernauwing van de venturibuis ontstaat cavitatie. De opgewekte cavitatiekrachten breken de celwanden van aanwezige micro-organismen verder open, zodat een maximale hoeveelheid aan koolstof wordt ontsloten [4], [5]. Dit proces is vergelijkbaar met akoestische of mechanische cavitatie van alternatieve destructietechnieken.

- 6 De behandelde slibstroom wordt vervolgens vergist. De grotere hoeveelheid ontsloten koolstof maakt de omzettingsreacties in de gisting makkelijker, waardoor organische drogestof (ods) sneller en verder afgebroken wordt en meer biogas geproduceerd kan worden.
- 7 Als laatste processtap wordt de slibstroom die de gisting verlaat geconditioneerd (met coagulant en/of flocculant) en mechanisch ontwaterd. Naar verwachting kan een hoger drogestofgehalte behaald worden in de geproduceerde slibkoek doordat de asrest in het digestaat verlaagd is. Dit resulteert in lagere kosten en een lagere energievraag voor slibtransport en slibeindverwerking (verbranding).

## 2.2 UITVOERING

Het concept is onderzocht door eerst op labschaal door de individuele stappen van verzuring, pasteurisatie en venturi-destructie te bestuderen. Op basis van dit verkennend onderzoek zijn de optimale procesparameters bepaald voor de individuele stappen, waarna gekeken is naar de combinatie van stappen. Deze combinatie-varianten zijn vervolgens onderzocht op vergistbaarheid, biogasproductie en ontwateringsresultaten, alsook de samenstelling van het rejectiewater.

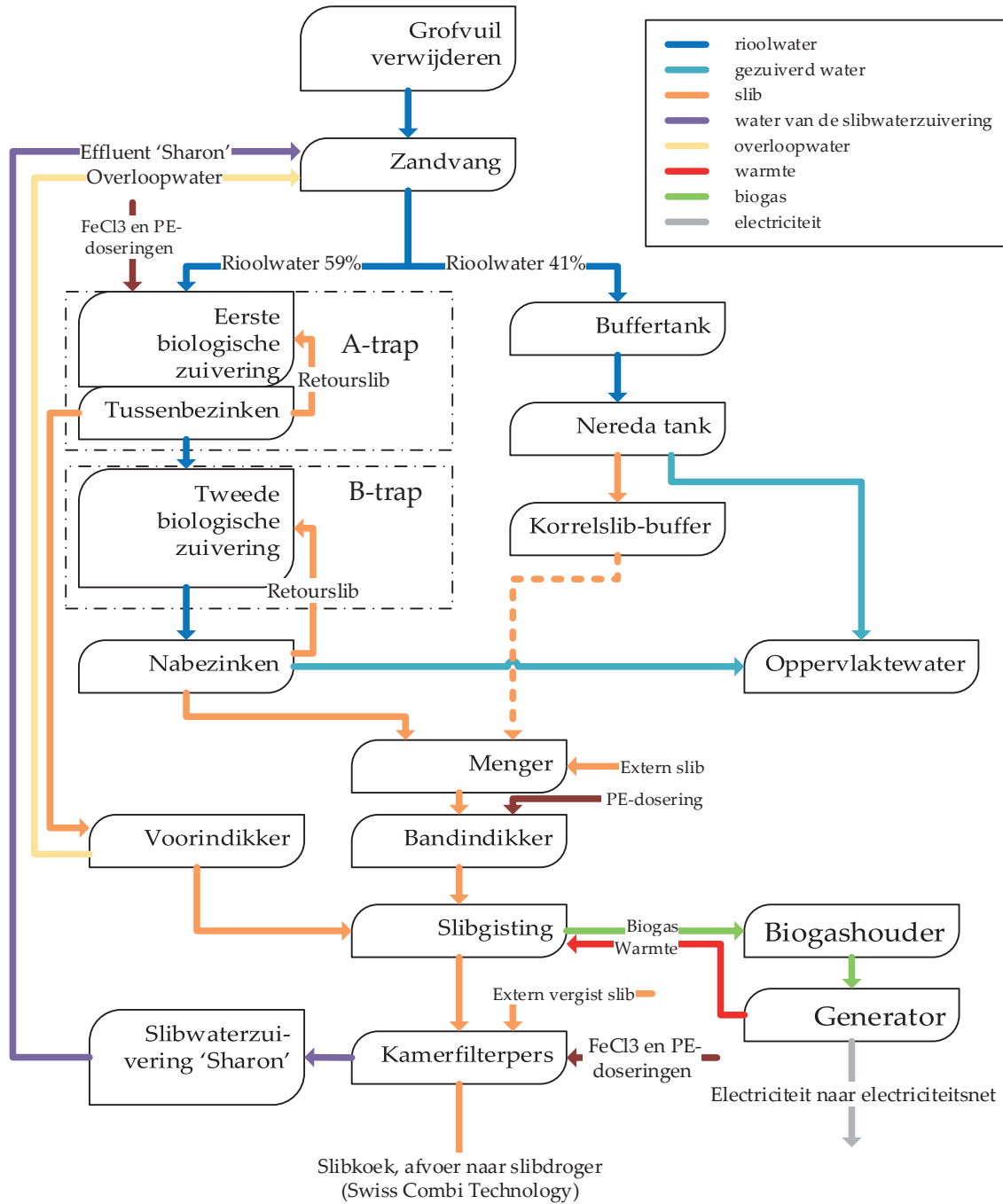
## 2.3 HERKOMST SLIBMONSTERS

### 2.3.1 TESTLOCATIE RWZI GARMERWOLDE

Het labonderzoek is uitgevoerd met slib afkomstig van rwzi Garmerwolde (375.000 i.e.). De rwzi Garmerwolde is naast de centrale afvalwaterzuiveringsinstallatie van de stad Groningen en omstreken ook een centrale slibontwateringslocatie van de waterschappen Noorderzijlvest en Hunze en Aa's. Slib afkomstig van rwzi's van Noorderzijlvest en een deel van de rwzi's van Waterschap Hunze en Aa's (13.500 ton d.s./jaar) wordt hier (deels) vergist en op de Swiss Combi-installatie mechanisch ontwaterd tot circa 26% d.s. met kamerfilterpersen, waarna de slibkoek wordt afgevoerd naar de eindverwerking. Het slib dat via wegtransport de slibverwerking Garmerwolde bereikt, bestaat uit vergist en onvergist slib. Het onvergiste slib wordt gevoed aan de gistingstanks op rwzi Garmerwolde. Het vergiste slib wordt gemengd met lokaal vergist slib waarna het mechanisch wordt ontwaterd.

Figuur 2.2 toont schematisch de processtappen van rwzi Garmerwolde. Te zien is dat na het verwijderen van roostergoed, grotere deeltjes en zand, het influent deels (ca 41% op jaarbasis) naar de Nereda-installatie gaat ofwel (59% op jaarbasis) naar de biologische behandelingsstappen van het AB-systeem wordt geleid. Tijdens het labonderzoek met slib (december 2013-januari 2014) produceerde de Nereda-installatie echter nog geen korrelslib waardoor alleen AB-slib en extern slib werd vergist.

FIGUUR 2.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET ZUIVERINGSPROCES VAN RWZI GARMERWOLDE (PER 2014)



### 2.3.2 SLIBSTROMEN

Slib afkomstig van de waterlijn van rwzi Garmerwolde, wordt geclassificeerd als A-trap-slib, B-trap-slib en Nereda-korrelslib. Karakteristieken van het geproduceerde slib hangen af van het zuiveringsproces, de procesparameters, omgevingsfactoren en rioolwaterkarakteristieken [6]. Deze locatiegebonden variabelen maken dat het vergelijken van slibben uit verschillende rwzi's uitdagend is. Voor deze studie is een vertaalslag gemaakt om de resultaten verkregen met het slib van rwzi Garmerwolde te vertalen naar "Nederlands slib". Deze vertaalslag is toegelicht in hoofdstuk 3. De samenstelling van het geteste slib is getoond in Tabel F.1 (Appendix F:).

Primair slib wordt afgescheiden uit het rioolwater door bezinking en bevat hoofdzakelijk vezels (12-40%), gevolgd door vetten (14-34%) en eiwitten (19-27%) met anorganisch materiaal als restant [6][7]. Primair slib heeft een hoger aandeel biologische snel beschikbare organische bestanddelen en wordt sneller afgebroken in een anaeroob gistingproces dan secundair slib en levert na gisting en mechanische ontwatering een hoger d.s.-gehalte [6],[8]. De rwzi Garmerwolde produceert in de A-trap (hoogbelaste beluchtingsreactor met een slibretourstroom en  $\text{FeCl}_3$  + PE-doseringen) A-trap-slib in plaats van primair slib. De A-trap verwijdert onder hoogbelaste condities (biologisch) koolstof (C) en (chemisch) fosfaat (P) uit het influent. Typische waarden voor A-trap-slibproductie liggen in het bereik van 0,1 tot 0,2 kg d.s./ $\text{m}^3$  influent, wat inhoudt dat 30-40% van het aanwezige biologisch zuurstofverbruik (BZV) op deze manier gebonden wordt[9]. Het A-trap-slib wordt afgescheiden in de tussenbezinktanks. Het A-trapslib wordt gravitair ingedikt alvorens het wordt gevoed aan de slibgisting.

Secundair/B-trap slib wordt afgescheiden in de nabezinktanks na biologische behandeling in anoxische en oxische zones van de B-trap. Tijdens de tweede biologische behandlungsstap van rwzi Garmerwolde wordt resterend BZV, stikstof (N) en resterend fosfaat (P) verwijderd, B-trapslib is vergelijkbaar met conventioneel nitrificerend-denitrificerend actief-slib. Tijdens metabolisme worden organische componenten omgezet in  $\text{CO}_2$  en wordt stikstofgas geproduceerd. De rest van het BZV, N en P wordt opgenomen door de actief-slibbacteriën voor groei. De cellen van de organismen bestaan uit complexe polymeerstructuren die maken dat secundair slib minder snel wordt afgebroken dan primair slib [10].

De rwzi Garmerwolde verwerkt naast het rwzi-eigen slib ook extern primair en secundair slib van andere rwzi's. Aan het externe slib wordt meestal in de AT's al  $\text{FeCl}_3$  gedoseerd voor fosfaatbinding. Het externe slib wordt met het secundair slib van Garmerwolde opgemengd, waarna voor mechanische indikking PE toegevoegd wordt. Het ds-aandeel van extern primair slib op de totale slibaanvoer naar de bandindkiking is met 5% zeer beperkt. Na de gisting wordt er een extern vergiste slibstroom aangeleverd voor ontwatering via de kamerfilterpersen.

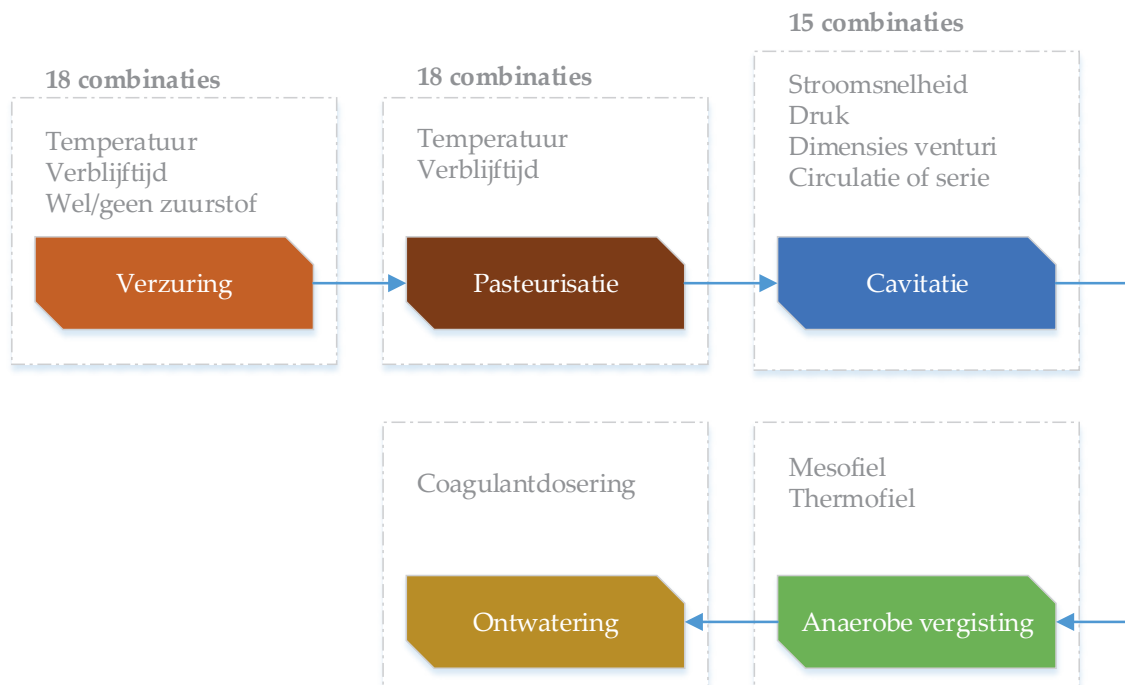
# 3

## TECHNISCHE HAALBAARHEID

### 3.1 SELECTIE VAN VARIANTEN

Het basisconcept van Pasturi-destructie bestaat uit een combinatie van behandelingsmethoden die afzonderlijk - of deels in combinatie - in de praktijk of de literatuur zijn toegepast op slib. Het oorspronkelijke concept ging op basis van bestaande en onderzochte methoden uit van varianten op de behandelstappen verzuring, pasteurisatie en cavitatie. Dit is getoond in Figuur 3.1.

FIGUUR 3.1 EXPERIMENTELE KEUZEBOOM OP BASIS VAN PROJECTVOORSTEL EN LITERATUURONDERZOEK



Voor de verzuringstap zijn 18 experimentele combinaties beschouwd door verschillen in temperatuur (37 – 55 °C), verblijftijd (4 – 24 uur) en het wel of niet verdringen van zuurstof. In de literatuur en de praktijk is pasteurisatie een combinatie van een temperatuurbehandeling met een bijbehorende verblijftijd. Hiervoor zijn meerdere temperaturen voorgesteld (45 – 70 °C) met bijbehorende verblijftijden waardoor 18 experimentele combinaties zijn onderzocht.

Voor de cavitatie-stap met een venturi-buis zijn 15 experimentele combinaties beschouwd, onder meer door de combinatie tussen meerdere venturi-buizen in serie en recirculatie over één of meerdere venturi-buizen.

Wanneer deze verschillende stappen gecombineerd zouden worden onderzocht, inclusief anaerobe vergisting, zijn er meer dan 9.000 verschillende experimenten uit te voeren. Dit

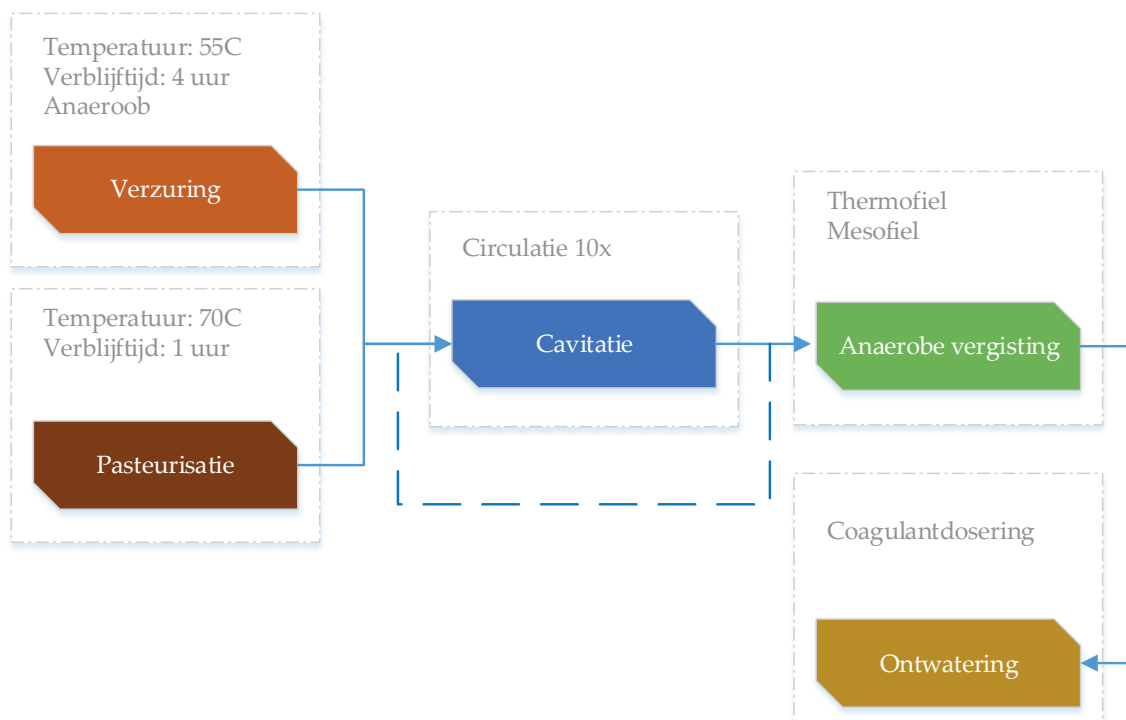
aantal zou vanuit een wetenschappelijke invalshoek verveelvoudigen wanneer ook controle-experimenten uitgevoerd zouden moeten. Om deze reden is besloten om de voorgestelde behandelingsstappen eerst afzonderlijk te onderzoeken, om van daaruit de varianten te kiezen die het hoogste verwachte effect op de afbraak en biogasproductie zouden hebben. Op basis van de resultaten van het verkennende onderzoek (zie Appendix J: en Appendix K:) is het aantal vergistingsexperimenten teruggebracht tot acht varianten (zie Figuur 3.2). Hier komen nog vier varianten bij die niet getoond zijn in de figuur, namelijk slib dat zonder temperatuurbehandeling is onderzocht.

In de beschrijving van de resultaten wordt vervolgens een selectie van varianten uitgewerkt waarbij naar de experimenten wordt verwezen op basis van hun naamgeving. De varianten zijn:

- slib zonder temperatuurbehandeling, onbehandeld slib genoemd;
- slib wat op 55 °C is behandeld gedurende vier (4) uur, zogenaamd verzuurd slib;
- slib wat op 70 °C is behandeld gedurende één (1) uur, gepasteuriseerd slib.

Dit slib is vervolgens rechtstreeks vergist of is eerst over de venturi-buis geleid voor cavitatie, waarna het de naamgeving 10x venturi meekrijgt.

FIGUUR 3.2 TERUGGEBRACHTE KEUZEBOOM OP BASIS VAN VERKENNENDE EXPERIMENTEN



### 3.2 INTERPRETATIE VAN EXPERIMENTEN

Voor het opstellen van de business cases voor de onderzochte behandelingsmethoden is het belangrijk om de experimentele data (zie voor details hoofdstuk 9 - 12) te vertalen naar een praktijksituatie. Tijdens het verkennend technisch onderzoek is gebruik gemaakt van slib afkomstig van de rwzi Garmerwolde en alle experimenten zijn op batch-laboratoriumschaal uitgevoerd. Voor de business case wordt echter uitgegaan van een fictieve referentie-rwzi van 250.000 i.e. die representatief is voor de Nederlandse situatie. Op de punten waarin rwzi



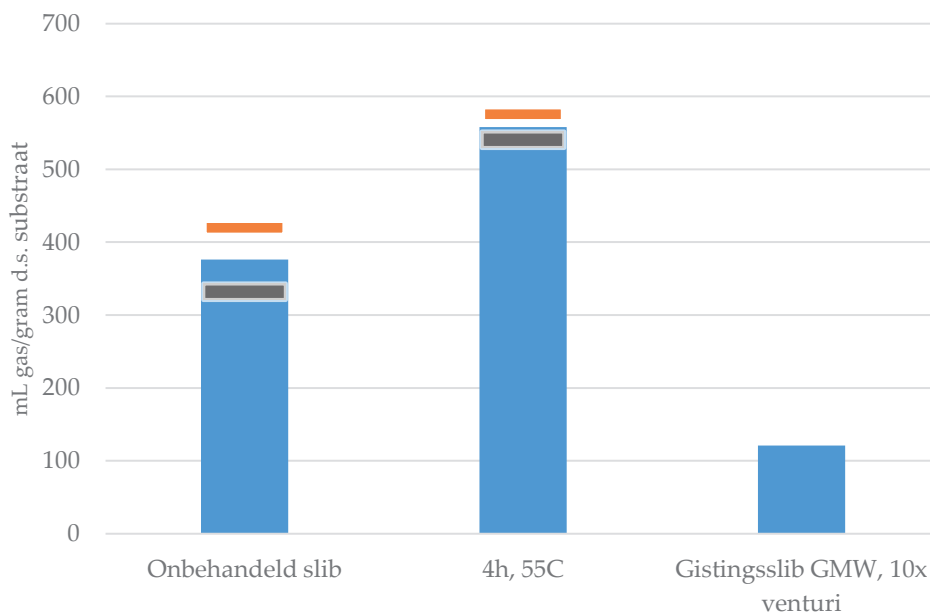
Garmerwolde van deze referentie-rwzi afwijkt, is een vertaalslag gemaakt, evenals dat een vertaling van een experimentele batch-gisting naar een continu gistingproces op praktijkschaal is doorgevoerd. Dit wordt in de volgende paragrafen toegelicht, evenals een verwachting met betrekking tot de ontwateringsresultaten.

### 3.3 BIOGASPRODUCTIE EN ODS-AFBRAAK

#### 3.3.1 VERGELIJKING BIOGASPRODUCTIE LABORATORIUMONDERZOEK

In de figuur 3.3 zijn de belangrijkste biogasopbrengsten van het labonderzoek (zie hoofdstuk 11) van een mesofiele gistingreactor (SRT = 20 dagen, T = 35°C) met ingedikt 'secundair' slib van de rwzi Garmerwolde weergegeven. Hierin geven de blauwe balken de gemiddelde biogasopbrengst van representatieve experimenten weer inclusief de spreiding (grijze balk = laagste gemeten waarde; oranje balk = hoogste gemeten waarde). De referentie biogasopbrengst is weergegeven als 'Onbehandeld slib'; de behandelingsvariant 'Thermofiele Voorbehandeling' (TVB) is weergegeven door de procescondities '4h, 55C'; de behandelingsvariant 'Venturi circulatie' is gebaseerd op de opbrengst van 'Gistingsslib GMW<sup>1</sup>, 10x venturi'.

FIGUUR 3.3 GEMIDDELTE BIOGASPRODUCTIE NA 20 DAGEN MET SPREIDING, MESOFIELE GISTING, LABORATORIUMEXPERIMENTEN DECEMBER 2013 – JANUARI 2014



#### 3.3.2 SPECIFIEKE BIOGASOPBRENGST REFERENTIESITUATIE

Bepaling van de biogasopbrengst van de referentiesituatie is gedaan met behulp van de meetgegevens in Figuur 3.3. Er is uitgegaan van de gemiddelde spreiding tijdens de experimenten van 4% ten opzichte van de gemiddelde biogasproductie.

Voor een mesofiele gisting zonder voorbehandeling is de beste biogasopbrengst van 420 mL/gram d.s. substraat relatief hoog, maar wel binnen de mogelijke bandbreedte, in vergelijking met data uit andere experimenten en literatuurgegevens. In de literatuur wordt voor praktijk-situaties en pilot-installaties een bereik van 235 – 530 mL/gram d.s. substraat gerapporteerd [11],[12]. De rwzi Venlo bijvoorbeeld leverde, zonder TDH-installatie, gemiddeld een biogasproductie van 236 mL/gram d.s. substraat gevoed [13]. Als gemiddelde specifieke biogasopbrengst

1 GMW = rwzi Garmerwolde

voor de referentiesituatie is vervolgens uitgegaan van een afgeronde waarde van 400 mL/gram d.s. substraat.

Wanneer deze data vertaald wordt naar de referentie-rwzi met secundair slib, moet er nog een correctie plaatsvinden. De rwzi Garmerwolde ontvangt secundair slib afkomstig van externe rwzi's waar ook primair slib bij in zit. Dit primair slib-aandeel is verantwoordelijk voor 5,6% van de organische vracht wat via bandindikking verwerkt wordt in de gisting<sup>2</sup>. [14] Hiervoor is voor gecorrigeerd door de biogasopbrengst met 5,6% te verminderen waardoor de gemiddelde referentieopbrengst vastgelegd is op 380 mL/gram d.s.<sup>3</sup>. toegevoegd substraat. Dit is een aannemelijke gemiddelde specifieke biogasproductie die ook op vergelijkbare gisting-installaties op praktijkschaal gevonden wordt [15].

### 3.3.3 SPECIFIEKE BIOGASPRODUCTIE VENTURI-CIRCULATIE

Voor het concept Venturi-circulatie is in de laboratoriumtesten gebruik gemaakt van uitgegist slib van rwzi Garmerwolde (zie hoofdstuk 11). Dit kan beschouwd worden als een mengsel (ingehend) van 1/4<sup>e</sup> A-trap slib en 3/4<sup>e</sup> B-trap slib (afkomstig van rwzi Garmerwolde + externe rwzi's). Gebaseerd op gemiddelde afbraakpercentages van rwzi Garmerwolde bevat de uitgaande stroom na afbraak nog 1/8<sup>e</sup> A-trap slib en 7/8<sup>e</sup> secundair slib op organische-drogestofbasis, plus een deel van de gistingcultuur uit de tank [14]. Op basis hiervan is gesteld dat de extra toename in biogasproductie nagenoeg hoofdzakelijk van het secundaire slib komt, gevolgd door een eventuele afbraak van de gistingcultuur en het A-trap slib.

Bij de laboratoriumexperimenten, nader toegelicht in paragraaf 11.2, is in het begin van de gisting met de venturi-circulatie gedurende 1 dag geen goede registratie geweest van de gasproductie. Visueel is echter wel gasproductie vastgesteld. Op basis van het verloop van het gistingproces is geconstateerd dat ca. 25 mL/gram d.s. substraat gasproductie niet geregistreerd is. Hierdoor is besloten om het resultaat van 'Gistingsslib GMW, 10x venturi' op te hogen van 121 mL/gram d.s. toegevoegd substraat, naar 140 mL/gram d.s. substraat als verwachte specifieke biogasproductie.

In het worst case scenario is rekening gehouden met de mogelijkheid dat alle additionele afbraak uitsluitend afkomstig is van het secundaire slib. In dat geval is de biogasopbrengst met 1/8<sup>e</sup> verminderd, van 140 mL/gram d.s. substraat naar 123 mL/gram d.s. toegevoegd substraat<sup>4</sup>. Om sterker de gevoeligheid te laten zien in de business case, is dit vervolgens verminderd met 10% tot 110 mL/gram d.s. substraat.

Voor het best case scenario wordt verwacht dat al het aanwezige slib, inclusief een deel van de gistingcultuur, wordt afgebroken en omgezet wordt in biogas. Echter zal nader onderzoek verricht moeten worden om vast te stellen of deze veronderstelling te staven is in laboratorium- en praktijkomstandigheden. Voor de input van de business case wordt echter verwacht dat door middel van optimalisaties in de praktijk 25% extra biogasproductie verwacht kan worden. Dit komt afgerond neer op een biogasproductie van 180 mL/gram d.s. toegevoegd substraat.

In de praktijk zal venturi-circulatie over de gisting plaatsvinden. Hierdoor wordt de verwachte biogasopbrengst een optelling van de referentie biogasopbrengst en de gevonden opbrengst

2 Primair slib van rwzi Delfzijl, 5,1 ds.% en 5,6 ods.%

3  $420 \cdot 0,96 \cdot 0,944 = 380 \text{ mL/gram d.s.substraat}$

4  $140 \cdot 7/8 = 123 \text{ mL/gram d.s. substraat}$

voor de venturi-circulatie, waarna dit gemodelleerd is. Dit wordt bij de vertaling naar de praktijk verder toegelicht.

### 3.3.4 SPECIFIEKE BIOGASPRODUCTIE VAN THERMOFIELE VOORBEHANDELING

De verwachte biogasopbrengst voor de thermofiele voorbehandeling is bepaald door de gemiddelde biogasopbrengst te nemen van de experimenten, en dit te corrigeren voor de aanwezigheid van primair slib. Hiervoor is dezelfde correctiefactor gebruikt als voor de referentie biogasopbrengst. De worst case en best case is gebaseerd op de gevonden spreiding inclusief correctie voor de aanwezigheid van primair slib.

### 3.3.5 VERWACHTE BIOGASOPBRENGSTEN OP BASIS VAN EXPERIMENTEN

In tabel 3.1, 3.2 en 3.3 zijn respectievelijk de verwachte, worst case en best case biogasopbrengsten en de daaraan gerelateerde ods-afbraak op basis van de experimentele data samengevat. Voor de gevoeligheidsanalyse binnen de business case is de spreiding in biogasopbrengst uit het onderzoek uitvergroet. Hierdoor wordt de afhankelijkheid van de biogasopbrengst ten aanzien van de economische haalbaarheid beter zichtbaar.

Vanuit de specifieke biogasproductie is de relatieve toename in afbraak van organische drogestof berekend. Doordat de experimenten in een gesloten batch-systeem plaats hebben gevonden is biogasproductie direct één-op-één afkomstig van een toename in afgebroken organische stof.

TABEL 3.1 VERANDERING ORGANISCHE STOFAFBRAAK EN BIOGASPRODUCTIE - GEMIDDELTE SITUATIE

	Referentie	Venturi-circulatie	Thermofiele voorbehandeling
Biogasproductie (ml/g d.s. substraat)	380	520	530
Relatieve toename afbraak org. d.s.	-	36,8%	39,5%

TABEL 3.2 VERANDERING ORGANISCHE STOFAFBRAAK EN BIOGASPRODUCTIE - WORST CASE

	Referentie	Venturi-circulatie	Thermofiele voorbehandeling
Biogasproductie (ml/g d.s. substraat)	380	490	500
Relatieve toename afbraak org. d.s.	-	29,0%	31,6%

TABEL 3.3 VERANDERING ORGANISCHE STOFAFBRAAK EN BIOGASPRODUCTIE - BEST CASE

	Referentie	Venturi-circulatie	Thermofiele voorbehandeling
Biogasproductie (ml/g d.s. substraat)	380	560	550
Relatieve toename afbraak org. d.s.	-	47,3%	44,7%

## 3.4 VERTALING BIOGASPRODUCTIE NAAR DE PRAKTIJK

Het toegepaste testprotocol in de labproeven resulteert in de maximale ods-afbraak en biogasopbrengst na slibgisting gedurende 20 dagen (overeenkomstig praktijksituaties). De logaritmisch verlopende biogasproductie van een batchproef (zie figuur 3.4) heeft na een looptijd van minimaal 20 dagen een plafond bereikt waarbij de maximale opbrengst bepaald wordt.

Doordat de venturi-circulatie op uitgestikt slib als nageschakelde behandeling een extra toename in biogasproductie vertoonde ten opzichte van de controle-experimenten, wordt verondersteld dat de maximale afbraak en biogasproductie nog verder toeneemt (met 140 mL/gram d.s. substraat) in aanvulling op de eerste gistingstap. Om deze redenen is de verwachte biogas-

opbrengst van venturi-circulatie slib een combinatie van de opbrengst van de referentieopbrengst met secundair slib (de veronderstelde eerste gistingstap: 380 mL/gram, d.s. substraat) en de extra opbrengst van de venturi nabehandeling. Door deze extrapolatie is de verwachte biogasopbrengst van de venturi-circulatie vastgelegd.

TABEL 3.4 BIOGASOPBRENGST VENTURI-CIRCULATIE NA 20 DAGEN

	mL/gram d.s substraat
Referentie (eerste gistingstap)	380
Venturi nabehandeling	140
Venturi-circulatie (verwacht)	520

Deze extrapolatie is een veronderstelling die tijdens het onderzoek in het laboratorium nog niet is aangetoond, vandaar dat deze aannames nader onderzocht moeten worden. Voor het worst case scenario is rekening gehouden met de mogelijkheid dat A-trap slib nog bijgedragen heeft aan de biogasopbrengst, waardoor de biogasopbrengst verminderd is tot alleen de opbrengst van secundair slib behandeld met de venturi. In de best case situatie is op basis van de gemeten gegevens de maximaal haalbare waarde gemodelleerd voor de nabehandeling, waarna deze is opgeteld bij de referentie. Verder onderzoek moet uitwijzen of dit resultaat bij een venturi-circulatie in de praktijk behaald kan worden.

Opgemerkt wordt dat de venturi-circulatie in de praktijk de gehele gistingcultuur behandeld, waarbij nu nog onbekend is in welke mate afsterving in de recirculatie plaatsvindt. Als de aantasting of afsterving van gistingbacteriën substantieel is, kan dit een remmende werking hebben op de gisting. Vervolgonderzoek moet uitwijzen of dit afsterving en negatieve invloed optreedt, en hoe groot dit effect is op de gisting en de biogasopbrengst.

### 3.4.1 VERGELIJKING MODEL EN EXPERIMENTELE WAARDEN

In Figuur 3.4 zijn de gemodelleerde biogasproducties vergeleken met de experimentele resultaten voor de referentie, thermofiele voorbehandeling (TVB) en de behandeling van uitgistig slib met een venturi.

Op basis van de experimentele data zijn vervolgens de constanten bepaald voor de volgende formule die de biogasproductie per dag beschrijft [10]:

$$V_{BR} = C_1 * (1 - e^{-C_2 * t_{BR}})$$

Waarbij:

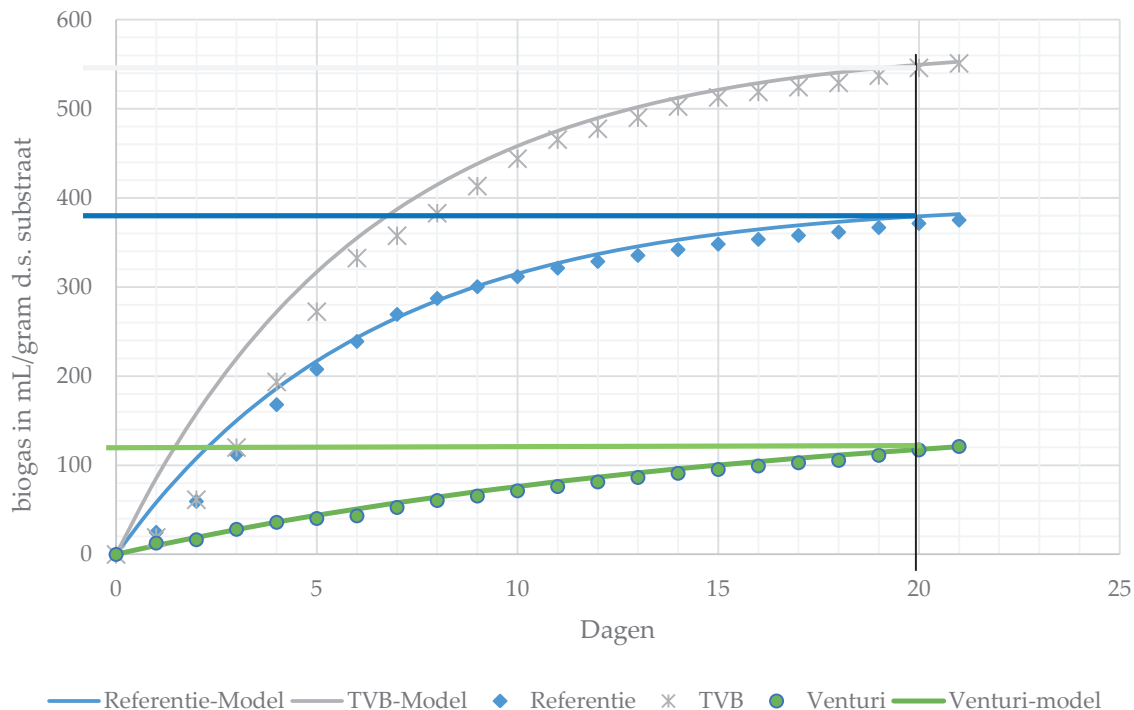
$V_{BR}$  = Biogasproductie, in mL / (gram d.s. substraat)

$C_x$  = te bepalen constantes

$t_{BR}$  = Verblijftijd

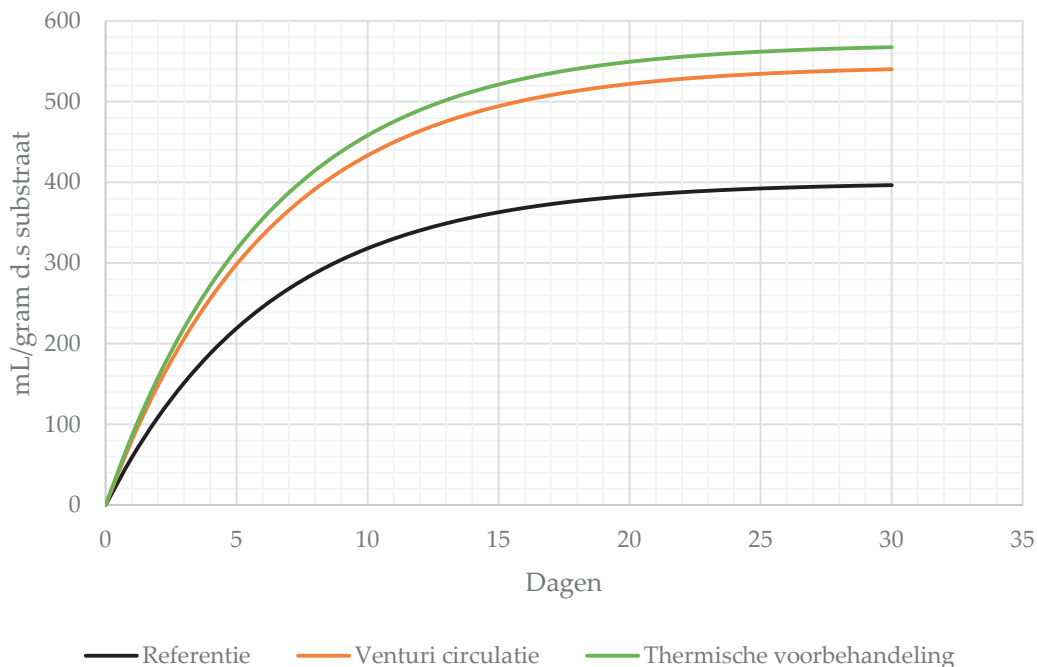
De experimentele data laten een karakteristieke s-curve zien behorend bij gistingen, maar deze is met deze formule niet te modelleren. Dit is eenvoudig te verklaren door de variabelen van de formule, die nauwkeurig het eindresultaat modelleert ten koste van nauwkeurigheid aan het begin van de gisting.

FIGUUR 3.4 VERGELIJKING VAN GEMODELLEERDE EN EXPERIMENTELE WAARDEN



Aan de hand van de gevonden constanten valt op te maken dat de maximale biogasopbrengst veranderd is, maar dat de relatieve snelheid van biogasproductie onveranderd blijft. Met behulp van deze gegevens valt ook een uitspraak te doen over het gistingsresultaat van venturi-circulatie slib, zoals ook weergegeven in Figuur 3.5.

FIGUUR 3.5 MAXIMALE AFBREEKBAARHEID EN BIOGASPRODUCTIE



De uiteindelijke vertaling naar de praktijk wordt gedaan op basis van de relatieve toename in ods-afbraak en de biogasproductie van het secundaire slib, zoals weergegeven in tabellen 3.1, 3.2 en 3.3.

### 3.5 SLIBONTWATERING

#### 3.5.1 ONTWATERINGSTESTEN

Tijdens het laboratoriumonderzoek naar de pasturi-destructievarianten is naast de afbraak en biogasproductie ook de ontwaterbaarheid van de digestaten van de batch-monsters onderzocht (zie hoofdstuk 12 voor nadere uitwerking). Dit onderzoek is uitgevoerd met een laboratoriumopstelling van een ontwateringspers, de zogenaamde Mareco-pers. Tijdens deze verkennende ontwateringsproeven is naar voren gekomen dat, bij een gelijkblijvende ijzerdosering, de polymeerdosering met 20% verhoogd moet worden voor de behandelde monsters om een vergelijkbaar ontwateringsresultaat te behalen als de referentie. De oorzaak van de afname van de ontwaterbaarheid door de voorbehandeling is onbekend en vraagt om nader onderzoek. Vertaling van de ontwateringsresultaten naar de praktijk is niet rechtstreeks uit te voeren doordat de laboratoriumsituatie significant afwijkt van de praktijk. Dit komt in eerste instantie door de samenstelling, en met name de asrest, van het ontwaterde monster; op basis van het organische drogestofgehalte bevat het monster 50% gistingscultuur en 50% secundair slib voor de gisting. In de praktijk zal het slib minder gistingscultuur bevatten en zal het gemengd zijn met vergist primair slib.

#### 3.5.2 VERTALING NAAR PRAKTIJK

Omdat de praktijksituatie op labschaal niet nagebootst kon worden, is het noodzakelijk om op basis van literatuur en praktijkresultaten een uitspraak te doen over de verwachte ontwateringsresultaten. Vanuit de literatuur wordt gesteld dat een hogere afbraak zorgt voor een toename van colloïde deeltjes (<4,2 micron) [16] en een hoger aandeel asrest in het digestaat. De kleine deeltjes dichtslibben van zeef(banden) – blinding genoemd – veroorzaken met een verminderd ontwateringsresultaat. Tijdens het onderzoek is ook aangetoond dat de behandelde slibmonsters een deeltjesgroottereductie laten zien na vergisting (zie hoofdstuk 12). Het toevoegen van kationen in de vorm van ijzerchloride, magnesiumchloride, etc. is zeer geschikt om deze colloïde deeltjes te conditioneren en te binden [17],[18]. Wanneer dit niet gebeurt, kunnen deze deeltjes de effectiviteit van het gebruikte polymeer beïnvloeden [18]. Daarnaast is ook het type polymeer constant gehouden, terwijl het mogelijk noodzakelijk is om deze aan te passen aan het veranderde slib.

Ondanks dat een verbeterd ontwateringsresultaat niet is aangetoond tijdens het onderzoek, kan op basis van bovengenoemde gegevens een verwachting uitgesproken worden. Met behulp van gegevens uit het STOWA Handboek Slibgisting (Figuur 3.6) en de Enquête Polyminder 2012 kan afgeleid worden dat een verbeterde afbraak doorgaans ook zorgt voor een verbeterde ontwatering. Dit is ook in lijn met gegevens uit de literatuur voor verschillende voorbehandelingsmethoden [19], [20],[21], [22]. In onderstaande tabel staan de afbraakgegevens voor de verschillende varianten. Hierbij is uitgegaan van de organische drogestofafbraak afkomstig uit het Chen-Hashimoto-model, zoals berekend voor de business case.

TABEL 3.5

ODS-GEHALTE VOOR EN NA GISTING VOOR DE REFERENTIE, VENTURI-CIRCULATIE EN TVB SITUATIE

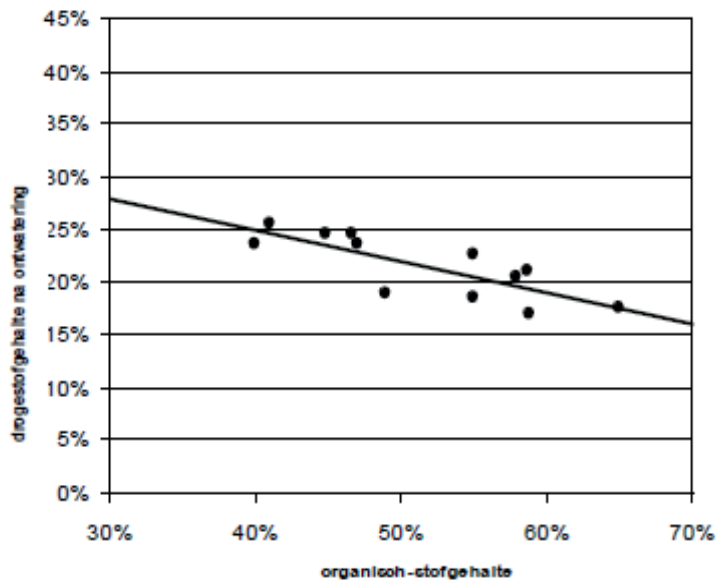
	Referentie (33,8% afbraak)	Venturi (46,3% afbraak)	TVB (47,1% afbraak)
ods (wt.%) – voor gisting	70%	70%	70%
ods (wt.%) – na gisting	60,7%	55,6%	55,2%
As-/gloeirest (wt.%) – na gisting	39,3%	44,4%	44,8%

De as-/gloeirest is bepaald door de afname in organische drogestof bij een gelijkblijvende hoeveelheid anorganische stof. Een kilogram droge stof bevat voor de gisting 700 gram organische (70% ods-gehalte) en 300 gram anorganische stof (30% asrestgehalte). Het organische stof wordt afgebroken en omgezet in biogas, waardoor het aandeel organische stof afneemt. Voor de referentiesituatie is er na gisting nog 463 gram organische stof aanwezig, wat overeenkomt met 60,7% van het overgebleven droge stof. De asrest van dit monster is navenant 39,3%.

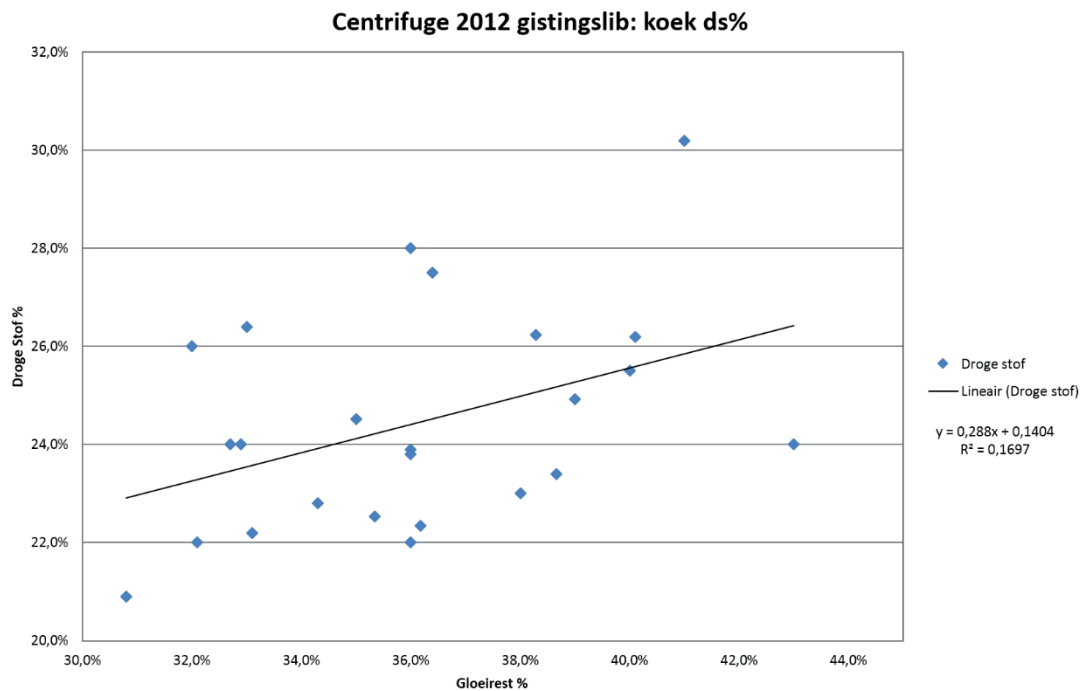
Op basis van Figuur 3.7 zou de referentiesituatie met een centrifuge een ontwateringsresultaat kunnen behalen van ongeveer 25% ds. Uitgaande van de verwachte toename in drogestofafbraak en op basis van bovenstaande literatuur en praktijkresultaten met venturi-desintegratie (CROWN++) [22] zou een relatieve verbetering van de ontwateringsgraad tussen de 8 – 12% mogelijk moeten zijn. Voor de business case wordt uitgegaan van een referentieontwateringsgraad van 23% ds, waardoor de behandelde monsters op een ontwateringsgraad van 25 – 26% ds uitkomen. Waarschijnlijk vereist deze ontwateringsstap wel nog steeds een verhoging van de polymeerdosering voor slibconditionering.

FIGUUR 3.6

ONTWATERD SLIB VERSUS HET ORGANISCHE STOFGEHALTE IN HET TE ONTWATEREN SLIB [17]



FIGUUR 3.7 ONTWERD SLIB VERSUS GLOEIREST IN HET TE ONTWEREN SLIB, MET EEN CENTRIFUGE [23]



Op basis van het bovenstaande zijn in tabel 3.6 de verwachte ontwateringsresultaten voor de praktijk, voor beide varianten bij het gebruik van een centrifuge samengevat. Hierbij wordt opgemerkt dat de correlatie tussen gloeirest en verbeterd ontwateringsresultaat zeer wisselend is, en soms zelfs niet geconstateerd wordt. Definitief uitsluitsel over het effect van een voorbehandelingsmethode zal daarom verkregen moeten worden door middel van aanvullend onderzoek en praktijktest op de betreffende rwzi.

TABEL 3.6 VERWACHTE, WORST CASE EN BEST CASE ONTWERINGSRESULTATEN VOOR DE VENTURI-CIRCULATIE EN THERMOFIELE VOORBEHANDELING

	Verwacht	Worst case	Best case
Verwachte ontwatering	25% d.s.	23% d.s.	26% d.s.
PE - dosering	+20%	+20%	+20%

### 3.6 SAMENVATTING VAN INPUT VOOR DE BUSINESS CASE

Op basis van de experimentele data en de interpreterende paragrafen zijn onderstaande samenvattende tabellen opgesteld als basis voor de business cases inclusief de gevoeligheidsanalyses voor de varianten venturi-circulatie en thermofiele voorbehandeling.

TABEL 3.7 INPUTGEGEVENS BUSINESS CASE, VARIANT VENTURI-CIRCULATIE

	Verwacht	Worst case	Best case
Biogasproductie (mL/g d.s. gevoed)	520	490	560
Relatieve toename afbraak o.d.s.	36,8%	29,0%	47,3%
Verwachte ontwatering	25% ds	23% ds	26% ds
PE-dosering	+20%	+20%	+20%



TABEL 3.8 INPUTGEGEVENS BUSINESS CASE, VARIANT THERMOFIELE VOORBEHANDELING (TVB)

	Verwacht	Worst case	Best case
Biogasproductie (mL/g d.s. gevoed)	530	500	550
Relatieve toename afbraak o.d.s.	39,5%	31,6%	44,7%
Verwachte ontwatering	25% ds	23% ds	26% ds
PE-dosering	+20%	+20%	+20%

### 3.7 UITGANGSPUNTEN THERMISCHE DRUKHYDROLYSE (TDH)

Pasturi-destructie is onderzocht als alternatief voor thermische drukhydrolyse (TDH). Daarom is de business case ook uitgewerkt voor een generaliseerd, leveranciersafhankelijk, TDH-proces. Op basis van gepubliceerd onderzoek, leveranciersinformatie, ontwerpgegevens en recente ervaringen met praktijkinstallaties zijn de uitgangspunten voor het TDH-proces bepaald.

TDH bevindt zich duidelijk in een verder ontwikkelingsstadium dan pasturi-destructie. Daardoor zijn kansen en knelpunten voor praktijktoepassingen al beter in beeld. De onderlinge vergelijking van de op praktijkschaal bewezen TDH en de op labschaal toegepaste pasturi-varianten moet dan ook omzichtig gebeuren. Zo is ondertussen bekend dat de labresultaten van TDH een positiever beeld lieten zien dan wat nu in de praktijk wordt gerealiseerd [24][25][26], met name gerelateerd aan knelpunten van viscositeit (mengbaarheid en verpombaarheid) van vergaand ingedikt surplusslib en aandachtspunten rondom het werkgebied van TDH-installaties in relatie tot variaties in aanvoer van slib.

De TDH is in deze studie beschouwd als een 'neutraal' TDH-proces. Dit geeft een beeld van de mogelijkheden van TDH-voorbehandeling zonder daarbij de keuze voor een specifieke leverancier te maken. Voor het definiëren van de uitgangspunten zijn naast literatuurgegevens ontwerpwaarden voor installaties van twee leveranciers gebruikt vanuit praktijkontwerpen van o.a. de Energiefabrieken Hengelo, Den Bosch, Apeldoorn en Tilburg. De uitgangspunten zijn terug te vinden in de tabel in Appendix A: . De relevante uitgangspunten zijn hieronder toegelicht.

#### 3.7.1 VOORONTWATERING

Voor toepassing van TDH is voorontwatering nodig om de warmtebalans sluitend te maken. Door toevoeging van stoom wordt het slib weer verdund. Ook is door voorbehandeling een hogere ds-belasting van de slibgisting mogelijk door de lagere hydraulische belasting. Na TDH kan een hoger drogestofgehalte in de gisting worden toegepast, omdat het proces de viscositeit substantieel verlaagt. Afhankelijk van de leverancier wordt uitgegaan van een gemiddeld droge-stofgehalte na voorontwatering van 16,5% [27] of een range van 6-14%, met als standaardwaarde 10% [13]. De business case gaat uit van een neutraal TDH-systeem met een operationeel droge-stofgehalte van 12% als combinatie van beide.

#### 3.7.2 ORGANISCHE DROGESTOFAFBRAAK (ODS-AFBRAAK)

TDH heeft voor zover nu aangetoond geen of zeer beperkt effect op primair slib. De ods-afbraak van primair slib met en zonder TDH-voorbehandeling wordt daarom gelijk gehouden.

TDH heeft wel effect op de ods-afbraak van secundair slib. De behaalde afbraakpercentages variëren per leverancier. Volgens praktijkreferenties en voorbeeldberekeningen worden ods-

afbraakpercentages opgegeven van boven 50% voor secundair slib in verschillende aanbiedingen voor de Nederlandse markt waarbij garantiewaarden worden gevraagd met boeteclausules op operationele presentaties [28, 29, 30]. Bij een langere verblijftijd in de slibgisting (24 dagen in plaats van 20 dagen door verdergaande indikking) loopt de haalbare afbraak op tot 54%. Onder geconditioneerde omstandigheden is met een ander systeem op praktijkschaal een ds-afbraak van boven 40% (57% op ods-gehalte) aangetoond bij een ods-gehalte van 70% [13]. Recentere gegevens onder fluctuerende omstandigheden in vol bedrijf laten een ods-afbraak zien van 47 – 58% voor dezelfde installatie. In concurrentiegerichte praktijkontwerpen is tot 53% ods-afbraak aangeboden. In het buitenland (met name in het Verenigd Koninkrijk) worden zowel hogere (58% ods-afbraak) als lagere (38% ods-afbraak) waarden gerapporteerd [24] [31] [32] [33] [34] [35].

Voor de business case is voor de neutrale TDH uitgegaan van 50% ods-afbraak bij 24,5 dagen verblijftijd (verblijftijd gecorrigeerd naar indikgraad van 12%ds). Dit percentage wordt algemeen haalbaar geacht door het TDH-proces. Een ods-afbraak van 50% door TDH komt overeen met een toename van 47,9% ten opzichte van de referentie (33,8%) en valt daarmee in dezelfde orde als de in het onderzoek bestudeerde thermofiele voorbehandeling.

### 3.7.3 EINDONTWATERING

Praktijktoepassingen en referentieontwerpen hanteren een droge-stofgehalte na eindontwatering van vergist slib van 30% voor TDH-voorbehandeld slib ten opzichte van onbehandeld slib met een ds-gehalte van 23-24%. Na ontwatering met een centrifuge wordt een droge-stofgehalte van 30 – 33% behaald bij een PE-dosering van 10-13 g PE/kg ds<sup>5</sup>. Op rwzi Venlo wordt na TDH een droge-stofgehalte van 29% bereikt met een centrifuge.

Voor de business case wordt voor TDH uitgegaan van een haalbaar ds-gehalte van 29% na TDH. Net zoals bij de varianten venturi en TVB wordt een toename van het PE-gebruik van 20% verwacht.

### 3.7.4 TECHNOLOGISCHE INPUT BUSINESS CASE TDH

Onderstaande tabel vat de uitgangspunten voor TDH samen die worden gehanteerd voor de business case.

TABEL 3.9 INPUTGEGEVENS BUSINESS CASE, VARIANT TDH

	Verwacht
Biogasproductie <sup>1)</sup> (mL/g ds gevoed)	562
Relatieve toename afbraak o.ds	+47,9%
ods-afbraak	50%
Verwachte ontwatering	29% ds.
PE-dosering	+20%

1. De biogasproductie is berekend op basis van de genoemde ods-afbraak.

5 Deze PE-dosering lijkt erg laag, gezien de ervaringen in het Polyminder-onderzoek [39]

# 4

## UITGANGSPUNTEN BUSINESS CASE

Op basis van de resultaten van het labonderzoek en de technische haalbaarheidsstudie is een business case opgesteld. Deze is slechts indicatief. Het labonderzoek roept nog te veel vragen op om een definitieve uitspraak te kunnen doen over de financiële haalbaarheid van pasturidestructie. Vooral voor venturidestructie in de recirculatie zijn er nog veel vragen. Een positieve business case verantwoordt het doen van verder labonderzoek.

De business case had tot doel de terugverdientijd te bepalen. Hierin zijn de total costs of ownership (TCO) uitgewerkt, gebaseerd op de realisatie- en investeringskosten en op de operationele kosten. Hierin zijn ook extra opbrengsten door een hogere biogasopbrengst, energiebesparing en verminderde slibafzet meegenomen. Op basis van de jaarlijkse terugverdienkosten in relatie tot de investeringskosten is de terugverdientijd per concept berekend. Ook is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De business case is uitgewerkt voor een fictieve referentie-rwzi van 250.000 i.e. met slibgisting.

Voor de verschillende varianten zijn bouw- en investeringskosten bepaald. De kosten zijn berekend als extra investeringskosten ten opzichte van de referentiesituatie.

Aanvullend op de investeringskosten van de verschillende varianten zijn de operationele kosten op jaarbasis bepaald. Deze operationele kosten zijn opgebouwd uit de volgende kostenposten:

- chemicaliëndosering (PE voor indikking en ontwatering);
- energieverbruik en/of -opbrengst;
- slibeindverwerking;
- onderhoud.

De jaarlijkse kosten zijn berekend als meer- of minderkosten ten opzichte van de huidige referentiesituatie.

Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor de volgende aspecten:

- worst case / best case voor organische-droge-stofafbraak;
- worst case / best case voor ontwaterbaarheid;
- variabele slibeindafzetkosten;
- investeringskosten.

### 4.1 OMSCHRIJVING REFERENTIE EN VARIANTEN

De varianten binnen de business case zijn uitgewerkt voor een fictieve referentie-rwzi van 250.000 i.e. (à 150 g TZV) die representatief is voor de Nederlandse situatie.

De waterlijn bestaat uit een roostergoedinstallatie, voorbezinktanks, actief-slibtanks voor BZV- en stikstofverwijdering en fosfaatelminatie door het bio-P-proces en nabezinktanks.

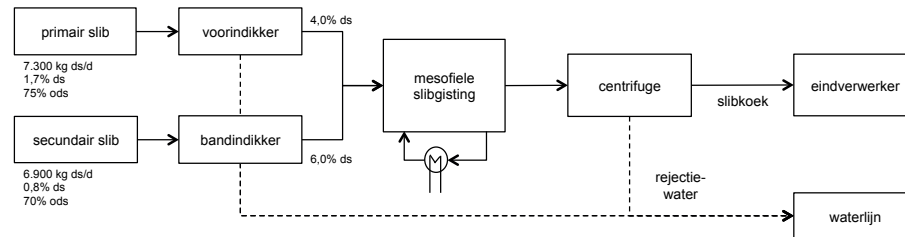
#### 4.1.1 REFERENTIE

Voor de sliblijn wordt uitgegaan van gravitaire indikking van primair slib en mechanische indikking van secundair slib. Na indikking vindt mesofiele gisting plaats, bij een tempera-

tuur van 37°C en een verblijftijd van 20 dagen<sup>6</sup>, gevolgd door ontwatering met centrifuges. Ontwatering met zeefbandpersen is ook mogelijk, maar niet verder uitgewerkt. Slibkoek wordt afgevoerd naar de fictieve eindverwerker en rejectiewater van de ontwatering wordt teruggevoerd naar de rwzi. Er wordt geen slib van andere zuiveringen verwerkt. Een blok-schema van de referentiesituatie is weergegeven in Afbeelding 4.1.

FIGUUR 4.1

## BLOKSCHEMA SLIBVERWERKING REFERENTIE-RWZI



Bij de uitwerking van de business case is gekozen voor een opzet met een slibsamenstelling die representatief is voor de Nederlandse praktijksituatie, zodat de uitkomsten van deze studie vertaald kunnen worden naar andere rwzi's. De slibproductie en -samenstelling zijn weergegeven in Tabel 4.1. De voeding van de slibgistingstank bestaat hiermee voor 50% uit primair slib en voor 50% uit secundair slib.

TABEL 4.1

## SLIBPRODUCTIE EN -SAMENSTELLING

parameter	eenheid	waarde	bron
primair slib			
gemiddelde slibproductie	kg ds/d	7.300	uitgangspunt
droge-stofgehalte	ds%	1,7%	kentallen praktijkinstallaties
organisch stofgehalte	ods%	75%	Referentie ontwerp rwzi Apeldoorn, BC-overleg 27 november 2014
secundair slib			
gemiddelde slibproductie	kg ds/d	6.900	uitgangspunt
droge-stofgehalte	ds%	0,8%	4 g/l in AT, indicgraad NBT = 2
organisch stofgehalte	ods%	70%	Referentie ontwerp rwzi Apeldoorn, BC-overleg 27 november 2014
primair slibindikking			
afscheiding	%	90%	kentallen praktijkinstallaties
ds gehalte na indikken	ds%	4,0%	kentallen praktijkinstallaties en handboek slibgisting
secundair slibindikking			
afscheiding	%	95%	kentallen praktijkinstallaties
ds gehalte na indikken	ds%	6,0%	kentallen praktijkinstallaties en handboek slibgisting
specifiek polymeerverbruik	g PEactief/kg ds	4,0	kental
ds gehalte na indikken voor TDH	%	12%	kentallen TDH-case
specifieke polymeerverbruik indikking TDH	g PEactief/kg ds	6,0	kentallen TDH-case

6 Voor de variant TDH is onder vergelijkbare proces- en installatiecondities de verblijftijd in de gisting 24,5 dagen vanwege verdergaande voorindikking (naar 12%ds in plaats van 6%ds). De gehanteerde ods-afbraak van TDH-voorbehandeld slib van 50% is realistisch voor deze verblijftijd.

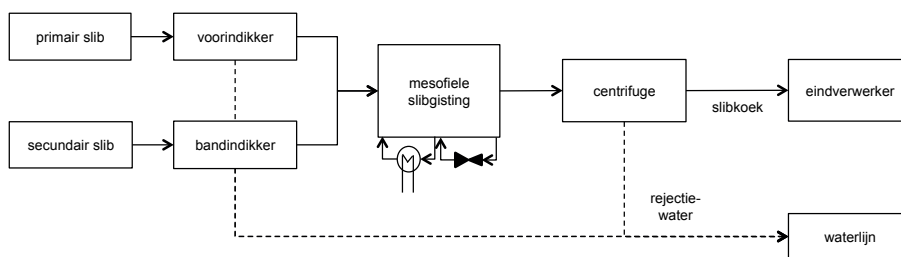
#### 4.1.2 PASTURI-DESTRUCTIE

Zoals toegelicht is besloten de volgende twee varianten van Pasturi-Destructie uit te werken:

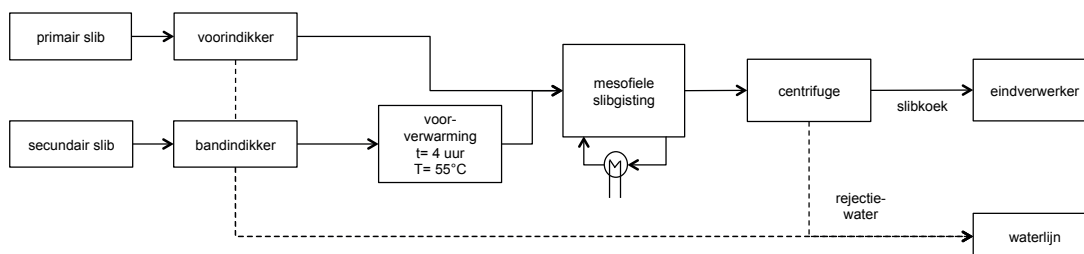
- 1 Variant 'Venturi': recirculatie van de vergisterinhoud (10 maal) over een venturi-installatie in de bestaande recirculatieleiding (Afbeelding 4.2);
- 2 Variant 'Thermofiele voorbehandeling': thermofiele voorbehandeling (TVB) van secundair slib gedurende 4 uur bij 55°C (Afbeelding 4.3).

De oorspronkelijke insteek van de variant 'Venturi' was om een venturi-buis te plaatsen in de bestaande slibrecirculatie van een slibgisting. Het recirculatie-debiet is echter in veel slibgistingen lager dan een factor 10. Recirculeren met een hoger debiet levert risico's op voor de bestaande warmtewisselaar. Ook zijn pompen nodig die voldoende druk kunnen leveren voor het passeren van de venturi en warmtewisselaar. Daarom is besloten om in de kostenraming uit te gaan van een tweede recirculatieloop naast de bestaande. Er is verondersteld dat hiervoor voldoende ruimte beschikbaar is. Wanneer het plaatsen van een venturi in de bestaande recirculatieleiding wel mogelijk is zijn de investeringskosten lager.

FIGUUR 4.2 BLOKSCHEMA SLIBVERWERKING VARIANT 1 (VENTURI)



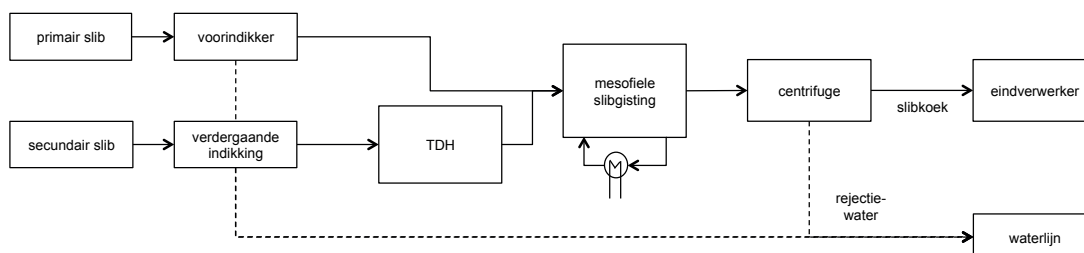
FIGUUR 4.3 BLOKSCHEMA SLIBVERWERKING VARIANT 2 (THERMOFIELE VOORBEHANDELING, TVB)



#### 4.1.3 THERMISCHE DRUKHYDROLYSE

Als derde variant is de toepassing van TDH als voorbehandeling op secundair slib uitgewerkt. De specificaties van de TDH variant zijn in afstemming met het STOWA-onderzoek naar TDH en OpenCel-technologie [36] en verschillende referentieontwerpen van Energiefabrieken met TDH technologie ([37] [30] [29]). Appendix A: geeft een samenvatting van de in afstemming met het OpenCel STOWA-onderzoek vastgestelde kentallen voor TDH. Bij TDH wordt het secundaire slib verder ingedikt dan bij de andere varianten. Daardoor komt extra ruimte vrij in de slibgisting. Deze extra ruimte is in de business case niet opgevuld.

FIGUUR 4.4 BLOKSCHEMA SLIBVERWERKING VARIANT 3 (THERMISCHE DRUKHYDROLYSE, TDH)



## 4.2 ODS-AFBRAAK EN BIOGASPRODUCTIE

De afbraak van organische droge stof(ods) en de daaraan gerelateerde biogasproductie in de referentiesituatie zijn bepaald met het in de praktijk gevalideerde Chen-Hashimoto-gistingsmodel [38]. De volledige in- en output is weergegeven in Appendix B: . De belangrijkste invoerwaarden staan in Tabel 4.2.

TABEL 4.2 INVOERWAARDEN CHEN-HASHIMOTO-GISTINGSMODEL VOOR REFERENTIESITUATIE

Parameter	eenheid	waarde
minimale SLT	dagen	2,85
temperatuurfactor (mesofiel)	-	1,08
verblijftijd in slibgisting	dagen	20
temperatuur in slibgisting	°C	37
maximale afbreekbaarheid PS	%	65
maximale afbreekbaarheid SS	%	40
afbraakconstante PS	-	1
afbraakconstante SS	-	1,5
CZV-gehalte PS	kg CZV/kg ODS	1,8
CZV-gehalte SS	kg CZV/kg ODS	1,42

Uit de invoerwaarden in Tabel 4.2 volgt de ods-afbraak:

- De ods-afbraak voor primair slib bedraagt 57,9% in de referentie;
- De ods-afbraak voor secundair slib bedraagt 33,8% in de referentie.

Op basis van de resultaten van het labonderzoek is de ods-afbraak en biogasproductie in de varianten bepaald als toename van de referentie (Tabel 4.3).

TABEL 4.3 TOENAME ORGANISCHE DROGE-STOFABRAAK (GEMIDDELDE CASE)

	eenheid	referentie	venturi	TVB	TDH
biogasproductie (secundair slib) <sup>1</sup>	ml/g ds gevoed	380	520	530	562
relatieve toename afbraak primair slib <sup>2</sup>	%	-	0,0%	0,0%	0,0%
relatieve toename afbraak secundair slib	%	-	36,8%	39,5%	47,9%
ods-afbraak primair slib	%	57,9%	57,9%	57,9%	57,9%
ods-afbraak secundair slib	%	33,8%	46,3%	47,1%	50,0%
ods-afbraak totaal	%	46,3%	52,3%	52,7%	54,1%
ods-gehalte na uitgest gist slib (uitkomst berekening, geen uitgangspunt)	%	58,6%	55,7%	55,5%	54,8%

1. Waarden venturi en TVB gemeten tijdens laboratoriumonderzoek, waarden TDH op basis van referentie-installaties, zie hoofdstuk 3.

2. Het labonderzoek is uitgevoerd op secundair slib. Primair slib is zonder voorbehandeling al goed vergistbaar. Voor primair slib is daarom de aanname gedaan geen verhoogde afbraak optreedt.

De organisch-droge-stofafbraak is omgerekend in biogasproductie en productie van elektriciteit en warmte op basis van de uitgangspunten in Tabel 4.4.

TABEL 4.4 UITGANGSPUNTEN BIOGASPRODUCTIE EN -INZET

Parameter	eenheid	waarde	referentie
methaanproductie	Nm <sup>3</sup> methaan/kg czv afgebroken	0,35	Wiegant 2012
methaangehalte biogas	%	65	range voor biogas 60-65%
energie-inhoud methaan	MJ/m <sup>3</sup>	36	BINAS
energie-inhoud biogas	MJ/m <sup>3</sup>	23	o.b.v energie-inhoud methaan en methaangehalte
efficiënt gebruik biogas	%	95	ervaringswaarde Witteveen+Bos
E-rendement WKK	%	40	ervaringswaarde Witteveen+Bos, handboek slibgisting (37-42%)
W- rendement WKK	%	40	ervaringswaarde Witteveen+Bos, handboek slibgisting (45%)

### 4.3 ONTWATERING UITGEGIST SLIB

In alle varianten is het uitgediste slib ontwaterd met een centrifuge. In de referentiesituatie is uitgegaan van een ontwatering tot 23% droge stof bij een PE-dosering van 16 g PE per kilogram droge stof zonder dosering van metaalzouten[39].

Voor de business case is er van uitgegaan dat een 20% hogere PE-dosering (19,2 g PE<sub>actief</sub>/kg drogestof) nodig is voor een droge-stofgehalte van 25% na venturi of TVB. Voor TDH geldt op basis van STOWA-onderzoek en praktijkontwerpen dat een ontwateringsprestatie van 29%ds behaald kan worden met een 20% hogere PE-dosering (19,2 PE<sub>actief</sub>/kg ds). Deze uitgangspunten worden toegelicht in hoofdstuk 3. Omdat er niet meer slib wordt verwerkt is het niet nodig om de capaciteit van de slibontwateringsinstallatie aan te passen.

### 4.4 REJECTIEWATERBEHANDELING

Door toepassing van venturi, TVB of TDH wordt meer droge stof afgebroken. Daardoor neemt de stikstofconcentratie (als ammonium) in het rejectiewater toe. Er is uitgegaan van een vrijkomend stikstofgehalte van 5% van de drogestof [40]. Per gram droge stof die wordt afgebroken komt dus 50 mg stikstof vrij. Voor vervolgstudies moet dit uitgangspunt voor de hoeveelheid stikstof die vrijkomt worden bevestigd, omdat in de Nederlandse praktijk hogere gehalten worden gemeten.

In de business case is ervan uitgegaan dat er zowel in de referentie als in de varianten deelstroombehandeling nodig is. Dit leidt tot investerings- en operationele kosten. Deze zijn bepaald op basis van [41] en geïndexeerd. De kosten per variant zijn de meerkosten ten opzichte van de referentie.

Voor verwijdering van extra vrijgekomen fosfaat zijn geen kosten geraamd, omdat dit niet onderscheidend is tussen de varianten.

### 4.5 WARMTE- EN ELEKTRICITEITSVRAAG

De warmtevraag in de varianten is gelijk gesteld aan de warmtevraag in de referentie. In de variant 'venturi' blijft de warmtehuishouding van de slibgistingstanks ongewijzigd.

In de variant 'thermofiele voorbehandeling' wordt het slib op temperatuur gebracht voordat het aan de slibgistingstank gevoed wordt. Voor voorverwarming zal warmte nodig zijn, terwijl de warmtevraag in de recirculatiestroom sterk afneemt. Het exacte effect op de totale warmtevraag is niet in algemene zin te bepalen. Daarom blijft het in deze business case bui-

ten beschouwing. Doordat de biogasproductie in beide varianten toeneemt, kan er vanuit worden gegaan dat er voldoende warmte beschikbaar is. In 0 is de warmtebalans voor winter- en zomercondities nader uitgewerkt.

Voor de TDH wordt rookgaswarmte van de WKK's benut voor stoomproductie en laagwaardige warmte van de WKK's gebruikt voor de warmtewisselaars. Op basis van de opgestelde warmtebalans en referentieontwerpen is geconcludeerd dat voldoende restwarmte beschikbaar is om zonder bijstoken van biogas in de vereiste warmte te voorzien.

In alle varianten neemt de elektriciteitsvraag toe ten opzichte van de referentie, doordat extra processtappen zijn toegevoegd. Hiervoor is de pompenergie (alle varianten), de mengenergie (thermofiele voorbehandeling) en de interne elektriciteitsvraag van de TDH-installatie berekend. Ook voor voorindikking voor TDH is extra elektriciteitsvraag berekend. Tegelijkertijd wordt het extra geproduceerde biogas in een WKK-installatie omgezet in elektriciteit en warmte. De elektriciteitsvraag voor slibontwatering neemt af in de varianten doordat hoger ods-afbraak tot vermindering leidt van de ds-belasting op de ontwateringsinstallatie. Het saldo van de toegenomen vraag en de toegenomen productie is berekend als toe- of afname van de jaarlijkse kosten.

#### 4.6 FINANCIËEL-ECONOMISCHE UITGANGSPUNTEN

In de ramingen per variant zijn kosten berekend als meerkosten ten opzichte van de referentie. Tabel 4.5 presenteert de gehanteerde uitgangspunten en rekenwaarden voor de berekening van de jaarlijkse kosten. De genoemde elektriciteitskosten zijn de kosten voor de inkoop van elektriciteit. Eventuele baten door subsidies (zoals SDE+ en biotickets) zijn niet meegenomen in de business case.

TABEL 4.5 GEHANTEERDE UITGANGSPUNTEN JAARLIJKSE KOSTEN (INCLUSIEF BTW) VOOR BUSINESS CASE

Parameter	eenheid	waarde
opslagfactor montage	%	20%
electriciteitskosten	EUR/kWh	0,10
aardgasprijs	EUR/m <sup>3</sup>	0,5
polymeerkosten	EUR/kg actief PE	4,72
kosten slibeindverwerking (variabel + vast)	EUR/ton ontw. slib	80
onderhoudskosten W	% van bouwkosten	5,0%
onderhoudskosten E	% van bouwkosten	2,5%
onderhoudskosten C	% van bouwkosten	0,5%
onderhoudskosten WKK	EUR/draaiuur	2,48
personeel	EUR/fte	60.000
reële rente (rente -inflatie)	%	2,75%
afschrijving C	jaar	40
annuïteit C		0,0563
afschrijving W	jaar	15
annuïteit W		0,0947
afschrijving E	jaar	15
annuïteit E		0,0947
staartkostenfactor	-	1,62



De opbouw van de staartkosten is als volgt:

• Algemene kosten	5%
• Financieringskosten en prijsstijgingen	3%
• Inrichtingskosten	2%
• Leges en heffingen	2%
• CAR-verzekering	1%
• Bouwrente	3%
• Voorbereiding en plankosten	15%
• Onvoorzien	10%
• Omzetbelasting	21%
• Totaal	62%

#### 4.7 AANPAK GEVOELIGHEIDSANALYSE

Er is binnen de business case een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de volgende aspecten:

- 1 Toename ods-afbraak en biogasopbrengst: best case en worst case;
- 2 Eindontwatering: best case en worst case voor ds-gehalte en PE-dosering;
- 3 Kosten slibeindverwerking;
- 4 Investeringskosten.

Ad 1.) Voor de organische-droge-stofafbraak heeft WES op basis van het labonderzoek een best case (Tabel 4.6) en een worst case (Tabel 4.7) aangegeven. De terugverdientijd is voor beide cases voor venturi en TVB bepaald. De overige uitgangspunten blijven hierbij gelijk.

TABEL 4.6 TOENAME ODS-AFBRAAK EN BIOGASOPBRENGST, BEST CASE

parameter	eenheid	referentie	venturi	TVB
biogasproductie (secundair slib)	ml/g ds gevoed	380	560	550
relatieve toename afbraak primair slib	%	-	0,0%	0,0%
relatieve toename afbraak secundair slib	%	-	47,4%	44,7%
ods-afbraak primair slib	%	57,9%	57,9%	57,9%
ods-afbraak secundair slib	%	33,8%	49,8%	48,9%
ods-afbraak totaal	%	46,3%	54,0%	53,6%

TABEL 4.7 TOENAME ODS-AFBRAAK EN BIOGASOPBRENGST, WORST CASE

parameter	eenheid	referentie	venturi	TVB
biogasproductie (secundair slib)	ml/g ds gevoed	380	500	460
relatieve toename afbraak primair slib	%	-	0,0%	0,0%
relatieve toename afbraak secundair slib	%	-	31,6%	21,1%
ods-afbraak primair slib	%	57,9%	57,9%	57,9%
ods-afbraak secundair slib	%	33,8%	43,6%	44,5%
ods-afbraak totaal	%	46,3%	51,0%	51,4%

Ad 2.) Over het effect van de toepassingen van venturi en TVB op de ontwaterbaarheid bestaat nog volop onduidelijkheid. In de standaard situatie is voor de varianten venturi en TVB uitgegaan van een verbeterd ontwateringsresultaat (25%ds) bij een 20% hogere PE-dosering. In de worst case is uitgegaan van een gelijkblijvende ontwatering bij venturi en TVB tot 23%ds bij een 20% hogere PE-dosering. In de best case is uitgegaan van een betere ontwaterbaarheid (26% ds in plaats van 23% ds) bij een hogere PE-dosering.

Ad 3. ) Er zijn grote verschillen in de kosten voor eindafzet van ontwaterd slib in Nederland, deels afhankelijk van eindverwerker, aandeelhouder en afgesloten contractperiode. Om dit inzichtelijk te maken is een grafiek (Afbeelding 5.3) opgesteld waarin de terugverdientijd per techniek is uitgezet tegen de kosten voor eindafzet, lopend van 30 EUR/ton tot 200 EUR/ton.

Ad 4.) Voor de varianten venturi en TVB bestaat onzekerheid over de bouwkosten, omdat dergelijke installaties nog niet op volledige schaalgrootte zijn gebouwd. Daarom wordt de gevoeligheid getoetst van een relatieve toename van de investeringskosten.

# 5

## RESULTATEN BUSINESS CASE

### 5.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk beschrijft de uitkomsten van de business case gebaseerd op de uitkomsten van het labonderzoek en de in hoofdstuk 4 beschreven uitgangspunten.

### 5.2 DROGESTOFBALANS

Voor de referentie en beide varianten is een drogestofbalans over de slibgisting opgezet. De volledige balans is opgenomen in Appendix D: . De belangrijkste waarden zijn samengevat in Tabel 5.1. De verhoogde slibafbraak leidt tot een verlaging van de slibafzet van 14% in de varianten venturi en thermofiele voorbehandeling en van 27% in de variant TDH. De grotere reductie bij TDH wordt vooral veroorzaakt door de betere ontwaterbaarheid van het uitgeste slib.[42]

TABEL 5.1 DROGESTOFBALANS BUSINESS CASE

Parameter	eenheid	Referentie	Venturi	TVB	TDH
slibvracht naar gisting					
primaair slib	kg ds/d	6.570	6.570	6.570	6.570
secundair slib	kg ds/d	6.555	6.555	6.555	6.555
totaal	kg ds/d	13.125	13.125	13.125	13.125
slib naar ontwatering					
vracht	kg ds/d	8.720	8.149	8.108	7.978
debiet	m <sup>3</sup> /d	274	274	274	225
ds-gehalte	% ds	3,2%	3,0%	3,0%	3,5%
ontwaterd slib					
ds-gehalte	% ds	23,0%	25,0%	25,0%	29,0%
hoeveelheid	m <sup>3</sup> /d	37	32	32	27
besparing t.o.v. huidige situatie					
slibafvoer rwzi	m <sup>3</sup> /d	37,2	31,9	31,8	27,0
reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /d	0,0	5,2	5,4	10,2
reductie slibafzet	ton ontwaterd slib/jr	-	14%	14%	27%

### 5.3 ENERGIEPRODUCTIE EN -GEBRUIK

Door de toename van droge-stofafbraak neemt de biogasproductie toe in de varianten. Tegelijkertijd verandert het elektriciteitsverbruik. In Tabel 5.2 is de productie en het verbruik van energie weergegeven.

Voor alle varianten is een warmtebalans uitgewerkt in Appendix C:. Deze laat zien dat er voldoende warmte beschikbaar is om de gisting te verwarmen en stoom te produceren voor de TDH.

In de varianten venturi en thermofiele voorbehandeling neemt de biogasproductie toe met 10%. Deze toename is lager dan gemeten in het labonderzoek, omdat tijdens het labonderzoek ook primair slib aanwezig was. De specifieke biogasproductie (liter biogas per kilogram ods afgebroken) uit surplusslib is lager dan uit primair slib. Dit geeft dus een lager biogasproductie bij dezelfde organische droge-stofafbraak. Voor de business case is geen toename in de afbraak van primair slib aangenomen.

In de variant TDH is de toename 12,5%. Door de hogere biogasproductie neemt ook de elektriciteitsproductie toe. In alle varianten is minder elektriciteit nodig voor eindontwatering, door de verdergaande afbraak. In de varianten venturi en TDH neemt de totale elektriciteitsbehoefte toe door extra pomp- en mengenergie. Voor de indikking van de TDH-installatie is ook extra energieverbruik berekend. Per saldo is in die varianten de elektriciteitsbehoefte groter.

TABEL 5.2 ENERGIEPRODUCTIE EN -GEBRUIK

Parameter	eenheid	referentie	venturi	TVB	TDH
biogasproductie	m <sup>3</sup> /jr	1.460.000	1.606.000	1.606.000	1.642.500
energie-inhoud biogas	MJ/jr	34.051.800	37.457.000	37.457.000	38.308.300
warmteproductie biogas	MJ/jr	12.939.684	14.233.660	14.233.660	14.557.154
elektriciteitsproductie biogas	MWh/jr	3.594	3.954	3.954	4.044
elektriciteitsproductie biogas t.o.v. referentie	MWh/jr	0	359	359	449
warmtebehoefte t.o.v. referentie	MJ/jr	0	0	0	0
elektriciteitsbehoefte pompen en mengen	MWh/jr	0	82	3	109
elektriciteitsverbruik voorindikking	MWh/jr	108	108	108	156
elektriciteitsverbruik eindontwatering	MWh/jr	223	198	196	190
elektriciteitsbehoefte t.o.v. referentie totaal	MWh/jr	0	57	-24	124

#### 5.4 BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN

Voor alle varianten zijn de extra onderdelen gedimensioneerd in Tabel 5.3. Hierin zijn alle investeringskosten opgenomen die gemaakt worden om de variant toe te passen op een bestaande rwzi. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om de installatie zelf en het aanpassen van leidingwerk, maar ook om civiele aspecten en het aanpassen van de elektrotechnische installatie.

Voor de variant TVB is uitgegaan van één tank met een spiraalwarmtewisselaar. Er zou ook gekozen kunnen worden voor batchgewijze opwarming in twee tanks met een interne warmtewisselaar. Op de kosten heeft dit geen effect.

In alle varianten neemt de biogasproductie in die mate toe dat extra WKK-capaciteit nodig is. Er zijn daarom kosten geraamd voor een kleine tweede WKK in beide varianten. In de biogasopslag zit op de meeste rwzi's meer speling. Daarom zijn geen kosten geraamd voor een extra gashouder.

TABEL 5.3 DIMENSIONERING PER VARIANT

onderdeel	eenheid	waarde
Venturi		
tweede recirculatielijn (per SGT)		
- leidingwerk (DN150)	m	30
- afsluiters	stuks	6
- terugslagkleppen	stuks	2
- pompen (1 plus 1 reserve)	m <sup>3</sup> /h	57
- venturi	stuks	1
extra WKK-capaciteit	Nm <sup>3</sup> /h	20
Thermofiele voorbehandeling		
voorverwarming		
- RVS tank	m <sup>3</sup>	20
- menger	stuks	1
- warmtewisselaar	stuks	1
- leidingwerk (DN150)	m	20
- afsluiters	stuks	6
- terugslagkleppen	stuks	2
- pompen (1 plus 1 reserve)	m <sup>3</sup> /h	11
extra WKK-capaciteit	Nm <sup>3</sup> /h	15
Thermische drukhydrolyse		
leidingwerk (DN50)	m	20
TDH-installatie compleet	stuks	1
aanvoer capaciteit	m <sup>3</sup> /h	2,3
stoomproductie	Nm <sup>3</sup> /h	0,3
extra WKK-capaciteit	Nm <sup>3</sup> /h	30

Op basis van de dimensioneringen zijn de bouw- en investeringskosten bepaald, zie Tabel 5.4. De onderbouwing van de kostenraming staat in Appendix E:.

TABEL 5.4 EXTRA BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN PER VARIANT

parameters	eenheid	referentie	venturi	TVB	TDH
<b>Bouwkosten</b>					
venturi-installatie	EUR	-	20.000	-	-
recirculatiepomp	EUR	-	16.000	-	-
aanpassingen leidingwerk	EUR	-	33.000	13.700	-
uitbreiding WKK-capaciteit	EUR	-	116.000	116.000	125.000
warmtewisselaar	EUR	-	-	72.000	-
extra vat voor opwarming (incl. menger)	EUR	-	-	30.300	-
pompstappen voor voorverwarming	EUR	-	-	8.000	-
kosten nieuwe voorindikking naar 12 %ds (levering en montage)	EUR	-	-	-	203.200
levering en montage TDH-installatie (incl. stoom en warmtewisselaars)	EUR	-	-	-	787.000
investering deelstroombehandeling t.o.v. referentie	EUR	-	109.400	109.400	164.200
montage	EUR	-	13.800	24.800	-
civiele aspecten	EUR	-	25.000	25.000	-
elektrotechnische aspecten	EUR	-	50.000	50.000	-
<b>totaal bouwkosten</b>	<b>EUR</b>	<b>-</b>	<b>383.200</b>	<b>449.200</b>	<b>1.279.400</b>
investeringsfactor	-	-	1,62	1,62	1,62
<b>investeringskosten</b>	<b>EUR</b>	<b>-</b>	<b>620.800</b>	<b>727.700</b>	<b>2.072.600</b>

## 5.5 JAARLIJKSE KOSTEN EN TERUGVERDIENTTIJD

De jaarlijkse kosten bestaan uit kapitaallasten en operationele lasten. Uit de investeringskosten, de reële rente en afschrijving over de levensduur volgen de kapitaallasten per onderdeel.

Het elektriciteitsverbruik is bepaald ten opzichte van de referentie. Dit is het saldo van extra productie en extra verbruik, zoals ook te zien in Tabel 5.2. Een negatief elektriciteitsverbruik ten opzichte van de referentie betekent dat het verbruik lager is dan in de referentiesituatie. De extra productie is dus hoger dan het extra verbruik. Hierdoor ontstaan baten op de energiekosten.

De afzetkosten van uitgegist slib zijn bepaald ten opzichte van de referentie. In de varianten wordt minder slib afgezet dan in de referentie, door verdergaande afbraak. Daarom zijn de extra kosten negatief (te lezen als baten voor slibafzet).

De kosten voor polymeer zijn in de varianten hoger dan in de referentie. De voorontwatering blijft gelijk in de varianten venturi en TVB en neemt toe in de TDH-variant. In de eindontwatering stijgen de kosten voor alle varianten, doordat de ontwaterbaarheid van behandeld slib afneemt. Voor alle varianten zijn personeelskosten meegenomen voor bediening van de nieuwe installatieonderdelen.

TABEL 5.5 JAARLIJKSE KOSTEN

parameter	eenheid	referentie	venturi	TBV	TDH
<b>Kapitaallasten</b>					
kapitaallasten venturi-installatie	EUR/jaar	-	1.600	-	-
kapitaallasten recirculatiepomp	EUR/jaar	-	1.300	-	-
kapitaallasten aanpassingen leidingwerk	EUR/jaar	-	2.700	1.100	-
kapitaallasten uitbreiding WKK-capaciteit	EUR/jaar	-	9.500	9.500	10.300
kapitaallasten warmtewisselaar	EUR/jaar	-	-	5.900	-
kapitaallasten extra vat voor opwarming	EUR/jaar	-	-	2.500	-
kapitaallasten extra pompstap	EUR/jaar	-	-	700	-
kapitaallasten extra indikking voor TDH	EUR/jaar	-	-	-	16.700
kapitaallasten TDH	EUR/jaar	-	-	-	64.700
kapitaallasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	8.200	8.200	12.300
kapitaallasten civiele aspecten	EUR/jaar	-	1.000	1.000	-
kapitaallasten elektrotechnische aspecten	EUR/jaar	-	4.100	4.100	-
<b>Operationele lasten</b>					
operationele lasten deelstroombehandeling	EUR/jaar	-	4.100	4.100	6.100
extra kosten elektriciteitsverbruik t.o.v. referentie	EUR/jaar	-	-30.200	-38.400	-32.500
kosten afzet uitgegist slib t.o.v. referentie	EUR/jaar	-	-152.200	-156.900	-297.800
kosten polymeer t.o.v. referentie	EUR/jaar	-	29.200	27.800	47.300
kosten personeel t.o.v. referentie	EUR/jaar	-	12.000	12.000	30.000
onderhoudskosten nieuwe installatieonderdelen (excl. WKK)	EUR/jaar	-	10.300	13.000	57.700
onderhoudskosten WKK	EUR/jaar	-	11.800	11.800	11.800
<b>totaal jaarlijkse kosten</b>	<b>EUR/jaar</b>	<b>-</b>	<b>-86.600</b>	<b>-93.600</b>	<b>-73.400</b>
<b>totaal jaarlijkse kosten (excl. kapitaallasten)</b>	<b>EUR/jaar</b>	<b>-</b>	<b>-115.000</b>	<b>-126.600</b>	<b>-177.400</b>

Met het inzicht in de jaarlijkse kosten kan de terugverdientijd worden bepaald (Tabel 5.6). Dit is de periode waarin de investeringskosten kunnen worden terugverdiend door de besparing die gerealiseerd wordt in de variant. De terugverdientijd voor de varianten venturi en TVB bedraagt vijf tot zes jaar. De terugverdientijd van de variant TDH ligt tweemaal zo hoog, rond 12 jaar. Deze terugverdientijden komen goed overeen met terugverdientijden van Energiefabriek-projecten in Nederland, waarbij de ontwaterbaarheid van de uitgeste slibstromen en de kosten voor slibeindverwerking zeer doorslaggevend zijn.

TABEL 5.6 TERUGVERDIENTIJDEN

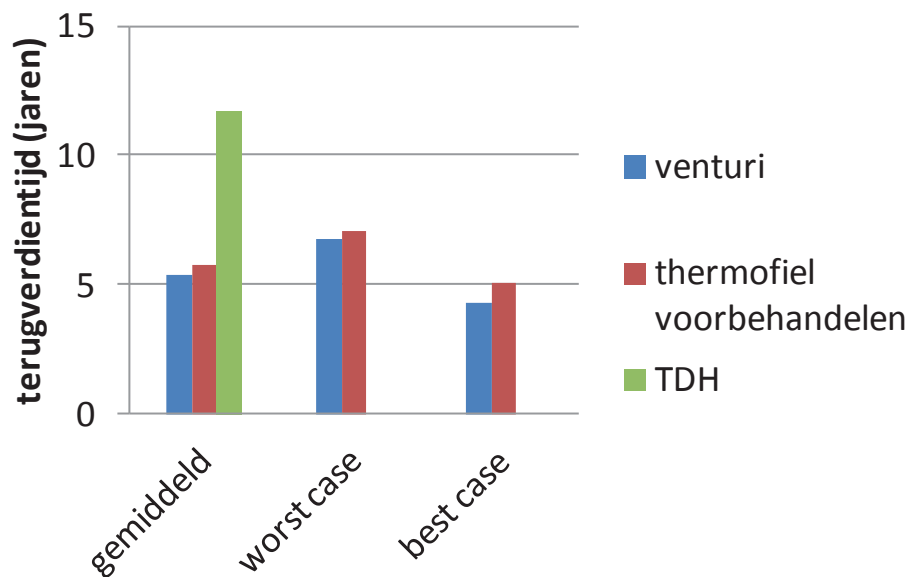
parameter	eenheid	referentie	venturi	TVB	TDH
Besparing t.o.v. referentie	EUR/jaar	-	115.000	126.600	177.400
Investeringskosten	EUR	-	620.800	727.700	2.072.600
Relatieve terugverdientijd	jaar	-	5,4	5,7	11,7

## 5.6 GEVOELIGHEIDSANALYSE

### 5.6.1 ODS-AFBRAAK

De gevoeligheidsanalyse voor ods-afbraak is weergegeven in Afbeelding 5.1. Hieruit blijkt dat voor de varianten venturi en thermofiel voorbehandelen in de worst case en best case de terugverdientijd nagenoeg gelijk is aan de gemiddelde situatie.

FIGUUR 5.1 GEVOELIGHEIDSANALYSE ODS-AFBRAAK

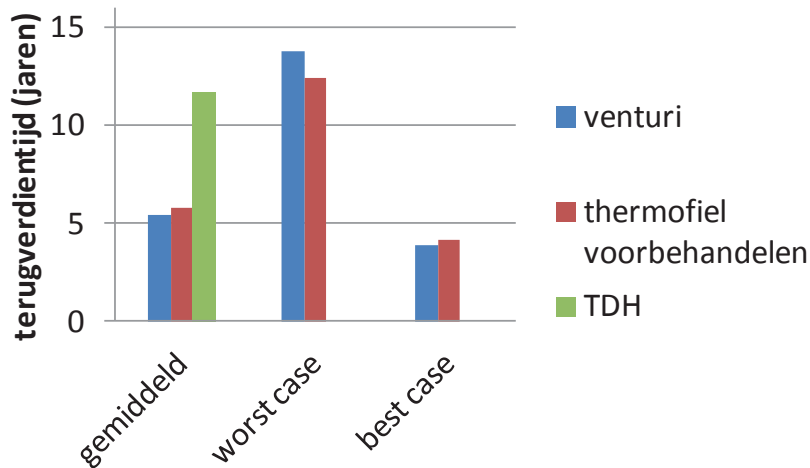


### 5.6.2 ONTWATERBAARHEID UITGEGIST SLIB

De gevoeligheidsanalyse voor ontwaterbaarheid van de uitgeste slibstromen is weergegeven in Afbeelding 5.2. Uit de grote verschillen per worst of best case blijkt de grote invloed van de ontwaterbaarheid op de business case. In de variant venturi is de terugverdientijd in de best case minder dan vier jaar.

FIGUUR 5.2

GEVOELIGHEIDSANALYSE SLIBONTWATERING



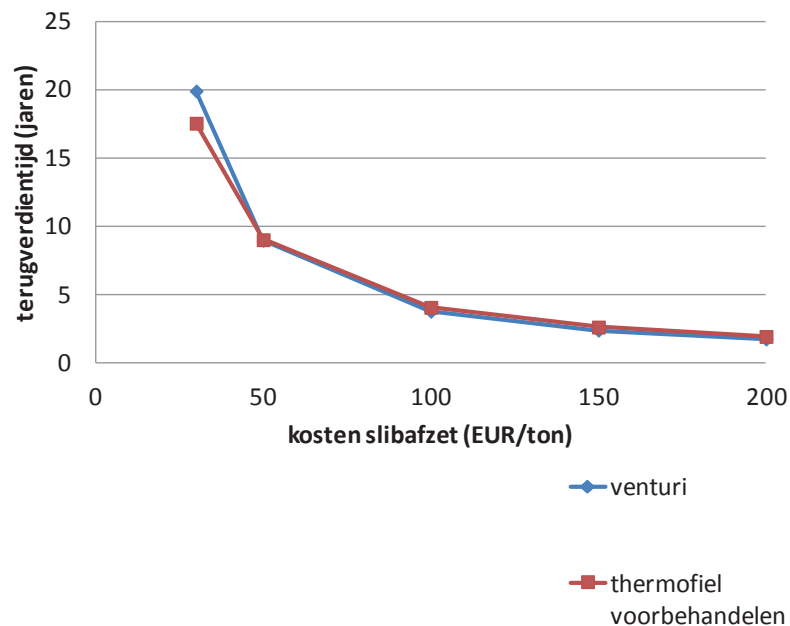
### 5.6.3 SLIBEINDVERWERKINGSKOSTEN

De gevoeligheidsanalyse voor de slibeindverwerkingskosten is weergegeven in Afbeelding 5.3. Deze kosten zijn afhankelijk van de contractvorm. De getoonde grafiek dient ter indicatie en is niet bedoeld als basis voor een investeringsbeslissing.

Uit de grafiek blijkt dat de varianten venturi en thermofiel voorbehandelen nagenoeg hetzelfde patroon laten zien. Bij de varianten venturi en TVB is de terugverdientijd korter dan 10 jaar als de slibafzetkosten 50 euro per ton slibkoek bedragen of meer. Bij slibafzetkosten van 200 euro per ton slibkoek ligt de terugverdientijd voor venturi en TVB op een kleine twee jaar. Bij afnemende tarieven neemt de terugverdientijd snel toe.

AFBEELDING 5.3

GEVOELIGHEIDSANALYSE KOSTEN SLIBAFZET

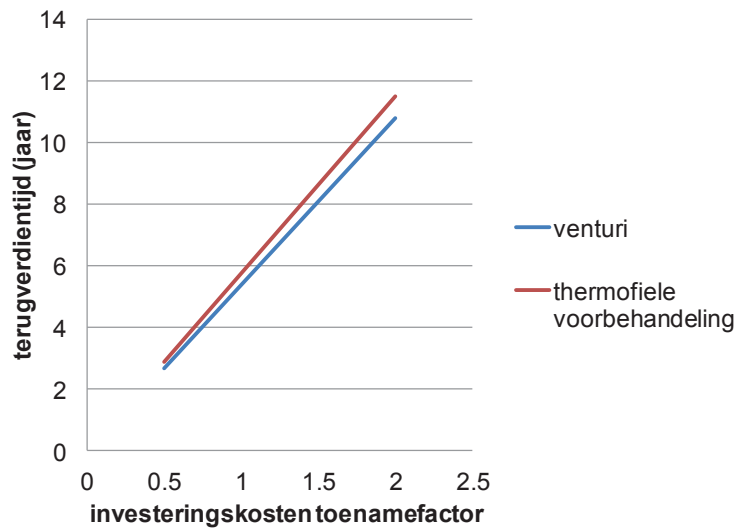




#### 5.6.4 INVESTERINGSKOSTEN

Het effect van een toename of afname van de investeringskosten met een factor 0,5 tot 2,0 is weergegeven in Afbeelding 5.4. Hieruit blijkt dat de varianten venturi en thermofiel onderling nauwelijks variëren.

AFBEELDING 5.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE INVESTERINGSKOSTEN



# 6

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De haalbaarheidsstudie op labschaal en daaruit volgende business case geven inzicht in de technische en financieel-economische haalbaarheid van pasturi-destructie. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies getrokken op basis van de inzichten uit beide onderdelen van het STOWA-onderzoek. Vervolgens wordt een blik op de mogelijke toekomst gegeven.

### 6.1 TECHNISCHE HAALBAARHEID

Op basis van literatuurgegevens en een theoretische evaluatie van de technische haalbaarheid van pasturi-destructie is het aantal onderzoeksvariabelen voor de individuele processtappen afgebakend. Het labonderzoek heeft nuttige inzichten opgeleverd, maar heeft ook beperkingen laten zien. Zo zijn er tijdens enkele meetreeksen verstoringen opgetreden, waardoor niet alle gegevens bruikbaar zijn. Ook bleken de biogasproductie en droge-stofafbraak niet direct aan elkaar gecorreleerd te kunnen worden. Na analyse van de onderzoeksdata is vervolgens geconcludeerd dat alleen een select aandeel van de laboratoriumtesten (zie verdere detaillering in hoofdstuk 8 - 12) geschikt was voor interpretatie voor het STOWA-onderzoek. Uit de resultaten van het laboratoriumonderzoek naar de afzonderlijke en gecombineerde processtappen (hoofdstuk 3 t/m 6) blijkt dat bijvoorbeeld dat de combinatie van een thermofiele voorbehandeling gevolgd door een mechanische desintegratie door venturi-cavitatie elkaar tegenwerkt. Een belangrijke oorzaak daarvan is dat de slibstroom in de laboratoriumopstelling van de venturistap belucht wordt, waardoor organisch materiaal geoxideerd wordt en de uiteindelijke biogasopbrengst negatief beïnvloed wordt. Deze onderzoekslijn is vervolgens als technisch onhaalbaar bestempeld.

Uit het technische onderzoek zijn wel twee interessante behandelingsvarianten naar voren gekomen die een significante biogastoename vertonen: thermofiele voorbehandeling en venturi-circulatie.

#### 6.1.1 THERMOFIELE VOORBEHANDELING IS TECHNISCH HAALBAAR

Een thermofiele voorbehandelingsstap onder anaerobe omstandigheden op 55°C met een slibverblijftijd van vier uur, aangeduid als Thermofiele Voorbehandeling (TVB). De TVB-voorbehandelingsvariant levert ten opzichte van het referentieslib een toename in ods-afbraak en biogasproductie van 30 – 40% na 20 dagen mesofiele gisting.

#### 6.1.2 VENTURI-CIRCULATIE VARIANT IS THEORETISCH HAALBAAR

Een venturi-nabehandeling, waarbij gistingsslib na 20 dagen verblijftijd mechanisch behandeld wordt met een venturi-cavitatiestap en vervolgens door terugvoer in de recirculatie nogmaals vergist wordt, aangeduid als Venturi-recirculatie. Door deze voorbehandelingsvariant werd ten opzichte van de referentie-biogasopbrengst (onder normale mesofiele gistingcondities bij 20 dagen verblijftijd) nog eens 30% extra ods-afbraak en biogasproductie aangetoond

in tweede gistingstap gedurende 20 dagen verblijftijd in een mesofiele gisting, terwijl het onbehandelde gistingsslib in die periode nauwelijks biogas produceerde.

Voor deze variant dient opgemerkt te worden dat technische haalbaarheid uitgaat van 10 keer recirculeren over de venturi met een additionele verblijftijd van 20 dagen in de gisting (daarmee wordt 40 dagen verblijftijd bereikt) terwijl deze variant voor de business case uitgewerkt is als een venturi-circulatie met een recirculatievoud van 10 over de gisting met een theoretisch bepaalde toename van afbraak en biogasproductie van 30 – 40%.

Mogelijke afsterving van methanogenen a.g.v. van de recirculatie over de venturi-destructieinstallatie is hierbij niet meegenomen.

## 6.2 BUSINESS CASE

Met de resultaten van literatuuronderzoek en de technische haalbaarheidsstudie is een business case opgesteld voor de varianten Venturi-circulatie en Thermofiele Voorbehandeling in onderling vergelijk met een referentiesituatie en een algemeen toepasbare TDH-variant. Op basis van de business case zijn de volgende conclusies te trekken:

### 6.2.1 VERGELIJKBARE TERUGVERDIENTTIJD VENTURI-CIRCULATIE EN TVB

De terugverdientijd van de varianten Venturi-circulatie en TVB is met vijf à zes jaar ongeveer gelijk, waarbij opgemerkt moet worden dat de Venturi-circulatie met de uitkomsten van het technische onderzoek met zeer lange verblijftijden in de gisting is doorgerekend. Hierdoor ontstaat voor de variant Venturi-circulatie een te positieve business case.

De terugverdientijd van de onderzochte varianten is duidelijk korter dan de terugverdientijd voor TDH, die op basis van de gehanteerde uitgangspunten ongeveer 11 jaar bedraagt.

Bij nagenoeg vergelijkbare afbraakprestaties van slib wordt het verschil in terugverdientijd hoofdzakelijk bepaald door de verschillen in realisatiekosten. Voor Venturi-circulatie en TVB zijn de investeringen vanwege de simpele uitvoering substantieel lager zijn dan voor het complexere TDH-proces. Tevens resulteert het extra polymeerverbruik voor voorontwatering voor een TDH-proces in hogere kosten. De verbeterde slibontwatering en daarmee lagere slibafzetkosten bij TDH kunnen hiervoor niet compenseren.

### 6.2.2 INVLOED VAN ODS-AFBRAAK IS BEPERKT

De terugverdientijd van de varianten Venturi-circulatie en TVB is slechts in beperkte mate gevoelig voor variaties in ods-afbraak. Van belang daarbij is echter dat de spreiding tijdens het labonderzoek duidelijk kleiner was dan in de praktijk voorkomt. De onnauwkeurigheidsmarge van de uitkomsten dient dan ook als hoog beschouwd te worden.

### 6.2.3 ONTWATERBAARHEID UITGEGIST SLIB VAN ESSENTIEEL BELANG

De ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib is vanwege de relatief hoge operationele kosten van essentieel belang voor de bepaling van de business case. Het effect van ontwaterbaarheid is vooral zichtbaar voor de varianten Venturi-circulatie en TVB in de worst case. Dit betekent dat zekerheid over de ontwaterbaarheid essentieel is om een goede keuze te maken voor een van deze technieken. Hiervoor is meer onderzoek nodig; dat geldt niet alleen voor de Venturi-circulatie en de TVB, maar ook naar het effect van TDH en/of thermofiele slibgisting op de ontwaterbaarheid. Gezien de sterke relatie met de kosten voor slibeindafzet is dit cruciaal.

#### 6.2.4 **STERKE INVLOED KOSTEN SLIBEINDVERWERKING**

Samen met de ontwateringsgraad van het uitgegiste slib zijn de slibafzetkosten naar de eindverwerking essentieel en doorslaggevend in de vaststelling van de business case. Bij hogere kosten voor slibafzet is de terugverdientijd zoals te verwachten korter. Hoe beter de ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib, deze te beter scoort een variant op de terugverdientijd. Het verschil tussen de technieken Venturi-circulatie en TVB is verwaarloosbaar.

#### 6.2.5 **ENERGIEVOORDEEL GERELATEERD AAN BESPARING ELEKTRICITEITSVERBRUIK**

Voor de gevoeligheidsanalyse voor energie is het elektriciteitsverbruik voor de slibeindontwatering en het verbruik van de variant zelf doorslaggevend. De energieproductie vanuit biogas is van minder belang op de financiële haalbaarheid. Des te meer afbraak plaatsvindt en dus hoe minder slib (als droge stof) naar de ontwatering gaat, des te beter scoort de variant op energiekosten. Thermofiele voorbehandeling heeft een extra voordeel, doordat slechts beperkt extra elektriciteit nodig is voor pompen en mengen.

Biogasproductie is in de business case belangrijk maar niet van doorslaggevend belang om de varianten in de business case te rangschikken of haalbaar te maken.

#### 6.2.6 **GROOT AANDEEL INVESTERINGSKOSTEN WKK**

Voor alle varianten geldt dat de post WKK relatief groot is in de verdeling van de investeringskosten.

#### 6.2.7 **STERKE LOCATIEAFHANKELIJKHEID**

De benodigde aanpassingen zijn sterk afhankelijk van de locatie en schaalgrootte van de rwzi en slibverwerking. Wanneer een rwzi bijvoorbeeld voldoende WKK-capaciteit heeft of het biogas op een andere manier in kan zetten, is de terugverdientijd korter. In algemenere zin moet er voldoende ruimte zijn om een tweede recirculatieleiding aan te leggen of een voorbehandelingstank te plaatsen.

### 6.3 **DOORKIJK NAAR DE TOEKOMST**

De technische haalbaarheidstudie en de business case hebben aangetoond dat de eenvoudige alternatieve voorbehandelingsmethoden voor met name het TVB-concept technisch haalbaar zijn en financieel aantrekkelijker kunnen zijn dan complexere technieken zoals bijvoorbeeld thermische drukhydrolyse. Zowel Thermofiele Voorbehandeling als Venturi-circulatie is daarom een interessante methode om verder te onderzoeken, waarbij de TVB-variant naar praktijkschaal uitgewerkt moet en de Venturi-circulatie op enkele essentiële elementen nader fundamenteel (slibverblijftijdcorrectie, afdoding) onderzocht moeten worden. Hierbij zijn met name de volgende aspecten van belang:

- De resultaten van het technische haalbaarheidsonderzoek moeten voor de venturi-circulatie worden bevestigd met aanvullend onderzoek op labschaal. Het tot nu toe uitgevoerde labonderzoek bevat (te) veel onzekerheden om de variant door te ontwikkelen op grotere schaal. Tijdens extra labonderzoek moet een relatie tussen biogasproductie en organische drogestofafbraak definitief vast worden gelegd en moeten anaerobe omstandigheden beter gewaarborgd worden.
- Wanneer de venturi-variant overwogen wordt, moet het effect van venturi-recirculatie worden vastgesteld zonder dat de verblijftijd in de slibgisting toeneemt.
- Het effect op eventuele afdoding of inactivatie van venturi-destructie in de recirculatielijn moet onderzocht worden.

- Opschaling van de TVB-variant naar demonstratieschaal is nader uit te werken. Hiervoor wordt een geschikte locatie gezocht waarbij vergelijkend onderzoek mogelijk is en de eigenaar voordeel in verhoogde afbraak en biogasproductie kan benutten. De onderzoeksfinanciering kan zo deels via de eigenaar van de gisting worden terugverdiend.
- Het effect op ontwaterbaarheid van het voorbehandelde en uitgegiste slib moet worden vastgesteld en gerelateerd aan onbehandeld uitgegist slib. Dit geldt in principe voor alle vergaande gistingmethoden, zowel voor venturi, thermofiele voorbehandeling, thermofiele gisting én TDH.

## 7

## LITERATUUR

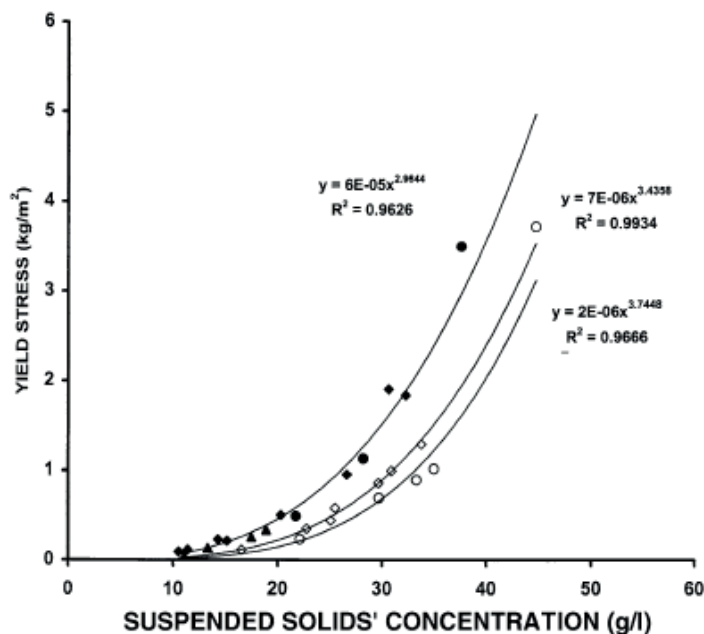
## 7.1 RHEOLOGIE

Belangrijke parameters van primair en secundair slib zijn stromingseigenschappen of rheologie. Complexe stoffen zoals slib laten in de praktijk niet-Newtoniaanse stromingseigenschappen zien. Dit houdt in dat de viscositeit van slib niet lineair toeneemt met de kracht die erop wordt uitgeoefend. Deze eigenschap interfereert met verschillende aspecten van het waterzuiveringsproces, zoals het verpompen van slib, het mixen van stromen, bezinking en ontwatering. [43], [44], [45]

Zoals met andere parameters als vlok grootte, slib compositie en hoeveelheid gebonden water, is slib rheologie uniek voor verschillende slibben en rwzi's. [43],[44] Bij zwevende stof gehalten boven de 1% verandert de viscositeit van slib exponentieel met de schuifspanning. [43], [44], [46] Dit wordt weergegeven in Figuur 7.1 - Relatie zwevende stof - schuifspanning slib.

Slib-voorbehandeling heeft net als slib-gisting invloed op slibkarakteristieken zoals rheologie. Rheologie eigenschappen zijn van groot belang in mechanische slibontwatering [44], en speelt daarnaast een belangrijke rol bij het ontwerpen van de experimentele opstelling. In dit onderzoek is daarom ook gekeken naar de veranderingen in het stromingsgedrag van het slib bij verschillende temperaturen.

FIGUUR 7.1 RELATIE ZWEVENDE STOF - SCHUIFSPANNING SLIB [43]



## 7.2 ANAEROBE GISTING

De productie van biogas, ofwel methaan- en  $\text{CO}_2$ -formatie, kan onderverdeeld worden in vier fases van degradatie:

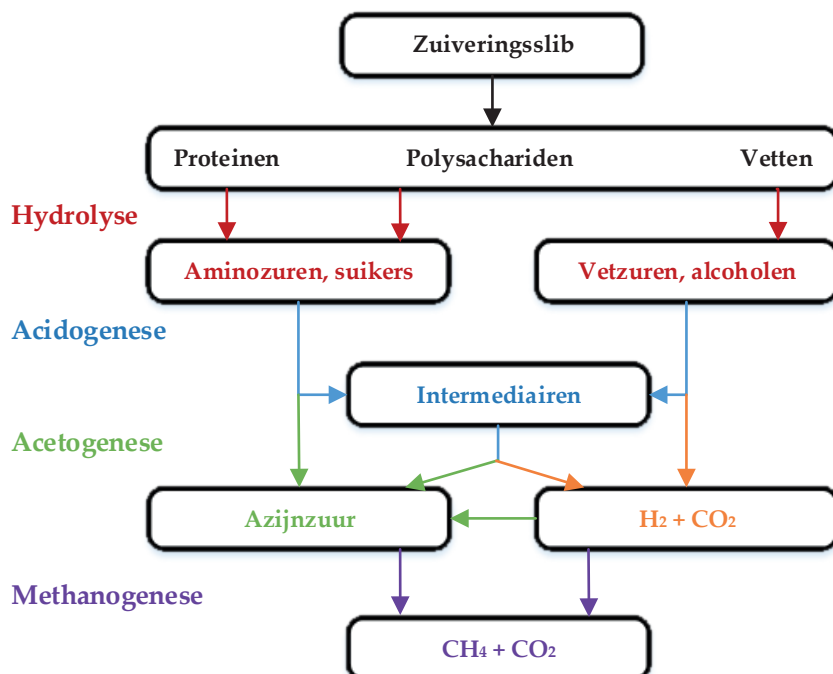
- 1 Hydrolyse
- 2 Acidogenese
- 3 Acetogenese
- 4 Methanogenese

De metabolische omzettingsreacties die plaatsvinden bij anaerobe gisting zijn complex en worden behandeld in gespecialiseerde literatuur, zoals bronnen. [9],[1], [10], [47], [48] Deze rapportage beperkt zich tot de hoofdlijnen. Elke afzonderlijke stap wordt bewerkstelligd door verschillende groepen micro-organismen, waarvan sommige groepen samenwerken (syntroof) om substraten om te zetten. [9],[10]

Figuur 7.2 toont schematisch de belangrijkste stappen en omzettingen. Van alle stappen zijn hydrolyse en acidogenese nauw aan elkaar verbonden. Dit geldt ook voor acetogenese en methanogenese en maakt het mogelijk om anaerobe gisting in twee generieke stappen uit te voeren.

Het is echter belangrijk om de afbraaksnelheid van de twee stadia op elkaar af te stemmen. Als hydrolyse en acidogenese te snel gaan, wordt het aandeel  $\text{CO}_2$  in het geproduceerde biogas hoger. Daarnaast neemt in dit geval de zuurconcentratie toe, waardoor de pH naar beneden gaat. Methanogene bacteriën zijn het meest gevoelig voor variaties in pH, temperatuur en andere omgevingsfactoren. Een significante verstoring in een van deze parameters kan leiden tot een verstoring van de biogas productie van enkele weken. [1], [10]

FIGUUR 7.2 BELANGRIJKSTE STAPPEN IN ANAEROBE GISTING



### 7.2.1 HYDROLYSE

Tijdens hydrolyse worden worden hoog moleculair gewicht componenten omgezet naar laag moleculair gewicht componenten en monomeren door exo-enzymen van anaerobe bacteriën. [1], [10] Hierbij worden koolhydraten doorgaans omgezet in 2 - 4 uur, eiwitten omgezet variërend van enkele uren tot dagen, en vetten omgezet in een aantal dagen. [10]

### 7.2.2 ACIDOGENESE

In de acidogenese fase worden laag moleculair gewicht componenten en monomeren omgezet in korte keten organische zuren (C1-C5 moleculen). Voorbeelden van deze moleculen zijn; propionzuur, acetaat, azijnzuur en alcoholen. Hierbij worden componenten als waterstof, waterstofsulfide en  $\text{CO}_2$  afgescheiden. [1], [10]

Van belang is dat wanneer er meer tussentijds gevormde waterstof ionen aanwezig zijn, er minder componenten gereduceerd kunnen worden. Dit leidt tot accumulatie van hoog moleculair gewicht componenten tijdens gisting. [9]

### 7.2.3 ACETOGENESE

In de derde fase van anaerobe gisting, acetogenese, worden korte ketens (C3-C5) en alcoholen uit de acidogenese omgezet door acetaat vormende bacteriën naar  $\text{CO}_2$ , waterstof, en azijnzuur. De reacties in deze fase vinden alleen plaats bij een lage waterstofsparing. [9], [10], [49]

Bacteriën die voor acetogenese zorgen, produceren echter waterstof. Het is daarom belangrijk om waterstof consumerende bacteriën aanwezig te hebben die gelijktijdig opereren aan de acetogenese bacteriën. Deze waterstof consumerende bacteriën vormen uit acetaat, waterstof en  $\text{CO}_2$ , methaan. [9]

### 7.2.4 METHANOGENESE

In de vierde en laatste fase wordt methaan gevormd uit drie substraat groepen:

- $\text{CO}_2$ -type:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCOO}^-$ ,  $\text{CO}$
- Methyl-type:  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+$ ,  $(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+$
- Acetate type:  $\text{CH}_3\text{COO}^-$

Hoewel niet iedere methanogene bacterie elke substraatgroep kan omzetten, wordt voor ongeveer 70% van de methaan productie gebruik gemaakt van azijnzuur en wordt voor 27-30% gebruik gemaakt van de reductie van  $\text{CO}_2$  met waterstof. [10]

## 7.3 RELEVANTE PROCESPARAMETERS GISTING

Om een gisting te optimaliseren en zo de productie van biogas te vergroten dienen de condities binnen de vier fasen van gisting optimaal te zijn. Daarnaast is het van belang om de condities van een gisting constant te houden, omdat significante conditieveranderingen het ecosysteem enkele weken kunnen verstoren of het ecosysteem in haar geheel kunnen doden. [1], [10], [47]

Tabel 7.1 laat de door de literatuur als optimaal beschouwde condities zien voor anaerobe gisting [9], [10]



TABEL 7.1

OPTIMALE CONDITIES STAPPEN ANAEROBE GISTING

Parameter	Hydrolyse/acidogenese	Methaanvorming
Temperatuur	25 – 35°C	Mesofiel: 32 – 42°C Thermofiel: 48 – 58°C
pH	5,2-6,3	6,7-7,5
C:N:P:S mol-ratio	500:15:5:3	600:15:5:3
Redox potentiaal	+400 to -300 mV	<-250 mV
Vermenigvuldigingstijd bacteriën	24 – 36 h	5 – 16 dagen
Sporen elementen	-	Ni, Co, Mo, Se

Als de gehele omzetting tot biogas in 1 processtap gedaan wordt, dienen omstandigheden vooral aangepast te worden aan eisen van methanogene bacteriën. Dit komt door hun langzamere groeisnelheid en hogere gevoeligheid voor hun milieu. Echter, degradatie van lignocellulose substraten wordt vaak verhinderd door de snelheid van de hydrolyse stap. Het wordt dus ook aanbevolen om prioriteit te geven aan deze stap.[1], [10], [47]

Als laatste dient vermeld te worden dat alle fasen bij een gelijke pH kunnen plaatsvinden, waardoor een één-staps-gisting tot de mogelijkheden behoort.

In onderstaande paragrafen worden relevante parameters met betrekking tot het pasturi destructie onderzoek nader toegelicht. Verdere relevante parameters voor anaerobe gisting worden in de Appendix G: Relevante proces parameters gisting kort toegelicht.

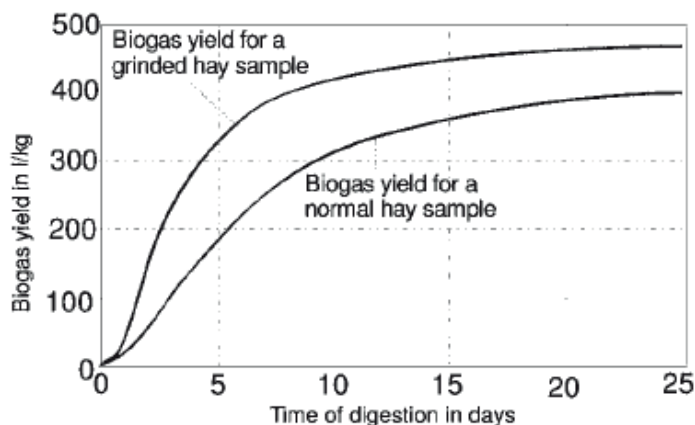
### 7.3.1 PARAMETER – SPECIFIEK OPPERVLAK VAN MATERIAAL

Een groter specifiek substraat oppervlak ondersteunt de snelheid van biochemische reacties. Het specifieke oppervlak is vaak direct omgekeerd kwadratisch gerelateerd aan de deeltjesgrootte. Een reductie in deeltjesgrootte, door bijvoorbeeld het substraat te vermaleren, heeft dus een gunstig effect op de biogas opbrengst in een gisting. [47] Dit heeft het meest zichtbare effect op substraten als cellulose en lignine. [10]

Figuur 7.3 laat het verschil in biogas opbrengst zien tussen een referentie substraat monster en een vermaleren substraat monster dat een grote fractie cellulose bevatte.

FIGUUR 7.3

BIOGASOPBRENGST - REFERENTIE TEGEN VERMALEN SUBSTRAAT (H001) [10]



In de figuur wordt het effect op hooi weergegeven wat rijk is aan cellulose. Hoewel dit niet hetzelfde is als slib, kan het effect op de cellulose fractie van slib vergelijkbaar zijn.

Naast de hogere biogas opbrengst na maling, werd gevonden dat de benodigde verblijftijd in de gisting omlaag ging om tot een vergelijkbare biogasopbrengst te komen.

### 7.3.2 PARAMETER – DESINTEGRATIE

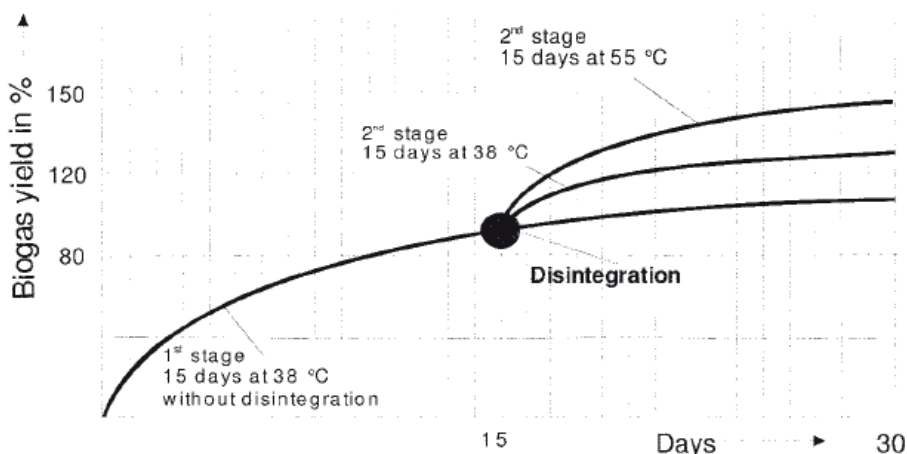
Desintegratie is het proces waarbij cel structuren van substraat kapot worden gemaakt. Dit kan bijvoorbeeld biologisch of door een voldoende grote kracht op de cel te zetten, waardoor de celwand openbreekt. Desintegratie van substraat heeft verschillende voordelen [10]:

- Verhoogde snelheid van slibafbraak
- Verhoogde ds. afbraak
- Verhoogde biogasopbrengst
- Verlaagde slibviscositeit
- Verbeterde sedimentatie eigenschappen
- Schuimvorming in de gisting wordt verminderd

De voordelen van een desintegratiemethode op de biogasproductie worden weergegeven in Figuur 7.4. Hierbij heeft slib na 15 dagen gisting een thermische desintegratie ondergaan gedurende 1 uur op 70 °C. De gedesintegreerde monsters zijn vervolgens mesofiel en thermofiel vergist gedurende 15 dagen, en vergeleken met het onbehandelde slib wat ook 15 dagen mesofiel vergist is. Hieruit bleek dat de thermische desintegratie na 15 dagen gisting 25% meer biogas heeft opgeleverd bij de mesofiele gisting en 50% meer biogas bij de thermofiele gisting, ten opzichte van de reguliere gisting. [10]

FIGUUR 7.4

BIOGASPRODUCTIE MET EN ZONDER DESINTEGRATIE [10]



Er zijn echter ook nadelen bij desintegratie van slib. Hoewel sedimentatie eigenschappen van het slib verbeteren, wordt de vloggrootte kleiner. De vlokken worden zonder desintegratie samengehouden door extracellulaire polymeren zoals polysacchariden, eiwitten en vetten. [50] Bij desintegratie worden interne cel polysacchariden vrij gelaten. Deze stoffen zijn moeilijk afbreekbaar door hun complexe structuur. Samen met eiwitten, hebben ze invloed op de effectiviteit van flocculanten door een negatieve lading op hun zijgroepen. [50] Dit fenomeen wordt in de literatuur als oorzaak genoemd voor slechtere ontwatering van anaeroob vergist slib. [43],[51] Ook wordt aangegeven dat flocculant gebruik tot 40% kan toenemen om vergelijkbare ontwateringsresultaten te behalen in vergelijking met niet-gedesintegreerd slib. [10] Daarnaast zal het ontwateren van slib na slibdesintegratie meer energie kosten, wat zich vertaalt naar een langere ontwateringstijd, om eenzelfde drogestofgehalte te halen als onbehandeld slib.

Door het vrijkomen van polymere structuren uit cellen, wordt bij desintegratie de hoeveelheid stikstof componenten in de waterfase verhoogd tot 30% tegenover niet-gedesintegreerd slib. [10] Dit komt doordat ammonium achterblijft als gevolg van de toegenomen slibafbraak. Hiernaast blijkt dat ook de fractie opgelost organisch materiaal toeneemt in de waterfase na mechanische destructie. [10]

#### 7.4 VOORBEHANDELINGSMETHODEN

Hydrolyse wordt in de literatuur aangeduid als snelheidslimiterende stap in anaerobe gisting[9],[1],[10] 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 gewicht moleculen afgebroken naar lager gewicht moleculen. Op deze manier wordt de hydrolyse stap versneld of omzeild. [1]

In de literatuur worden verschillende manieren van biomassa voorbehandeling aangegeven; chemische voorbehandeling (20-60% verhoogde afbraak), mechanische voorbehandeling (20-90%), ultrasone voorbehandeling (40-80%), thermofiele voorbehandeling (50-90%), biologische voorbehandeling/enzymatisch versnelde hydrolyse (tot 210%), elektrische voorbehandeling (tot 33%), en vacuüm voorbehandeling (tot 200%). [9], [52], [53] Hierbij is het niet ongewoon om een of meerdere van deze manieren te combineren. Het pasturi destructie concept kan gezien worden als een combinatie tussen een biologische, thermofiele en mechanische voorbehandeling.

Voor een overzicht van de recente ontwikkelingen in de literatuur met betrekking tot voorbehandelingsmethoden wordt de lezer verwezen naar Appendix H: Voorbehandelingsmethoden. De relevante theorie voor het pasturi destructie concept wordt in de volgende hoofdstukken per behandelingsstap nader toegelicht.

#### 7.5 FULL-SCALE VOORBEHANDELINGSTECHNOLOGIEËN

Er zijn verschillende pilot en full-scale processen ontwikkeld voor slibdesintegratie. De processen kunnen toegepast worden op een bestaande gistingsinstallatie met minimale verstoring van bestaande processen.

In Tabel 7.2 wordt een overzicht gegeven van gerapporteerde verbeteringen in de biogasopbrengst en ontwatering voor de respectievelijke voorbehandelingstechnologieën. In Appendix I: Full-scale voorbehandelingstechnologieën wordt dieper ingegaan op de verschillende full-scale technologieën en de gerapporteerde resultaten.

TABEL 7.2 OVERZICHT VAN VOORBEHANDELINGSPROCESSEN OP FULL-SCALE GETEST EN DE GERAPPORTEERDE EFFECTEN

Voorbehandeling	Toename organische stofafbraak	Biogas toename	Ontwateringseffecten	Bronnen
Thermische hydrolyse	10 – 50 %	10 – 50 %	Toename PE 6 – 8 % verbetering <sup>1</sup>	[20], [54], [27], [30][37] [13][26][25][29][28] [55] [56][57]
Chemische behandeling	54 – 57 %	5 %	-	[19],[20],[58]
Mechanisch:				
- CROWN	20 %	16 – 40 %	3 – 6 % verbetering <sup>2</sup>	[19], [20],[21]
- Cellruptor	30 – 40 %	30 – 40 %	-	[19],[59]
- BioLysis	17 % - 110 %	15 – 46 %	-	[20],[21]
- BioCrack	11 %	8%	Afname PE	[20],[21]
Ultrasoon	15 – 35 %	15 – 35 %	Onbestist	[19],[20],[21]
Electrisch (OpenCel)	40 %	60 %	-	[20],[60]

1 Van 23% d.s. naar 29 – 31% d.s.

2 Van gemiddeld 25% d.s. naar 28 – 31% d.s.

In het geval van bepaalde voorbehandelingsprocessen worden er in de praktijk en literatuur grote spreidingen in verbeteringen gerapporteerd. Een mogelijke verklaring voor deze verschillen kan liggen in het verschil in de samenstelling en leeftijd van het slib. Als het slib van zichzelf een lage afbreekbaarheid heeft door een hoge slibleeftijd of een grote fractie van hoog molecuulgewicht organisch materiaal heeft, valt er meer verbetering te halen door het toepassen van bovenstaande methoden. [61] Daarnaast valt in de tabel op dat de toename in organische stofafbraak niet direct leidt tot een toename in biogasproductie. Wanneer de biogasproductie lager uitvalt is dit doorgaans te wijten aan oxidatie van organische stof tijdens de behandeling. Een directe verklaring waarom de biogastoename hoger ligt dan de organische stofafbraak is niet gevonden.

# 8

## VERZURING

De verzuringsstap binnen het pasturi destructie onderzoek dient als opwarmingsstap voor de pasteurisatie. Hierbij wordt de chemische samenstelling van het slib veranderd en komen er enzymen vrij die een mogelijk positief effect kunnen hebben op vervolgstappen in het proces.

Om het effect van natuurlijke verzuring te onderzoeken op labschaal, zijn tijdens de proeven, pH verloop, CZV-verloop en VVZ-verloop<sup>7</sup> onderzocht. Dit is gedaan met het slib dat vanaf de bandindikker naar de gisting wordt gebracht inclusief PE en FeCl<sub>3</sub> (zie Figuur 2.2).

### 8.1 THEORIE

De verzuringsstap is een vorm van biologische voorbehandeling waar de activiteit van bacteriën in het slib wordt gestimuleerd, waardoor enzymen vrijkomen. De verzuring in het pasturi destructie concept combineert effecten van behandeling door het toevoegen van zuren, thermofiele behandeling en de biologische voorbehandeling zoals beschreven in het vorige hoofdstuk en Appendix H.4: De verhoogde temperatuur verzwakt micro-organismen die onder lage temperaturen zijn gegroeid, waardoor deze kwetsbaarder zijn voor afbraak. De aanwezige koolhydraten en vetten worden omgezet in vrije vetzuren wat de pH verlaagt, en daarnaast worden de micro-organismen gestimuleerd waardoor er enzymen vrijkomen voor de afbraak. De vrijgekomen enzymen, de lagere pH en de verhoogde temperatuur versterken de hydrolyse, waardoor uiteindelijk meer celmateriaal afgebroken kan worden.

### 8.2 LABORATORIUM OPSTELLING

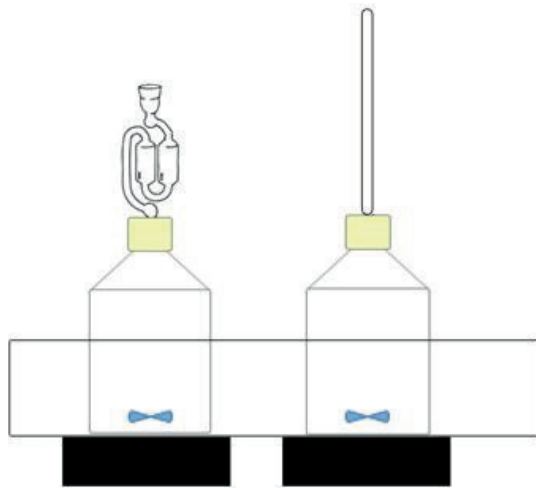
Voor de verzuring zijn plastic flessen gebruikt van 250 mL. De voorbehandeling is uitgevoerd in batch-omstandigheden bij twee beluchtingscondities. De flessen zijn geplaatst in een waterbad waarin de temperatuur constant is gehouden op respectievelijk 37 °C, 45 °C of 55 °C. Elke fles is gevuld met 200 mL slib bij een bekend droge stofgehalte. Met behulp van magneet-roerders is het slib geroerd op 25 RPM om goede menging te verkrijgen. Ieder experiment is in duplo ingezet. De gehanteerde opstelling is schematisch weergegeven in Figuur 8.1.

In eerder onderzoek is aangetoond dat de productie van kortere VVZ 23% hoger is onder micro-aerobe omstandigheden ten opzichte van anaerobe omstandigheden. Bij micro-aerobe omstandigheden zijn er nog steeds kleine hoeveelheden vrij zuurstof aanwezig, maar wordt er niet actief belucht. Onder anaerobe omstandigheden is er geen vrij en geen gebonden zuurstof aanwezig. [62] Korte VVZ zoals azijnzuur zijn snel af te breken, terwijl complexere VVZ zoals propionzuur in grote concentraties remmend kunnen werken. Om dit effect vast te stellen zijn er twee varianten onderzocht: micro-aeroob en anaeroob. De micro-aerobe opstelling bestond uit open flessen wat er voor zorgt dat er minimale uitwisseling plaats kan vinden met zuurstof. Om verdamping van water te voorkomen is er een 25 mL Mohr pipet als condensatiekolom bevestigd, zodat er gelijktijdig lucht aanwezig kon zijn in de fles.

<sup>7</sup> VVZ – Vluchtige vetzuren

De anaerobe flessen zijn afgesloten met een waterslot en zijn 5 minuten ontgast met stikstof. Monsternames worden na 4, 8 en/of 24 uur behandeling, waarbij de flessen eerst met een walsende beweging gehomogeniseerd zijn om een representatief monster te verkrijgen. Na monstername zijn de samples in een ijsbad geplaatst om lopende reacties te stoppen.

FIGUUR 8.1 OPSTELLING VERZURINGSPROEVEN: LINKS ANAEROOB; RECHTS MICRO-AEROOB



Vanuit het ijsbad werden de samples overgebracht in een centrifuge, waar bij 10.000 RPM de aanwezige vaste stof gescheiden werd van de vloeistof. Hierna werd het centrifugaat gefilterd met behulp van een 0,45 microm MicroSart filter. De samples werden geanalyseerd op pH, sCZV en vrije vetzuren (VVZ). De ingezette experimenten zijn weergegeven in Tabel D.5 in de appendix.

## 8.3 RESULTATEN

### 8.3.1 MICRO-AEROBE EXPERIMENTEN

In eerder onderzoek is aangetoond dat de productie van kortere VVZ hoger is onder micro-aerobe omstandigheden ten opzichte van anaerobe omstandigheden. [62] Op laboratoriumschaal is aangetoond dat er met dezelfde verblijftijd meer VVZ worden geproduceerd bij micro-aerobe omstandigheden. De verdere onderverdeling van deze VVZ is niet verder onderzocht. In deze experimenten is aangetoond dat de sCZV- en VVZ-concentraties toenemen met de duur van de behandeling. Ondanks een hogere VVZ-productie werd er geen pH-verlaging waargenomen. Dit valt te verklaren door het bufferend vermogen van het slib, waardoor de pH niet snel veranderd. De resultaten van deze experimenten zijn te vinden in 0 Verzuringsexperimenten.

### 8.3.2 ANAEROBE EXPERIMENTEN

Op basis van de resultaten van de micro-aerobe experimenten is besloten om de anaerobe experimenten bij 55 °C te onderzoeken. De VVZ en sCZV toename bij is vergelijkbaar bij 45 °C en 55 °C, en bij 55 °C wordt de thermofiele activiteit optimaal gestimuleerd. Elk experiment is in duplo uitgevoerd en de resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel. Deze gegevens zijn ook grafisch weergegeven in 0 Verzuringsexperimenten.

TABEL 8.1

CONCENTRATIE VVZ EN SCZV, ANAEROOB, 55°C

Experiment	sCZV			VVZ		
	0 h	4 h	8 h	0 h	4 h	8 h
Reeks 1	840	7.330	8.030	250	560	800
(5,9 ds.%)	825	7.155	8.040	205	560	745
Reeks 2	1.525	5.360		860	1.500	
(5,5 ds.%)	1.490	6.760		870	1.260	
Reeks 3	1.200	5.300		675	1.040	
(4,2 ds.%)	1.185	4.800		675	970	

Gedurende de anaerobe experimenten was na 4 uur geen merkbare daling in pH-waarde gemeten, maar na 8 uur behandeling daalde de pH van 5,8 naar 5,4. De sCZV-concentratie vlakkt duidelijk af na 4 uur terwijl de VVZ concentratie nog lijkt toe te nemen. In de vervolgg-experimenten is gekeken naar de verandering van beide concentraties en de afhankelijkheid van het droge stofgehalte. Opvallend is dat de sCZV-concentratie een lineaire correlatie heeft met het droge stofgehalte, terwijl de VVZ productie tussen de eerste set experimenten dat gedrag niet vertoont. De tweede en derde set experimenten laat echter wel weer een relatie zien tussen de VVZ-concentratie en het droge stofgehalte. Daarnaast valt op dat de beginconcentratie van sCZV hoger is bij de laatste anaerobe experimenten dan bij eerdere anaerobe en micro-aerobe experimenten. De oorzaak hiervan is niet verder onderzocht. Echter, voor iedere experimentenreeks is een nieuwe hoeveelheid slib gehaald wat de variatie kan verklaren. Hierdoor is de kwaliteit van het slib voor alle experimenten niet constant.

### 8.3.3 CONCLUSIE/DISCUSSIE

Op basis van de experimenten kan er een tussentijdse conclusie getrokken worden over de effecten van de verzuringsbehandeling. Uit de eerste reeks experimenten bij micro-aerobe beluchting is duidelijk geworden dat de sCZV- en VVZ-concentraties over de tijd toenemen, terwijl de pH waarde onveranderd bleef. Er is dus wel verzuring opgetreden in de vorm van toegenomen vetzuren zonder dat de pH waarde beïnvloed is vanwege het bufferend vermogen van het slib. Uit deze reeks is ook naar voren gekomen dat het thermofiele gebied met 55°C interessant is om nader te onderzoeken bij anaerobe omstandigheden. Bij de anaerobe condities is na 8 uur wel een duidelijk meetbare pH verandering opgemerkt van 5,8 naar 5,4. Bij de micro-aerobe condities tredt er dus een sterkere bufferende werking op van het slib. De lage pH-waarde van het slib aan het begin van de experimenten valt te verklaren door aanwezige doseringen van  $\text{FeCl}_3$ .

In beide beluchtingscondities valt een snelle afvlakking op te merken na 4 uur behandeling voor hoofdzakelijk de sCZV-concentratie en in mindere mate de VVZ-concentratie. Onder anaerobe omstandigheden is de sCZV na 4 uur met 770% toegenomen ten opzichte van de aanvangsconcentratie, terwijl dit na 8 uur 860% was. Ditzelfde is gevonden bij micro-aerobe beluchting met 470% en 580% na 4 en 8 uur behandeling respectievelijk.

Op basis van de resultaten uit de experimenten kan geconcludeerd worden dat een behandel-tijd van 4 uur optimaal lijkt voor beide beluchtingscondities om het sCZV-gehalte aanzienlijk te verhogen. Doordat de toename in sCZV-concentratie na 4 uur behandeling sterk afvlakt valt er mogelijk nog een optimalisatieslag te maken in nader onderzoek. Dit afvlakking-punt bepaalt de optimale behandelings-tijd voor maximaal resultaat en kan mogelijk onder de 4 uur behandeling liggen.

Als behandelvariant zou de verzuring het best bij anaerobe omstandigheden uitgevoerd kunnen worden bij een temperatuur van 55°C, daar deze de grootste toename in sCZV laat zien. Voor de vervollexperimenten is er gekozen voor een behandelduur van 4 uur. Andere eventuele gunstige effecten worden besproken bij de relevante hoofdstukken over gisting en ontwatering.



# 9

## PASTEURISATIE

Het doel van de pasteurisatie stap is het zwak of kapot maken van celmembranen van aanwezige micro organismen in het slib. Hiermee wordt beoogd de biomassa toegankelijker te maken voor wat betreft afbreekbaarheid van de organismen bij gisting. Verbeterde afbreekbaarheid in de gisting zorgt voor een hogere biogas opbrengst samen met een reductie in de hoeveelheid droge stof die richting slib-eindverwerking gaat.

### 9.1 THEORIE

Bij pasteurisatie van slib is de combinatie tussen temperatuur en verblijftijd van belang. De warmte die toegevoerd wordt tast de chemische bindingen in de celwanden en membranen aan waardoor eiwitten vrijkomen die anders niet aangetast zouden worden bij enzymatische hydrolyse. Hoe complexer de samenstelling van de celwanden, hoe meer warmte nodig is om een vergelijkbaar resultaat te verkrijgen. Om deze reden heeft een pasteurisatie behandeling ook meer resultaat in combinatie met een mesofiele gisting dan bij een thermofiele gisting; bij een thermofiele gisting wordt immers al meer warmte aan het proces toegevoegd.

Het pasteuriseren van secundair slib leidt tot een toename in sCZV, wat op zijn beurt leidt tot 25-30% meer biogas. [63], [64],[65] Bij een lagere temperatuur is het noodzakelijk om een langere behandelingsduur te hanteren om hetzelfde resultaat te krijgen. Voor primair slib lijkt pasteurisatie weinig toegevoegde waarde te geven. [2]

### 9.2 EXPERIMENTEEL

Voor de pasteurisatie experimenten is gebruik gemaakt van dezelfde opstelling als de verzuringsexperimenten, en slib afkomstig van dezelfde locatie (zie Figuur 2.2). Er is gekozen om twee varianten te bestuderen: vier uur op 55°C en één uur op 70°C. De eerste variant is gebaseerd op de sterke toename in de tijd van sCZV en vrije vetzuren tijdens de verzuringsexperimenten, het tweede is gebaseerd op het commercieel beschikbare Eco-Therm proces. Monsternamen geschiedt op een gelijke manier als bij de verzuringsexperimenten waarbij de monsters direct na monsternamen met behulp van een ijsbad worden gekoeld.

Het effect van de pasteurisatie van slib is op twee manieren onderzocht: direct met behulp van DNA-kleuring, en indirect met behulp van vergistingsexperimenten. De resultaten van de gistingsexperimenten worden beschreven in Hoofdstuk 11, Gisting.

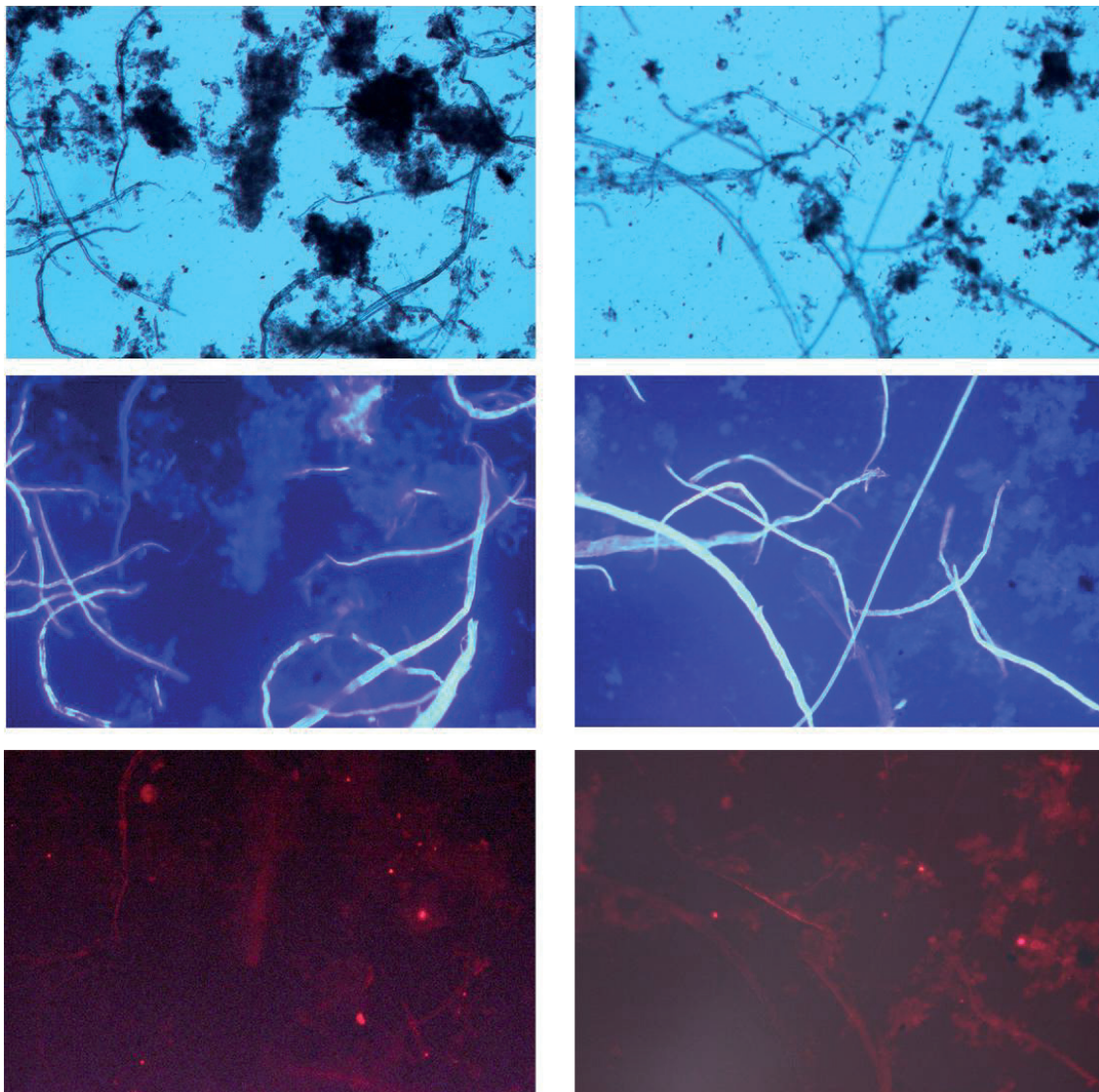
De DNA-kleuring maakt gebruik van DAPI (4,6-diamidino-2-fenylindool) en PI (propidium jodide). Het monster wordt verdund tot 0,6 wt% in demi-water, waarna 25 µL van de DAPI- en de PI-oplossing worden toegevoegd in een Eppendorf cup. Dit wordt gemengd en 15 minuten in het donker geïncubeerd. Van het monster wordt een preparaat gemaakt welke onder een fluorescentie microscoop wordt geplaatst. De DAPI-kleuring bindt zich aan al het DNA en licht cyaanblauw op (excitatie 461 nm), terwijl de PI kleuring impermeabel is voor celwanden en alleen bindt aan vrij DNA waar het rood oplicht (excitatie 617 nm).

Voor alle microscopische beelden geldt dat het onbehandelde slib bij de PI-kleuring langer is belicht dan de behandelde monsters om beeld te krijgen. Opgemerkt moet worden dat het om verschillende monsters gaat met wisselende vezelgehaltes. Deze vezels lichten fel op bij de blauwe DAPI-kleuring. Alle observaties hebben derhalve alleen betrekking op het slib en niet op de eventuele verschillen in vezelgehaltes.

### 9.3 RESULTATEN

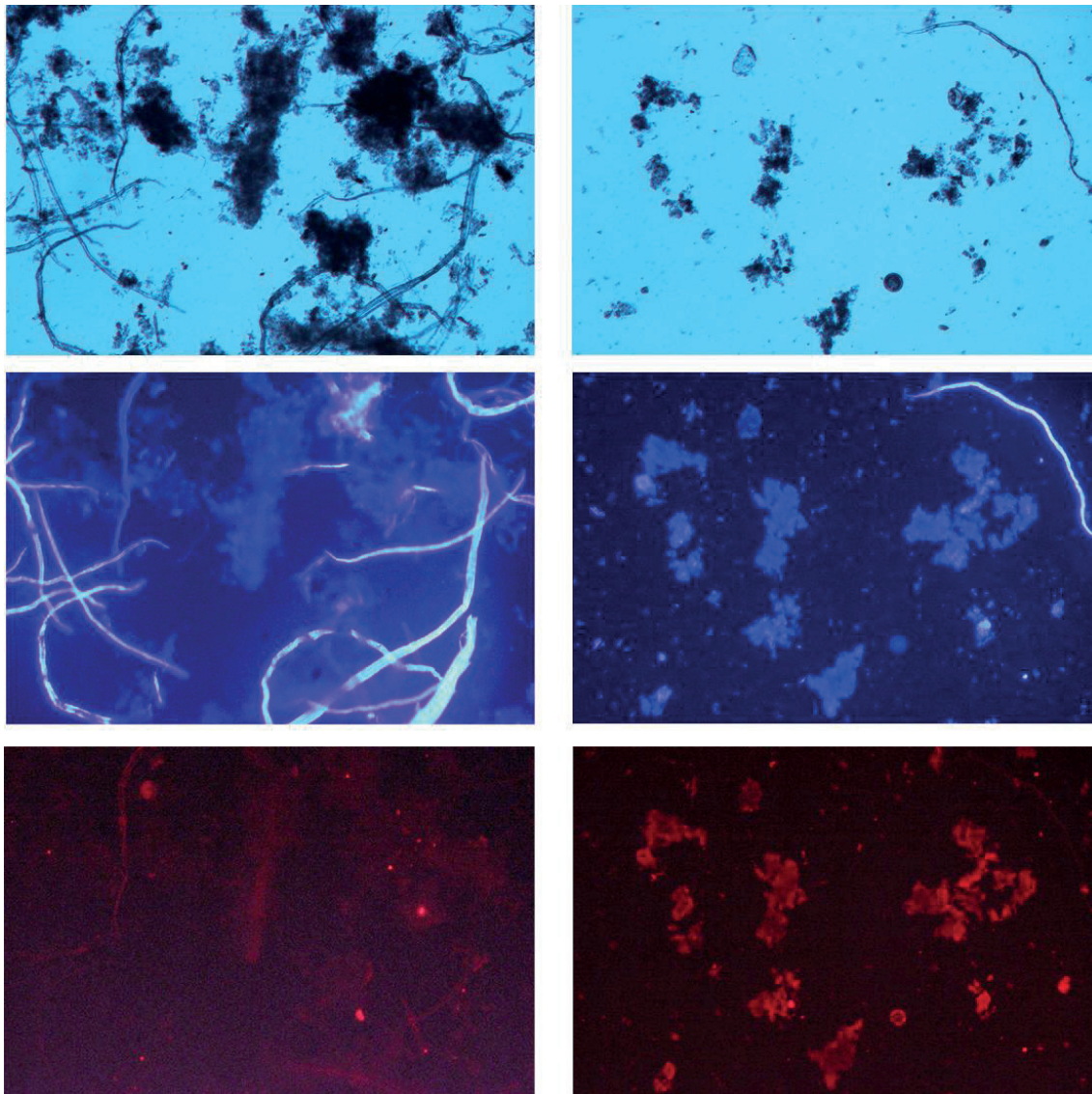
Indicatieve fluorescentieresultaten van de pasteurisatieproeven op 55°C en 70°C staan weergegeven in Figuur 9.1 en Figuur 9.2.

**FIGUUR 9.1** RESULTATEN FLUORESCENTIE METINGEN. LINKS ONBEHANDELD SLIB, RECHTS 4 UUR BIJ 55°C BEHANDELD. VAN BOVEN NAAR BENEDEN: LICHTMICROSCOPISCH BEELD, DAPI-FLUORESCENTIE (ALLE DNA), PI-FLUORESCENTIE (VRIJGEKOMEN DNA). VERGROTING 200X.



In Figuur 9.1 valt te zien dat de temperatuurbehandeling vooral effect heeft op de structuur, en een kleine invloed op de activiteit van het slib. De rechter afbeeldingen laten kleinere slibvlokken zien wat een indicatie is dat het slib minder verkleefd is in het behandelde monster. Daarnaast licht het behandelde monster meer op bij de rode PI-kleuring, wat een indicatie is dat cellen geïnactiveerd zijn.

FIGUUR 9.2 RESULTATEN FLUORESCENTIE METINGEN. LINKS ONBEHANDELD SLIB, RECHTS 1 UUR BIJ 70°C BEHANDELD. VAN BOVEN NAAR BENEDEN: LICHTMICROSCOPISCH BEELD, DAPI-FLUORESCENTIE (ALLE DNA), PI-FLUORESCENTIE (VRIJGEKOMEN DNA). VERGROTING 200X.

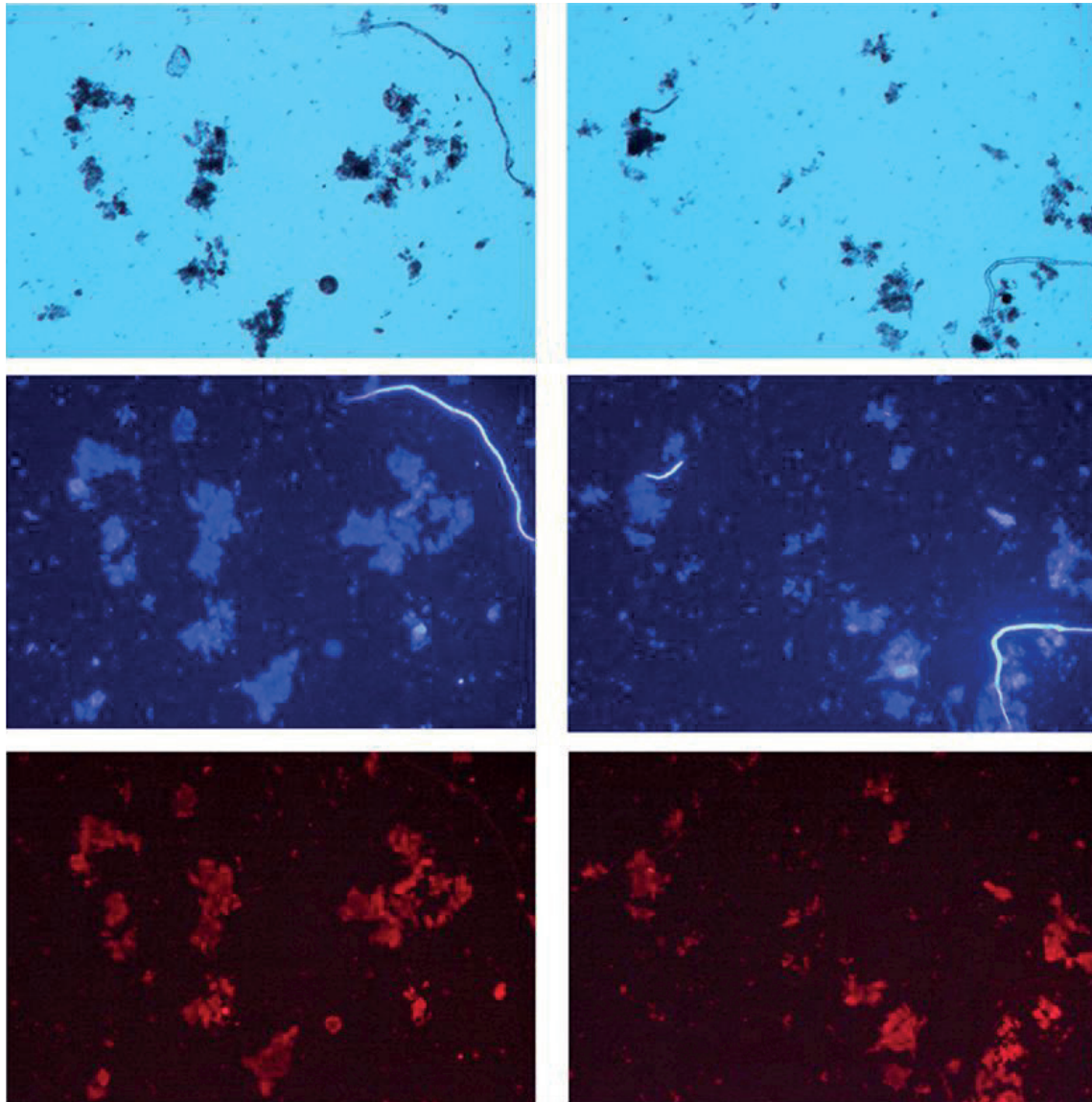


Figuur 9.2 laat duidelijk het effect zien van de pasteurisatie behandeling. In het lichtmicroscopisch beeld bevindt het slib zich in vele kleine groepen. Daarnaast laat de propidium jodide-kleuring zien dat er veel vrij DNA is, wat inhoudt dat vrijwel al het celmateriaal permeabel is en dus kwetsbaarder is voor anaerobe afbraak.

Om te onderzoeken of een venturi-behandeling nog meer zichtbaar resultaat geeft na pasteurisatie is ook dit onderzocht in Figuur 9.3.



FIGUUR 9.3 RESULTATEN FLUORESCENTIE METINGEN. LINKS 1 UUR BIJ 70°C BEHANDELD, RECHTS 1 UUR BIJ 70°C BEHANDELD DAARNA 10X VENTURI-BEHANDELING. VAN BOVEN NAAR BENEDEN: LICHTMICROSCOPISCH BEELD, DAPI-FLUORESCENTIE (ALLE DNA), PI-FLUORESCENTIE (VRIJGEKOMEN DNA). VERGROTING 200X.



Bovenstaande figuur laat een vergelijkbaar resultaat met de pasteurisatie-behandeling zien met betrekking tot het permeabel maken (rode kleuring) van cellen. Bij beide behandelingen lichten de zichtbare cellen rood op bij de PI-kleuring, wat een indicatie is van celinactivering. De venturi-behandeling lijkt geen zichtbaar resultaat te hebben op de inactivering van cellen, bovenop het effect van de pasteurisatie. Het toegevoegde effect van de venturi-behandeling is vooral zichtbaar door de afwezigheid van grote agglomeraties. Wanneer beide behandelde monsters met elkaar vergeleken worden is het duidelijk dat het venturi-behandelde monster meer kleine clusters cellen bevat wat de cellen geschikter maakt voor anaerobe afbraak.

#### 9.4 CONCLUSIE/DISCUSSIE

De resultaten van de fluorescentie microscopie geven een beeld van de effecten van de voorbehandelingsstappen op de activiteit en de structuur van het slib. Wat belangrijk is om te herhalen, is dat de belichtingscondities van de camera anders zijn voor het onbehandelde monster bij de rode fluorescentie kleuring: om nog enig beeld te krijgen is de belichting lan-

ger geweest dan de rest. Wat opvalt is dat de behandeling van het slib bij 55 °C gedurende vier uur al afsterving van cellen aangeeft en een lichte verandering in de structuur van het slib. De pasteurisatie bij 70 °C gedurende een uur is duidelijk effectiever: nagenoeg alle cellen zichtbaar lichten rood op, en het slib is minder samengeklonterd. Als laatste is het toegevoegde effect van de venturi-behandeling na de pasteurisatie te zien. Hierbij valt op dat er evenveel cellen rood oplichten, maar de structuur is nog verder veranderd: het slib is nog minder samengeklonterd en zit in kleinere clusters dan bij gewoon gepasteuriseerd slib.

Uit de proeven valt op te maken dat de temperatuurbehandelingen bij 55 °C en 70 °C beiden meer vrij DNA laten zien. Dit toont aan dat ook bij 55 °C er een licht pasteuriserende werking is opgetreden. Doordat de behandeling van 55 °C gedurende vier uur zowel verzurende als pasteuriserende effecten laat zien, is er voor gekozen om deze mee te nemen in de vervolgonderzoeken om te testen naast de pasteurisatie op 70 °C.

# 10

## VENTURI DESTRUCTIE

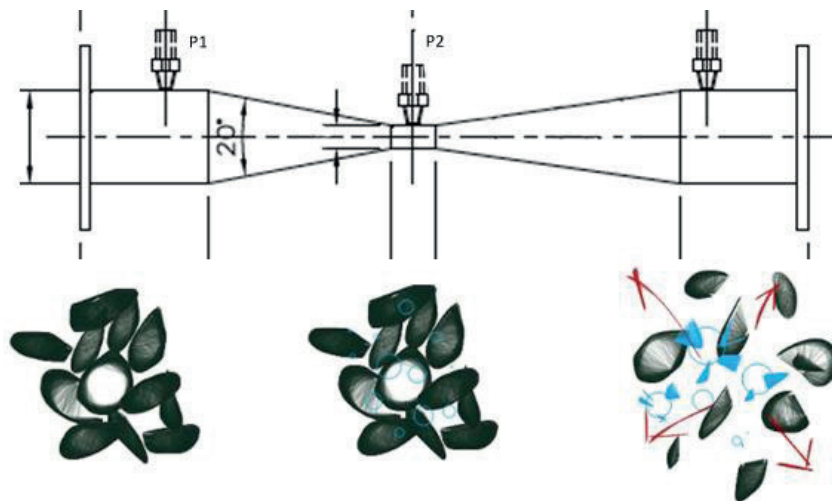
Wanneer een vloeistof ofwel verhit wordt ofwel onderworpen wordt aan een reductie in druk, wordt uiteindelijk een stadium bereikt waar zichtbaar bellen worden gevormd. [66] Het doel van de hydrodynamische cavitatie stap is het creëren van deze bellen met behulp van een venturi buis. Door het vormen en imploderen van deze bellen worden cellen aangetast wat uiteindelijk de afbreekbaarheid van droge stof bevordert in de anaerobe gisting.

### 10.1 THEORIE

Het venturi principe maakt gebruik van een vernauwing in een buis waardoor een vloeibaar medium stroomt. In de vernauwing gaat de stroomsnelheid van het medium omhoog, waardoor de druk daalt. Bij voldoende druk daling ontstaan bellen die na de vernauwing door druk opbouw imploderen. Voldoende grote implosie krachten veroorzaken bij het slib medium, celwand destructie. Dit principe staat schematisch weergegeven in Figuur 10.1.

Om cavitatie in slib te laten plaatsvinden, dient bij de drukreductie in de venturi een druk onder de dampspanning van water en/of opgeloste gassen bereikt te worden. De geometrie van de venturi speelt hierbij een belangrijke rol.

FIGUUR 10.1 SCHEMATISCH DE VORMING VAN BELLEN EN IMPLOSIE IN DE VERSCHILLENDE ZONES VAN EEN VENTURI BUIS



In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de uit de literatuur bekende optimale ingaande en uitgaande hoeken van de venturi buis. De dimensionering van de venturi buis is hierbij als volgt (zie ook Figuur 10.1):

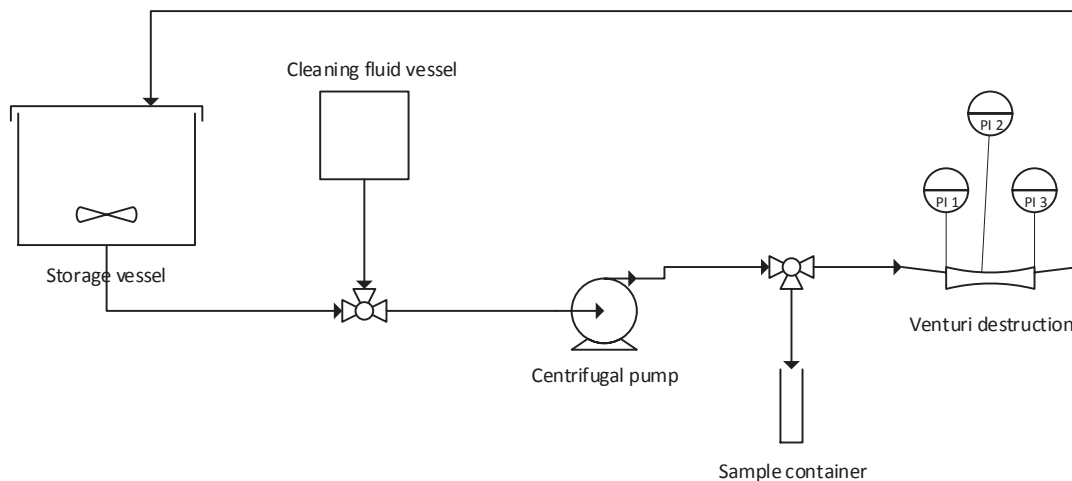
- Venturi opening, uitgang en inwendige buisdiameter: 15 mm
- Venturi keel (vena contracta) diameter: 3 mm
- Ingaande hoek: 20°
- Uitgaande hoek: 12°

In de opstelling zijn druksensoren geplaatst voor (P1), in de keel (P2) en na de venturi (P3) zoals weergegeven in bovenstaande figuur. Deze zijn in een later stadium echter verwijderd doordat deze een luchttek veroorzaakten waardoor geen cavitatie op kon treden.

## 10.2 EXPERIMENTEEL

De experimentele opstelling van de venturi-proeven staat schematisch weergegeven in onderstaande figuur.

FIGUUR 10.2 SCHEMATISCHE OPSTELLING LABPROEVEN VENTURI



Het voorraadvat is een dubbelwandig vat van 20 L met een pneumatisch roerwerk. Het vat wordt met behulp van een waterbad continu op temperatuur gehouden. Het materiaal wordt met een centrifugaalpomp uit het vat en door de venturi gepompt. De centrifugaalpomp zorgt voor een flow van 9 L/min en een druk in het systeem van 2,5 bar(a). Bij deze omstandigheden daalt de druk in de vernauwing van de venturi naar 0,02 bar, waarbij het kookpunt voor water onder 20 °C komt te liggen. De venturi opstelling is gefabriceerd van PVC (Figuur 10.1).

De venturi buis is uitgerust met druksensoren van Hygrosens die meten over een bereik van 1-3 bar(a) in de in- en uitgang van de venturi en 0-2 bar in de keel van de venturi. Het signaal wordt verzonden naar een DATAQ analoog/digitaal omzetter welke gekoppeld is aan een laptop. Deze zijn in een later stadium echter verwijderd doordat deze een luchttek veroorzaakten waardoor geen cavitatie op kon treden.

Naast niet gepasteuriseerde samples, worden pasteurisatie samples met droge stofgehalte van 4,5 wt% tot 5,5 wt% opgewarmd en warm gehouden op 55 °C gedurende vier uur of 70 °C gedurende één uur. Hierna wordt een monster van 500 mL genomen wat op temperatuur gehouden wordt, terwijl het overige slib drie of tien keer door de venturi opstelling wordt gepompt.

Van de monsters wordt het filtraat geanalyseerd op sCZV, Ortho-fosfaat, en totaal-N. Daarnaast wordt met behulp van batchvergistingen de vergistbaarheid vastgesteld en worden de samples ontwaterd door een Mareco-pers, beschreven in Hoofdstuk 12.

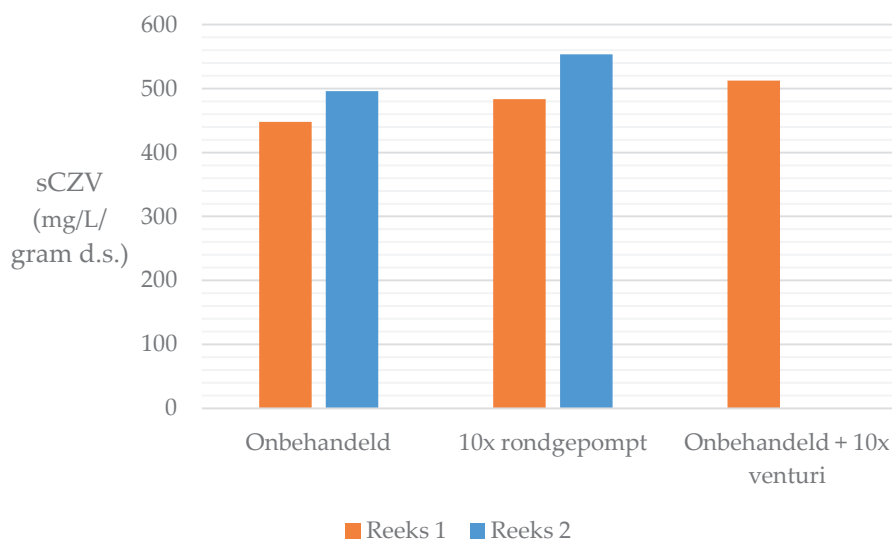
### 10.3 RESULTATEN

De resultaten van de venturi-behandeling zijn uitgesplitst voor onbehandeld, verzuurd en gepasteuriseerd slib. Daarnaast is ook gekeken naar het effect op slib wat al vergist is geweest. In dit hoofdstuk ligt de nadruk op de sCZV-concentratie; de biogasopbrengst wordt in een volgend hoofdstuk behandeld. De getoonde reeksen maken gebruik van slib gehaald op hetzelfde moment. Om de resultaten met elkaar te kunnen vergelijken is er gecorrigeerd voor grammen droge stof.

#### 10.3.1 EFFECT VAN CAVITATIE OP ONBEHANDELD SLIB

Met behulp van sCZV-metingen is gekeken naar het effect wat de gebruikte pomp heeft op het slib, in vergelijking met de venturi-behandeling. Slib is op 12 °C gehouden, waarna het ofwel 10 keer is rondgepompt zonder de venturi op zijn plaats, ofwel met de venturi op zijn plaats. De data is gecorrigeerd op basis van het droge stofgehalte, waardoor een eerlijke vergelijking mogelijk is. Er is gekozen om 10 keer rond te pompen met de verwachting dat deze behandeling een duidelijker resultaat zou moeten geven.

FIGUUR 10.3 EFFECT VAN CAVITATIE EN RONDpompen VAN SLIB OP DE sCZV-CONCENTRATIE



In reeks 1 van het experiment neemt de sCZV-concentratie toe met 7% wanneer alleen gepompt is en met 14% als de venturi geplaatst is. In reeks 2 is de sCZV concentratie met 11% toegenomen na pompen.

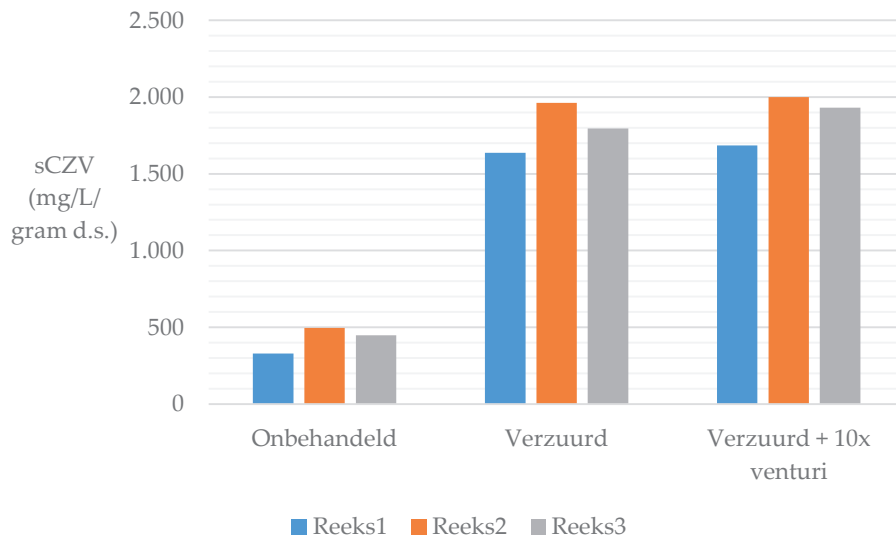
#### 10.3.2 EFFECT VAN CAVITATIE OP VERZUURD SLIB

In dit experiment is gekeken naar de toename in sCZV-concentratie en biogasproductie (Hoofdstuk 11) wanneer er na verzuring ook een venturi-behandeling plaatsvindt. Hierbij is een referentie monster op kamertemperatuur gehouden, terwijl een ander monster verzuurd is door het 4 uur bij 55 °C te behandelen.

In Figuur 10.4 is te zien dat de sCZV-concentratie van verzuurd slib in verhouding met onbehandeld slib significant is toegenomen. De extra toename door de venturi-behandeling is echter marginaal met een toename van 1%, 2% en 6% respectievelijk.



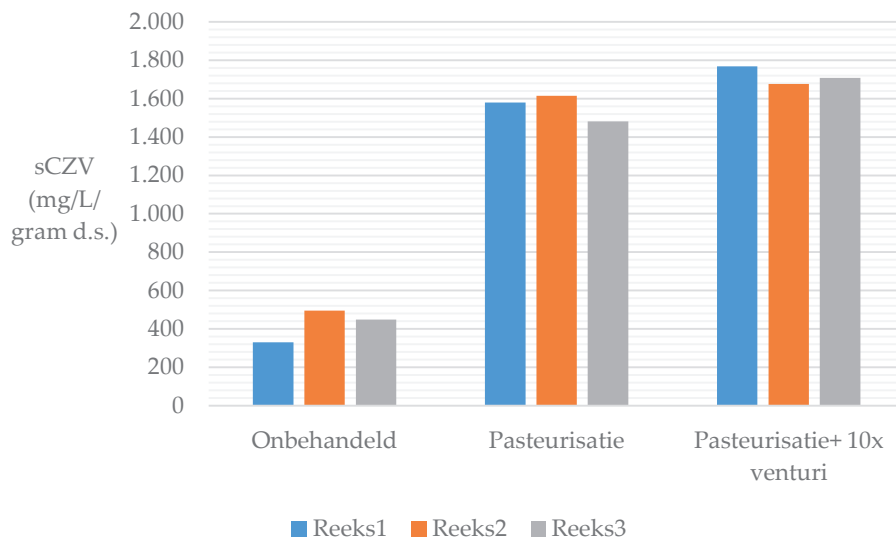
FIGUUR 10.4 EFFECT VAN CAVITATIE OP DE sCZV-CONCENTRATIE BIJ VERZUURD SLIB



### 10.3.3 EFFECT VAN CAVITATIE OP GEPASTEURISEERD SLIB

Eenzelfde experiment is uitgevoerd met gepasteuriseerd slib, waarbij weer gekeken is naar de sCZV-concentratie en de biogasproductie. Slib is hier behandeld door het eerst in 30 minuten op te warmen tot 70 °C, waarna het nog 30 minuten op deze temperatuur gehouden is. Vervolgens is het monster rechtstreeks gekoeld of eerst met de venturi behandeld.

FIGUUR 10.5 EFFECT VAN CAVITATIE OP DE sCZV-CONCENTRATIE BIJ GEPASTEURISEERD SLIB

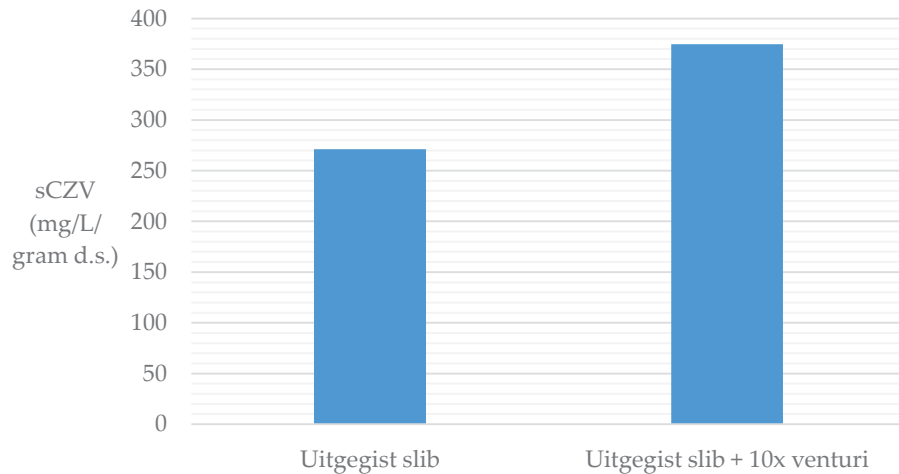


Wederom valt er een aanzienlijke toename in sCZV-concentratie te zien na de temperatuurbehandeling. Deze toename is echter lager dan bij een behandeling op 55 °C, namelijk 1500 mg/L/gram d.s. tegenover 1800 mg/L/gram d.s. De venturi-behandeling zorgt vervolgens voor een toename van 15%, 4% en 12% respectievelijk in de sCZV-concentratie. Dit is hoger dan bij de behandeling van verzuurd slib. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat vrijgekomen sCZV bij de verzuring door de venturi geoxideerd is. Hierdoor wordt er een kleinere toename gemeten dan werkelijk heeft plaatsgevonden. Dit effect treedt echter niet zichtbaar op bij het gepasteuriseerde slib. Hiervoor is geen verklaring gevonden.

### 10.3.4 EFFECT VAN CAVITATIE OP VERGIST SLIB

Rwzi Garmerwolde gebruikt twee slibgistingstanks met een interne circulatie van tank 2 naar tank 1. Slib uit de tweede gistingstank met gemiddeld 20 dagen verblijftijd in de gisting van rwzi Garmerwolde is gebruikt als "uitgelist slib". Van dit slib is een hoeveelheid behandeld met de venturi-opstelling om te onderzoeken hoeveel biogas er nog verkregen kan worden.

FIGUUR 10.6 EFFECT VAN CAVITATIE OP DE sCZV-CONCENTRATIE BIJ UITGEGIST SLIB

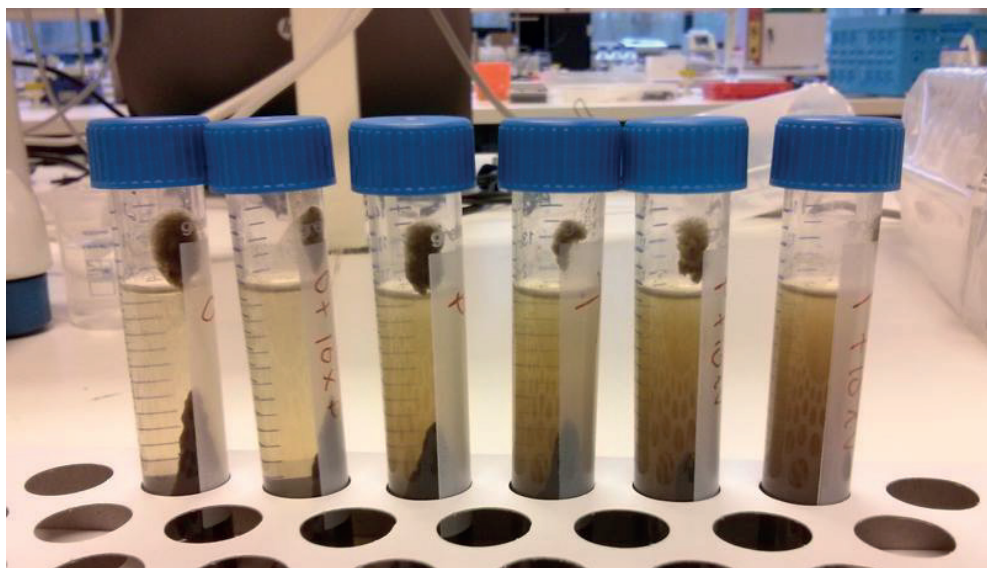


De sCZV-concentratie is na venturi-behandeling toegenomen met 38%, wat aangeeft dat er meer materiaal uit het slib is vrijgekomen. Dit geeft tevens aan dat het slib mogelijk nog verder vergist kan worden.

### 10.3.5 EFFECT VAN VOORBEHANDELING OP DEELTJESGROOTTE

In het vorige hoofdstuk viel met behulp van de microscoop op dat er ogenschijnlijk minder grote slibvlokken aanwezig waren als gevolg van de voorbehandeling. (Figuur 9.1, Figuur 9.2 en Figuur 9.3)

FIGUUR 10.7 INVLOED VAN VOORBEHANDELING OP DEELTJESGROOTTE VAN HET SLIB. VAN LINKS NAAR RECHTS: ONBEHANDELD SLIB; 10X RONDGEPOMPT; 1 UUR BIJ 70°C; 4 UUR BIJ 55°C; 1 UUR BIJ 70°C + 10X VENTURI; 4 UUR BIJ 55°C + 10X VENTURI;



In Figuur 10.7 is ditzelfde effect goed zichtbaar na centrifugatie van de monsters. Alle monsters zijn op dezelfde instelling gecentrifugeerd, maar de monsters die een behandeling hebben ondergaan scheiden duidelijk slechter wat te zien is aan de troebelheid van het centrifugaat. Deze observatie lijkt ook te schalen met de intensiteit van de behandeling, waarbij de slecht bezinkbare monsters eerst een temperatuurbehandeling hebben ondergaan gevolgd door een venturi-behandeling.

#### 10.4 DISCUSSIE/CONCLUSIE

De effecten van de venturi-destructie-behandeling zijn op twee manieren beoordeeld; licht-/fluorescentie-microscopisch en met behulp van sCZV-metingen. Beide observaties laten zien dat de venturi-behandeling een effect heeft op het slib, maar dat deze in termen van sCZV-concentratie marginaal lijken te zijn. Een mogelijke verklaring voor het uitblijven van een duidelijke sCZV-concentratie kan liggen in de experimentele opstelling; het voorraadvat voor de venturi is niet volledig afgesloten waardoor het slib tegelijkertijd belucht wordt. Hierdoor is het mogelijk dat organisch materiaal oxideert en niet gemeten wordt.

De sCZV-metingen en de fluorescentie-microscopie laten vooral zien dat de temperatuurbehandeling een grote mate van biologische afsterving hebben veroorzaakt. De grootste verandering lijkt te zijn op het gebied van deeltjes-/vlok grootte van het slib. Zowel het lichtmicroscopisch beeld als de observatie van bezinkbaarheid van gecentrifugeerde monsters geeft aan dat er een toename is in kleine deeltjes, wat meer oppervlak geeft voor biochemische reacties.

Doordat het slib middels de venturi-opstelling tegelijkertijd actief belucht is, valt er mogelijk een grotere toename in sCZV en uiteindelijk biogas te verwachten wanneer het proces anaeroob toegepast kan worden.

# 11

## GISTING

Binnen het pasturi-destructie onderzoek laten de gistingsexperimenten het uiteindelijke effect zien van zowel individuele als gecombineerde voorbehandelingsstappen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor alle experimenten slib van rwzi Garmerwolde is gebruikt, tenzij anders vermeld. Dit slib bestaat voor 95 ds.% uit secundair slib en heeft een aandeel primair slib van 5 ds.%

### 11.1 EXPERIMENTEEL

Binnen het onderzoek kunnen twee vormen van vergistingsopstellingen onderscheiden worden:

- Continu
- Batch

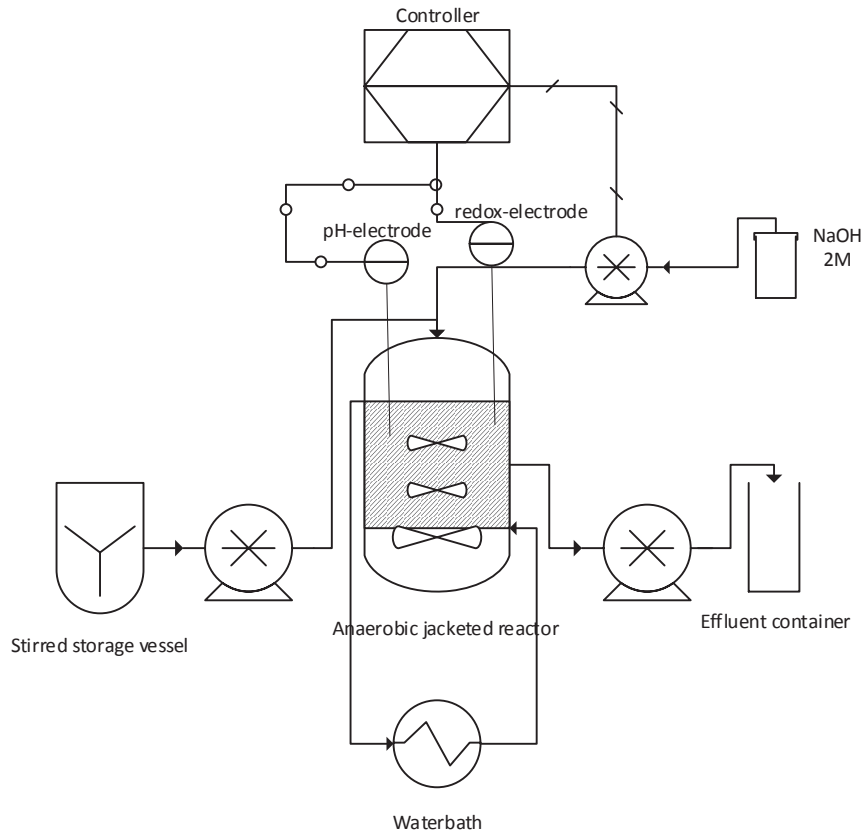
#### 11.1.1 CONTINU-GISTINGEN

Om gistingsexperimenten in batch-opstelling uit te voeren is het noodzakelijk om een zogenaamde ent-cultuur aanwezig te hebben: een bacteriecultuur die bij voorkeur geadapteerd is aan het type substraat. Om deze reden zijn er gedurende de experimenten twee continue gistingen opgestart zodat er een mesofiele en thermofiele cultuur aanwezig is tijdens de experimenten. Beide gistingen zijn minstens twee maanden gevoed met alleen secundair slib, zodat ze geadapteerd zijn aan dit type slib tegen de tijd dat de batch-experimenten uitgevoerd worden. In Figuur 11.1 staat de continue gisting schematisch weergegeven.

Beide gistingen zijn ingesteld op een gemiddelde slib verblijftijd van 20 dagen, gebaseerd op de gisting van rwzi Garmerwolde. De mesofiele gisting werd met behulp van een watermantel op 37 °C gehouden en de thermofiele gisting werd op 55 °C gehouden. Verder werd de stabiliteit van de gisting in de gaten gehouden door het redox potentiaal en de pH waarden te meten.

Voor het controleren en regelen van de pH en redox potentiaal niveaus werd een Consort R3620 gebruikt in combinatie met een SP61Y ORP-Electrode en een SP94Y pH-electrode. De controller was aangesloten op een Masterflex TW-1262 pomp die NaOH kon toevoegen wanneer de pH te laag werd. Het regelen van de pH werd voornamelijk gedaan om inhibitie van methanogenese ten gevolge van een te lage pH te voorkomen, dit is echter niet voorgekomen.

FIGUUR 11.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN CONTINUE GISTING



FIGUUR 11.2 LABORATORIUMOPSTELLING CONTINUE GISTINGEN



De laboratoriumopstelling van beide gistingen is in bovenstaande figuur te zien.

De reactoren zijn gevoed met slib verkregen van rwzi Garmerwolde wat ook gebruikt is tijdens de experimenten. De voeding is zo afgesteld dat de reactor een constant volume bevat, en de verblijftijd van het slib in de reactor 20 dagen is. De voeding is puls-pauze – met een pulstijd van 15 minuten en een pauze-tijd van vier uur. De biogasproductie is gecontroleerd door het gas via een waterslot af te laten in de zuurkast. Het gas zelf is niet opgevangen, omdat de reactoren alleen gebruikt zijn om ent-slib te genereren.

### 11.1.2 BATCH GISTINGEN

De fermentatieproeven zijn gebaseerd op twee bestaande protocollen: een “bellenteller” voor kwantitatief fermentatieonderzoek geproduceerd door het National Centre for Biotechnology Education (NCBE) van de University van Reading; en een protocol van het Verein Deutscher Ingenieure, VDI 4630, voor het vaststellen van de vergistbaarheid van organisch materiaal.

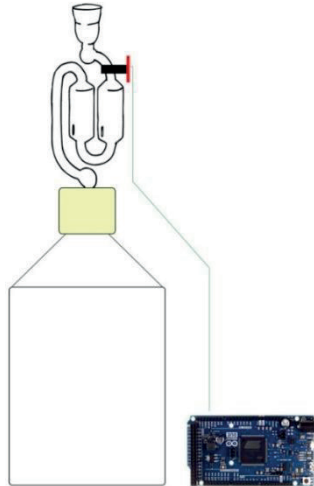
Op basis van het systeem van NCBE is een nieuw systeem ontwikkeld wat meerdere gistingen in de tijd kan bijhouden. De teller maakt gebruik van een waterslot gevuld met vloeistof waar een infraroodsensor op geplaatst is. Wanneer voldoende gas is gevormd, verplaatst het zich als een bel door het waterslot waar deze door de infraroodsensor gedetecteerd wordt. Het 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. Door licentiebepkeringen 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.

Als fermentatiereactors zijn plastic containers gebruikt van 250 mL (Figuur 11.3). Als entmateriaal is gistingsslib gebruikt uit eigen reactoren wat gegroeid is op secundair slib van rwzi Garmerwolde. Slib, behandeld of onbehandeld, is op basis van de droge stof fractie gemengd met entmateriaal in 500 mL flessen. De reactoren zijn vervolgens gevuld met 200 gram materiaal, afgesloten met een waterslot met sensor en geplaatst in een waterbad van respectievelijk 37 °C voor mesofiele en 55 °C voor thermofiele gisting (Figuur 11.4).

De bellentellers zijn geijkt met behulp van een zogenaamde syringe pump, waarbij nauwkeurig het debiet van een gas kan worden gedoseerd. Bij verschillende debieten bleek iedere bel 330 µL te bevatten.

FIGUUR 11.3 SCHEMATISCHE WEERGAVE BATCH



FIGUUR 11.4 OPSTELLING BATCH GISTINGEN



In de onderstaande tabellen staan de ingezette experimenten inclusief de hoeveelheid substraat, entmateriaal, en relevante droge stofgehaltenes.

TABEL 11.1 INGEZETTE EXPERIMENTEN: MESOFIELE GISTING REEKS 1

Experiment	Substraat	Substraat d.s. (75% oDS)	Entmateriaal	Entmateriaal d.s. (65% oDS)
Onbehandeld	172,91 gr.	4,75 ds.%	279,92 gr.	3,5 ds.%
4h, 55°C	171,43 gr.	5,24 ds.%	279,50 gr.	
4h, 5°C, 3x Venturi	171,61 gr.	4,45 ds.%	279,73 gr.	
4h, 55°C, 10x Venturi	170,95 gr.	4,45 ds.%	280,49 gr.	
1h, 70°C	170,87 gr.	4,43 ds.%	280,21 gr.	
1h, 70°C, 3x Venturi	172,19 gr.	4,43 ds.%	279,37 gr.	
1h, 70°C, 10x Venturi	171,44 gr.	4,43 ds.%	281,63 gr.	

TABEL 11.2 INGEZETTE EXPERIMENTEN: THERMOFIELE GISTING

Experiment	Substraat	Substraat d.s. (75% oDS)	Entmateriaal	Entmateriaal d.s. (65% oDS)
Onbehandeld	184,45 gr.	3,42 ds.%	265,37 gr.	3,5 ds.%
Onbehandeld + 10x pomp	185,11 gr.	3,42 ds.%	265,45 gr.	
4h, 55°C	185,16 gr.	4,35 ds.%	265,25 gr.	
4h, 55°C, 10x Venturi	185,62 gr.	4,35 ds.%	265,71 gr.	
1h, 70°C	186,64 gr.	4,48 ds.%	266,20 gr.	
1h, 70°C, 10x Venturi	185,32 gr.	4,48 ds.%	266,45 gr.	



TABEL 11.3 INGEZETTE EXPERIMENTEN: MESOFIELE GISTING REEKS 2

Experiment	Substraat	Substraat d.s. (75% oDS)	Entmateriaal	Entmateriaal d.s. (65% oDS)
Onbehandeld	228,69 gr.	3,55 ds.%	223,88 gr.	3,5 ds.%
Onbehandeld + 10x pomp	99,63 gr.	3,70 ds.%	100,50 gr.	
Onbehandeld + 10x Venturi	103,88 gr.	3,85 ds.%	101,03 gr.	
4h, 55°C	256,17 gr.	4,47 ds.%	195,82 gr.	
4h, 55°C, 10x Venturi	254,36 gr.	4,33 ds.%	195,98 gr.	
1h, 70°C	254,11 gr.	4,64 ds.%	197,02 gr.	
1h, 70°C, 10x Venturi	255,32 gr.	4,36 ds.%	195,50 gr.	

TABEL 11.4 INGEZETTE EXPERIMENTEN: VENTURI-BEHANDELING MESOFIEL UITGEGIST SLIB

Experiment	Substraat	Substraat d.s. (65% oDS)	Entmateriaal	Entmateriaal d.s. (65% oDS)
Gistingsslib GMW <sup>3</sup>	101,27 gr.	3,50 ds.%	100,40 gr.	3,50 ds.%
Gistingsslib GMW, 10x Venturi	105,16 gr.	3,50 ds.%	106,26 gr.	

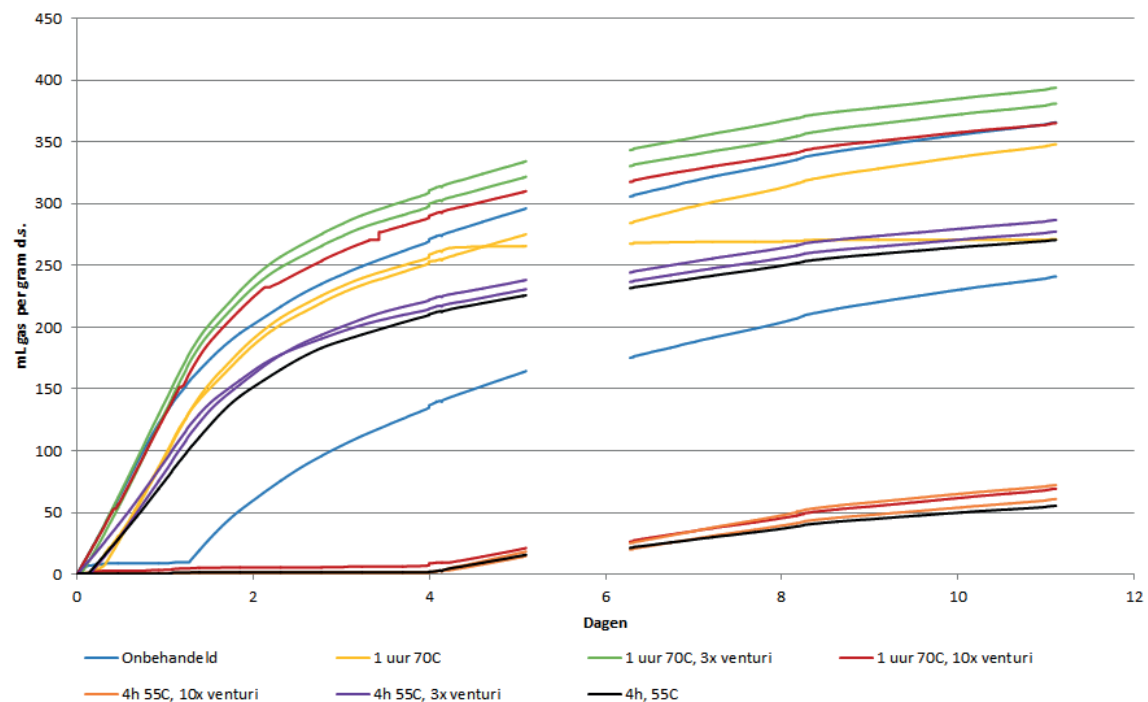
## 11.2 RESULTATEN

In onderstaande figuren staan de resultaten van de batchgistingen weergegeven. Belangrijk is om op te merken dat door de relatief kleine schaal van de batchgistingen er grotere spreidingen kunnen ontstaan. In de loop van de experimentenreeks is deze spreiding afgenomen. De ruwe data van alle gistingsexperimenten bevindt zich in de appendix. In onderstaande paragrafen is de data gecorrigeerd op basis van volume (1 bel  $\approx$  330  $\mu$ L gas), en gedeeld door de grammen toegevoegde droge stof substraat.

### 11.2.1 MESOFIELE GISTINGEN, NOVEMBER

Figuur 11.5 laat de biogasproductie over de tijd zien voor de eerste reeks mesofiele gistingen. Om te zorgen voor een betere vergelijking zijn alle gistingen gecorrigeerd op de hoeveelheid toegevoegde droge stof. Iedere variant weergegeven in Tabel 11.1 is in duplo ingezet wat wordt weergegeven in onderstaande figuur met behulp van verschillende kleuren.

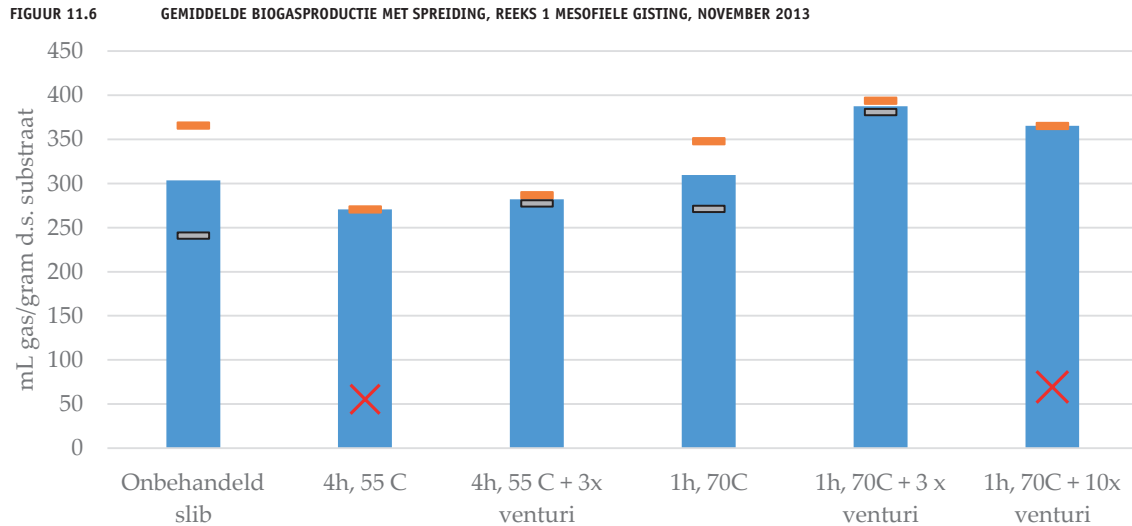
FIGUUR 11.5 GECORRIGEEDE GASPRODUCTIE, REEKS 1 MESOFIELE GISTING, NOVEMBER 2013





Opvallend is het gat in de data tussen de vijfde en zesde dag van gisting. Dit is te wijten aan een softwarefout waardoor tijdelijk geen data geregistreerd is. Daarnaast valt op dat bij een aantal gistingen er nagenoeg geen gasproductie geregistreerd is. Dit werd veroorzaakt door een lek waardoor het geproduceerde gas niet langs het meetsysteem werd geleid.

Na een tweede softwarefout is besloten het gistingsexperiment na 12 dagen stop te zetten.



Figuur 11.6 laat de gemiddelde gasproductie zien van de duplo experimenten, inclusief de spreiding tussen de duplo metingen; de oranje balk geeft de bovengrens aan, de grijze balk de ondergrens. Door storingen in de gebruikte apparatuur zijn sommige duplo metingen getoond als een rood kruis in de bovenstaande figuur. Eén variant, verzuurd slib met 10x venturi-behandeling, is helemaal niet getoond vanwege meetfouten in beide ingezette experimenten. Uit deze experimentenreeks valt vooral op te maken dat de monsters die behandeld zijn op 70°C met 3 maal venturi-behandeling een verhoogde biogasopbrengst geven ten opzichte van onbehandeld slib. Deze resultaten kunnen echter slechts als zeer indicatief gezien worden vanwege de genoemde storingen. Hierdoor is besloten om op een later tijdstip een tweede reeks mesofiele gistingen in te zetten.

### 11.2.2 THERMOFIELE GISTINGEN

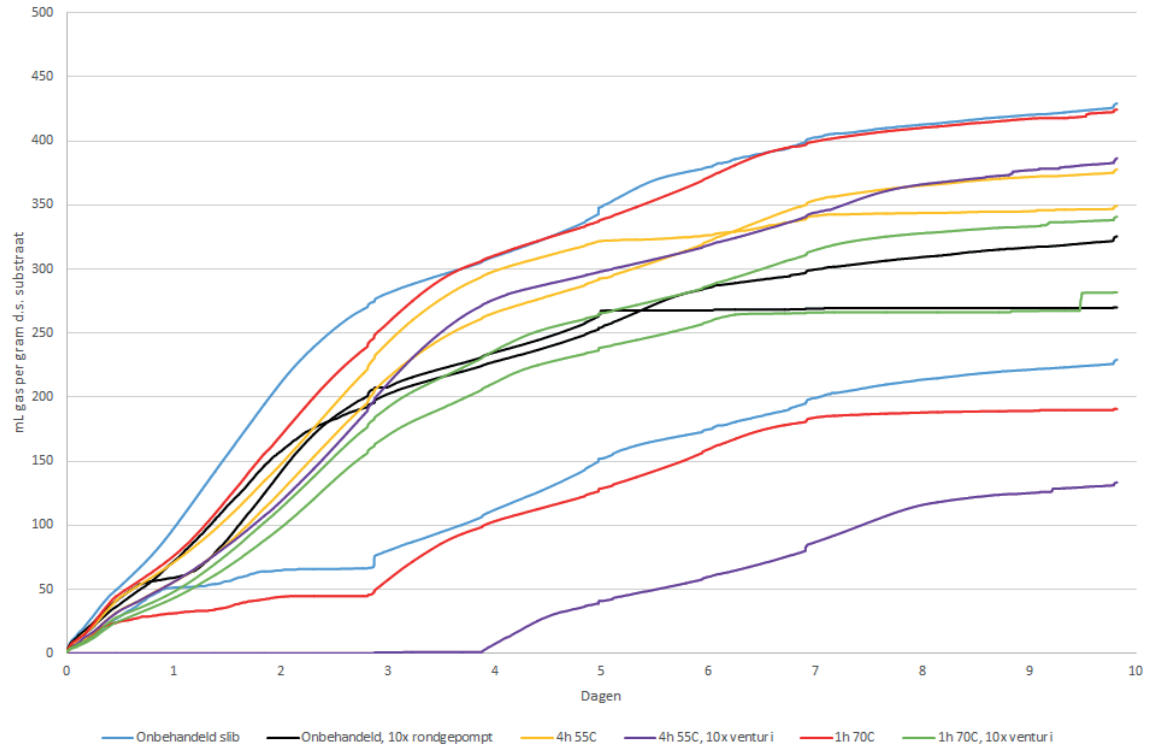
In Figuur 11.7 – Gecorrigeerde gasproductie, thermofiele gisting, december 2013 wordt de biogasproductie over de tijd van de reeks thermofiele gistingsproeven weergegeven. Hier is wederom de biogasproductie gecorrigeerd naar de hoeveelheid toegevoegde droge stof voor een betere vergelijking tussen de experimenten. De uiteindelijke gemiddelde biogasproductie inclusief spreiding wordt weergegeven in Figuur 11.8.

In deze experimentenreeks waren er ook moeilijkheden met het meten van de gasproductie, door verkeerd geproduceerde gistingscontainers. Deze moeilijkheden uitten zich in plotse linge afvlakkingen of stijgingen in de biogasproductie.

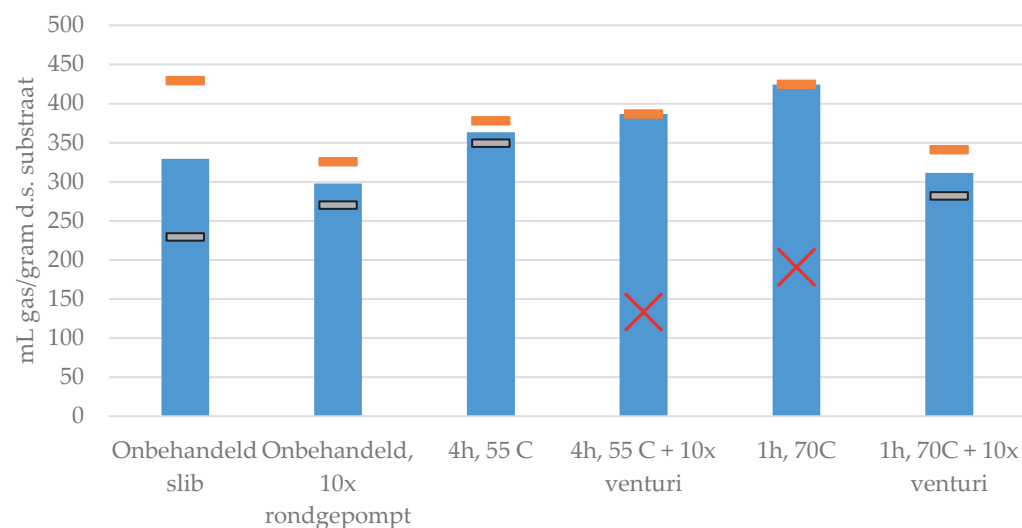
Hierdoor laten enkele duplo metingen een grote spreiding laten zien wat terug te leiden is tot een foutieve meting, te zien als afvlakking van de biogasproductie in bovenstaande figuur. Wanneer gekeken wordt naar de varianten “Onbehandeld, 10x Pomp”, “4h, 55 C” en “1h, 70 C + 10x venturi” in Figuur 11.8 valt te zien dat de spreiding hier vrij klein is met een afwijking van ±4% – 11% van het gemiddelde. Hierbij moet opgemerkt worden dat bij de twee laatstge-

noemde metingen ook een afvlakking zichtbaar is, waardoor de uiteindelijke spreiding naar waarschijnlijkheid dichterbij 4% ligt. Deze metingen geven een indicatie van de verwachte resultaten van de foutieve metingen, namelijk dat deze naar verwachting maximaal 10% zal afwijken van de correct gemeten waarden.

FIGUUR 11.7 GECORRIGEERDE GASPRODUCTIE, THERMOFIELE GISTING, DECEMBER 2013



FIGUUR 11.8 GEMIDDELTE BIOGASPRODUCTIE MET SPREIDING, THERMOFIELE GISTING, DECEMBER 2013



Wanneer we bovengenoemde punten in ogenschouw nemen, valt op dat geen enkele behandelde variant een significante verbetering laat zien in biogasproductie ten opzichte van het onbehandelde monster. Ter vergelijking: het onbehandelde monster laat als maximale biogasproductie 429 mL per gram d.s. substraat zien; het gepasteuriseerde monster ("1h 70C") komt het dichtst in de buurt met maximaal 424 mL per gram d.s. substraat. De afwezigheid van

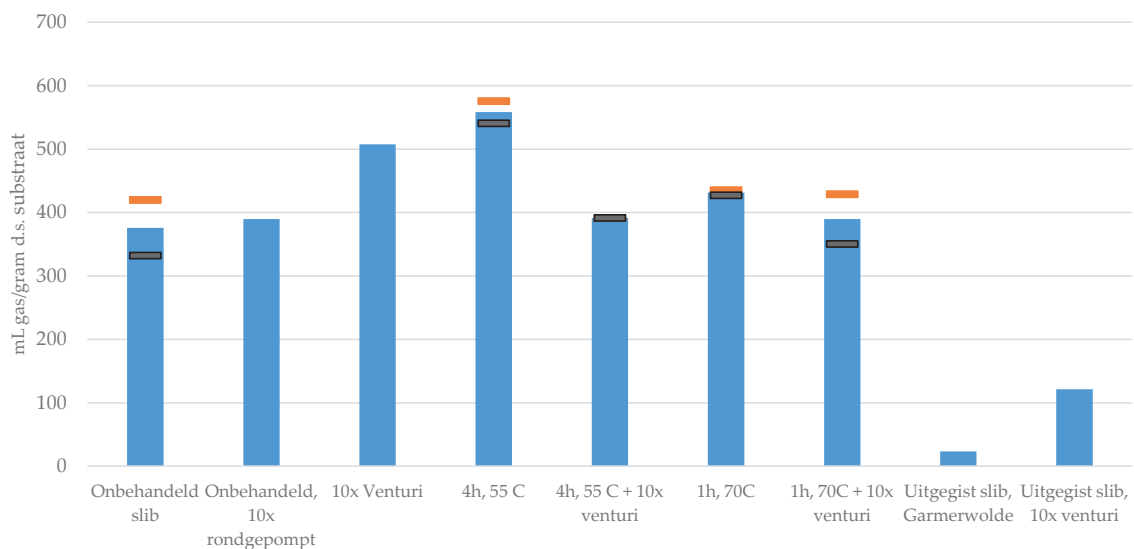
deze verbetering kan duiden op inhibitie van het gistingsproces. Door de voorbehandelingsmethoden is er veel sCZV beschikbaar gemaakt wat omgezet kan worden naar propionzuur. Een hoge concentratie propionzuur kan remmend werken op het verloop van de gisting.

### 11.2.3 MESOFIELE GISTINGEN, DECEMBER - JANUARI

Omdat alle resultaten van de eerste reeks mesofiele gistingsproeven vroegtijdig (na 13 dagen) gestopt zijn, zijn additionele proeven ingezet. In Figuur 11.9 en Figuur 11.10 worden de resultaten van deze proeven weergegeven. Hierbij wordt in Figuur 11.10 de gecorrigeerde biogasproductie weergegeven aan de hand van de hoeveelheid toegevoegde droge stof, en laat Figuur 11.9 de gemiddelde biogasproductie inclusief spreiding zien. Interessant is hierbij de variant waarin uitgegist slib behandeld is met de venturi-opstelling en weer vergist is.

In deze reeks gistingsproeven zijn er nagenoeg geen meetfouten opgetreden, op twee van de gistingsproeven na. Het betreft één “Onbehandeld slib” en één “1h 70C, 10x venturi”, waar er een knik te zien is wat aanduidt dat er tijdelijk te weinig gas is gemeten. Doordat het volledige verloop van de gisting is bijgehouden kan het resultaat kwalitatief vergeleken worden met de duplo en andere monsters. Buiten de duidelijke knikken om is het verloop namelijk analoog aan de duplo meting.

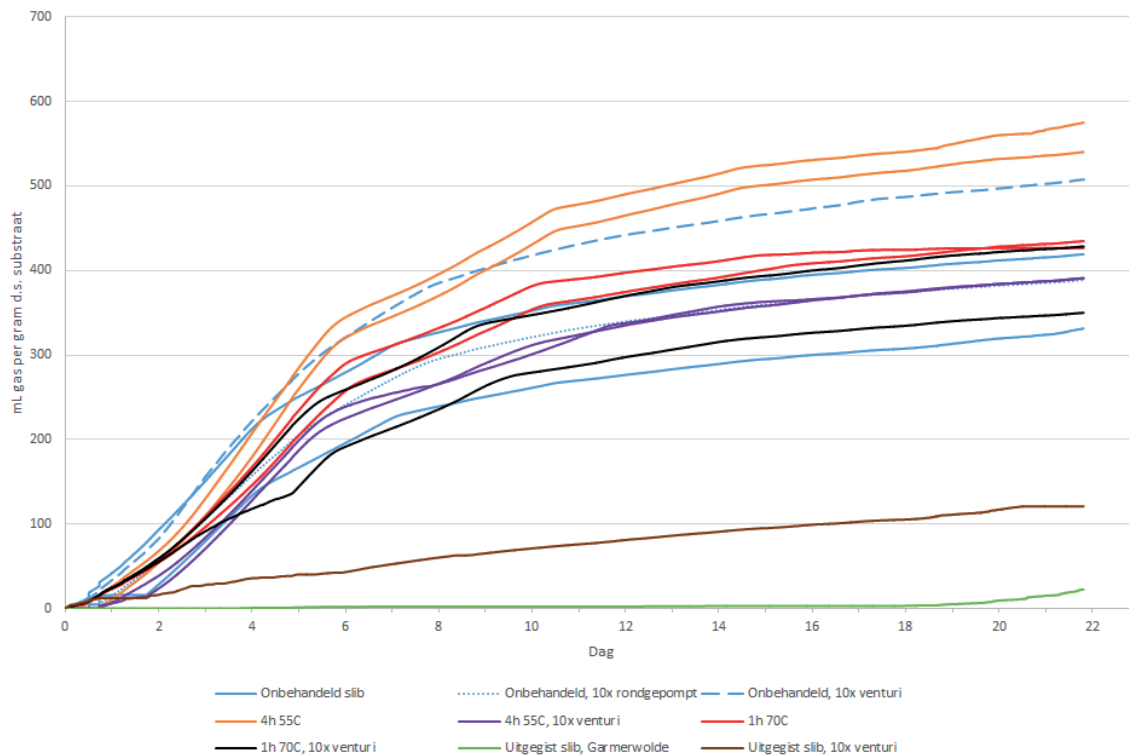
FIGUUR 11.9 GEMIDDELDE BIOGASPRODUCTIE MET SPREIDING, MESOFIELE GISTING, DECEMBER 2013 – JANUARI 2014



Wat op te maken is uit bovenstaande figuren is dat er twee varianten significant meer biogas geproduceerd hebben dan het onbehandelde monster; slib dat alleen met de venturi behandeld is (“Onbehandeld, 10x Venturi”) en verzuurd slib (“4h, 55 C”) met respectievelijk 508 mL en 558 mL biogas ten opzichte van 420 mL voor onbehandeld slib. Opvallend is dat de combinatie tussen een temperatuurbehandeling en de venturi-behandeling in beide gevallen minder biogasproductie oplevert dan alleen de temperatuurbehandeling. In de eerdere reeks mesofiele experimenten, te zien in Figuur 11.6 – Gemiddelde biogasproductie met spreiding, reeks 1 mesofiele gisting, november 2013 is de verzuurde variant ook ingezet. Deze vertoonde in die experimentenreeks geen significante verbetering ten opzichte van de referentie. Doordat die experimenten geplaagd zijn geweest door storingen en meetfouten kunnen die resultaten echter hoogstens gezien worden als indicatief. De experimenten waarvan de resultaten getoond zijn in Figuur 11.9 en Figuur 11.10 hebben geen storingen ondervonden, waardoor deze resultaten als betrouwbaarder worden beschouwd.

Als extra experiment is ook uitgegist slib van rwzi Garmerwolde behandeld met de venturi en is met een onbehandeld monster ter controle ingezet. In Figuur 11.10 valt te zien dat het behandelde uitgegist slib biogas blijft produceren, terwijl het gewone gistingsslib eerst 18 dagen nagenoeg geen productie laat zien. Wanneer gekeken wordt naar het uiteindelijke gistingresultaat valt te zien in Figuur 11.9 dat het gewone gistingsslib 23 mL biogas heeft geproduceerd, ten opzichte van 121 mL voor het venturi-behandelde gistingsslib.

FIGUUR 11.10 GECORRIGEERDE GASPRODUCTIE, REEKS 2 MESOFIELE GISTING, DECEMBER 2013 – JANUARI 2014



#### 11.2.4 DROGE-STOFMETINGEN

Uit de grafieken die de biogas opbrengst per tijdseenheid weergeven, blijkt dat de spreiding tussen duplo metingen relatief groot kan zijn. Dit houdt in dat de resultaten uit de grafieken alleen als indicatie gezien kunnen worden. Om deze reden zijn additionele d.s. metingen gedaan. Hierin is gemeten wat het d.s. percentage voor gisting was en wat het d.s. percentage na gisting was door de indamprest bij 105 °C te bepalen. Deze resultaten staan weergegeven in Tabel 11.5 en Tabel 11.6. Hieruit valt op te maken dat de d.s. afbraak het hoogst was bij een behandeling van 1 uur bij 70 °C en bij een nabehandeling met 10 keer venturi destructie. Dit geldt zowel voor de mesofiele als thermofiele gistingproeven.

TABEL 11.5 DROGE STOFMETINGEN MESOFIELE GISTING BIJ VERSCHILLENDE VOORBEHANDELINGSTAPPEN

	d.s. – voor	d.s. – na	Afbraak
Onbehandeld	3,52%	2,64%	25,0%
1 uur 70°C	4,00%	2,09%	47,9%
1 uur 70°C + 3x venturi	3,82%	2,30%	39,9%
1 uur 70°C + 10x venturi	3,87%	2,35%	39,3%
4 uur 55°C	3,92%	2,43%	38,0%
4 uur 55°C + 3x venturi	3,56%	2,40%	32,5%
4 uur 55°C + 10x venturi	3,86%	2,46%	36,4%
10x venturi zonder temperatuurbehandeling	3,50%	2,06%	41,2%
Uitgegist + 10x venturi	3,51%	1,64%	53,4%

TABEL 11.6

DROGE STOFMETINGEN THERMOFIELE GISTING BIJ VERSCHILLENDE VOORBEHANDELINGSTAPPEN

	d.s. – voor	d.s. – na	Afbraak
Onbehandeld	3,47%	2,71%	22,0%
1 uur 70°C	3,90%	2,19%	43,8%
1 uur 70°C + 3x venturi	3,90%	2,30%	41,0%
1 uur 70°C + 10x venturi	3,90%	2,35%	39,6%
4 uur 55°C	3,85%	2,44%	36,7%
4 uur 55°C + 3x venturi	3,85%	2,49%	35,3%
4 uur 55°C + 10x venturi	3,85%	2,46%	36,0%

De resultaten van de droge-stofmetingen zijn gebaseerd op duplo-metingen. De schaalgrootte van de experimenten heeft echter als gevolg dat de grootte van het monster voor een droge-stofmeting beperkt is. Een droge-stofmeting wordt nauwkeuriger naarmate de hoeveelheid slib die ingedampt wordt groter is. Hierdoor kunnen enkele uitschieters ontstaan als het monster niet vrij van samengeklonterd slib is.

### 11.2.5 CENTRAAT

Het effect wat de onderzochte voorbehandelingsmethoden hebben op de samenstelling van het centraat is onderzocht op basis van het sCZV-gehalte, het totale gebonden stikstof (T-N) en het orthofosfaatgehalte (Ortho-P). De resultaten zijn verkregen door de monsters te centrifugeren en het centraat te filteren met een 45 micron filter. Deze staan weergegeven in 0 Centraat.

De metingen laten een toename in sCZV en gebonden stikstof zien voor alle behandelde varianten bij mesofiele gisting. Bij de thermofiele gisting is geen duidelijke toename waargenomen. Deze toename vertoont geen lineair verband met de intensiteit van de voorbehandeling, maar neemt wel toe naarmate er meer biogas geproduceerd is. Ortho-P concentraties lijken bij alle experimenten niet veranderd te zijn door de voorbehandeling.

### 11.3 CONCLUSIE/DISCUSSIE

Hoewel de eerste experimenten een grote spreiding laten zien in de biogasopbrengst is dit minder in latere experimenten, en valt dit binnen normale experimentele variatie<sup>8</sup>. In combinatie met de drogestofafbraak en sCZV-metingen kan er een beeld gevormd worden van het effect van de behandelingen. Het onbehandeld slib monster wordt steeds gebruikt als maatstaf voor de behandelde monsters.

Wanneer gekeken wordt naar de biogasopbrengst onder thermofiele gistingcondities is er geen duidelijk verband te zien tussen behandelde en onbehandelde monsters. Eén onbehandeld monster laat zelfs het beste gistingresultaat zien van de hele reeks. Dit kan verklaard worden door het feit dat er onder thermofiele omstandigheden bij eenzelfde verblijftijd een hogere afbraak bewerkstelligd wordt. De eventuele effecten van de onderzochte voorbehandelingsmethoden zijn in dat opzicht te zwak om effect te hebben onder thermofiele omstandigheden. Daarnaast valt op dat het verloop van de gistingen veel grilliger is dan onder mesofiele omstandigheden. Alle varianten laten namelijk geregeld afvlakkingen zien, waarna weer een stijging plaatsvindt in de biogasproductie. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er tijdelijke inhibitie plaatsvindt die weer overwonnen wordt. Het is ook goed mogelijk dat deze vorm van batch-experimenten minder geschikt zijn voor thermofiele omstandigheden.

8 ±8%, dit is ook in latere experimenten aan de RUG geconstateerd

Onder mesofiele omstandigheden toont het verzuurde monster, wat gedurende 4 uur op 55 °C is behandeld, de grootste toename in biogasproductie. In vergelijking met het onbehandelde monster geeft deze behandeling 28 – 38% meer biogas. De combinatie met de venturi-behandeling na de verzuring laat een afname in de biogasproductie zien van 6%. Deze afname is niet waargenomen in combinatie met gepasteuriseerd slib (1 uur op 70 °C): zowel gepasteuriseerd slib als de toevoeging van de venturi-behandeling geven nagenoeg dezelfde biogasopbrengst. Op basis van de sCZV-metingen werd echter verwacht een toename in biogasproductie te meten. Een mogelijke verklaring voor het uitblijven van deze toename en de afname bij de verzuurde variant is de toename van een oplosbare inerte fractie. [67] Waarschijnlijker nog is dat het slib belucht is door het rondpompen in de experimentele opstelling waardoor er aerobe afbraak heeft plaatsgevonden. Daarnaast is het mogelijk dat de biologische activiteit is afgenomen door de aantasting van actieve micro-organismen of intacte enzymen. Beide verklaringen kunnen een lagere biogasopbrengst geven, alhoewel laatstgenoemde vooral aan het begin van de gisting merkbaar zou zijn en zou afnemen over de tijd. Het is echter ook goed mogelijk dat het venturi-behandelde slib belucht is, waardoor vluchtig organisch materiaal geoxideerd kan zijn. Hierdoor kan de biogasproductie uiteindelijk tegenvallen. Het is niet verder onderzocht hoe groot dit effect is geweest.

Dit effect is echter niet waargenomen voor slib wat niet eerst een temperatuurbehandeling heeft ondergaan. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de aerobe omzettingssnelheid lager is geweest doordat er op lage temperatuur is gewerkt. Regulier slib wat met de venturi is behandeld toont een toename in biogasproductie van 21%. Gistingsslib van rwzi Garmerwolde bleek ook weer actief te worden na venturi behandeling, in tegenstelling tot het gistingsslib zonder behandeling wat pas na 18 dagen een teken van biogasproductie toonde.

Op basis van het centraat valt te verwachten dat zowel de sCZV-concentratie als het totaal gebonden stikstof toe zal nemen vanwege de voorbehandelingsmethoden. Hierbij is echter niet een direct verband gevonden tussen de afbraak, de intensiteit van de behandeling en de gemeten concentraties.

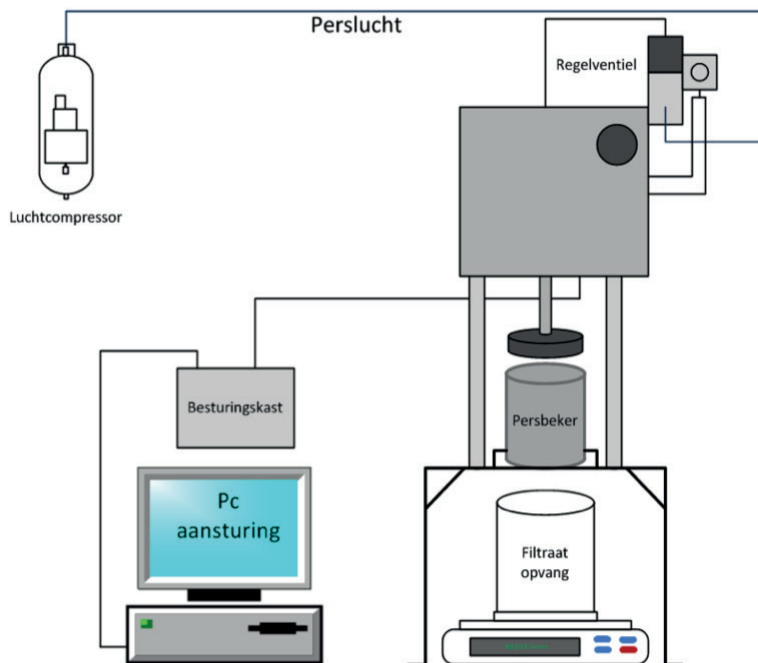
Uit de gehele reeks van experimenten komt naar voren dat er twee behandelingsstappen zijn die meeste additionele biogasopbrengst veroorzaken. De eerste is een voorbehandeling van 4 uur op 55 °C, de zogenaamde verzuringsvariant of thermofiele voorbehandeling (TVB). De tweede is een nabehandeling van gegist slib met 10 keer venturi destructie. Om het niet-vergiste slib voor TVB op een temperatuur van 55 °C te brengen moet energie toegevoegd worden, wat vervolgens teruggewonnen kan worden doordat de gisting minder warmte vereist. De venturi-destructie stap vereist een drukval van ongeveer 1 bar, en verwerkt een andere hoeveelheid slib dan de verzuringsvariant. De venturi-destructie behandelt namelijk slib wat voor een groot deel al omgezet is in biogas tijdens de gisting. Daar staat tegenover dat niet alleen secundair slib wordt behandeld, maar de gehele inhoud van de gistingstank. In de praktijk zal de venturi-destructie stap plaatsvinden door een circulatie van het slib uit de gisting over een venturi-buis, terug de gisting in. Van de twee opties, is naar verwachting de TVB variant de meest interessante doordat deze alleen energie gebruikt voor het opwarmen, wat vervolgens benut wordt door het opwarmen van de gisting.

# 12

## ONTWATERING

Met de vergiste samples zijn ontwateringsproeven uitgevoerd met een Mareco-pers. De gebruikte Mareco-pers bestaat uit een met slib gevulde cilinder waarbij een zuiger onder druk het slib tegen een filter perst. Deze druk (13 bar) wordt gegenereerd met perslucht. De persing wordt aangestuurd door een computer. Hiermee kan ook de drukopbouw per tijdseenheid – de perscurve – gestuurd worden.

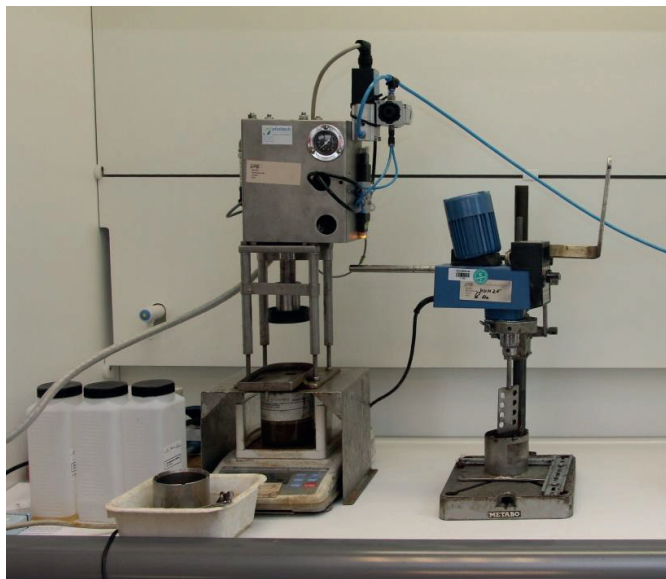
FIGUUR 12.1 MARECO-PERS OPSTELLING SCHEMATISCH



De werking van de Mareco-pers is vergelijkbaar met een membraanfilterpers/zeefbandpers door de wijze waarop de druk op de koek gezet wordt. Het rendement wordt gemeten door het drogestofgehalte van de verkregen slibkoek te bepalen, en door het wegen van het filtraatwater. De labopstelling is weergegeven in Figuur 12.2.

FIGUUR 12.2

LABOPSTELLING MARECO-PERS



Een van de eigenschappen van de Mareco pers is dat het ontwateringsrendement sterk afhangt van de dikte van de koek. Bij een dikkere filterkoek is de drukgradiënt over de koek lager, waardoor er een lager ontwateringsresultaat wordt behaald. Bij een persing loopt de druk op tot 13 bar. Wanneer er een koek van 2 cm dikte wordt geproduceerd, is er een drukval van  $13/2 = 6,5$  bar per cm over de koek. Wanneer er dus een koek van 1 cm wordt geproduceerd, is er een drukval van  $13/1 = 13$  bar over de koek. Omdat er bij een dunnere koek een hogere drukval per cm is, worden bij dunnere koeken betere ontwateringsresultaten behaald. Hierbij is het gewicht van de koek direct gerelateerd aan de dikte van de koek, omdat de koeken van de Mareco pers altijd dezelfde diameter hebben.

Om resultaten met elkaar te kunnen vergelijken, is tijdens de ontwateringsproeven altijd 150 mL slib met 1,5% d.s. gebruikt. Om dit d.s. gehalte te behalen, zijn gistingssamples verdund met demiwater.

## 12.1 RESULTATEN ONTWATERING

De resultaten van de verkennende ontwateringsproeven staan weergegeven in de onderstaande tabellen.

TABEL 12.1

ONTWATERINGRESULTATEN PROEVEN MESOFIELE GISTING

	Reeks 1		Reeks 2	
	FeCl <sub>3</sub> (g/kg d.s.)	PE (g/kg d.s.)	FeCl <sub>3</sub> (g/kg d.s.)	PE (g/kg d.s.)
	65	6,5	65	8
	d.s. voor	d.s. na	d.s. voor	d.s. na
Onbehandeld	1,5%	24,3%	1,5%	24,3%
1 uur 70°C		22,5%		24,7%
1 uur 70°C + 3x venturi		21,5%		24,7%
1 uur 70°C + 10x venturi		22,0%		24,6%
4 uur 55°C		23,2%		24,7%
4 uur 55°C + 3x venturi		22,9%		24,7%
4 uur 55°C + 10x venturi		22,9%		24,9%
10x venturi		22,2%		24,4%
Uitgegist + 10x venturi		22,5%		24,7%



TABEL 12.2 ONTWATERINGSRESULTATEN PROEVEN THERMOFIELE GISTING

	Reeks 1		Reeks 2	
	FeCl <sub>3</sub> (g/kg d.s.)	PE (g/kg d.s.)	FeCl <sub>3</sub> (g/kg d.s.)	PE (g/kg d.s.)
	65	6,5	65	8
	d.s. voor	d.s. na	d.s. voor	d.s. na
Onbehandeld	1,5%	23,9%	1,5%	24,3%
1 uur 70°C		23,0%		24,7%
1 uur 70°C + 3x venturi		22,4%		24,9%
1 uur 70°C + 10x venturi		22,8%		24,8%
4 uur 55°C		22,1%		24,7%
4 uur 55°C + 3x venturi		22,1%		24,7%
4 uur 55°C + 10x venturi		21,8%		24,7%

## 12.2 CONCLUSIE/DISCUSSIE

Tabel 12.1 geven ontwateringsresultaten weer van mesofiel vergistte samples. Voor de eerste reeks proeven zijn FeCl<sub>3</sub> en PE doseringen aangehouden in overeenstemming met de praktijk-situatie in Garmerwolde. Hierbij is te zien dat zowel voorbehandelde samples als het nabehandelde sample een reductie in d.s. na mechanische ontwatering laten zien. Echter, de tweede reeks proeven uit Tabel 12.1 laat verbeterde ontwateringsresultaten zien. Dit komt doordat de PE dosering verhoogd is van 6,5 naar 8 g/kg d.s. In de praktijk zal dus naar verwachting een toename in PE verbruik optreden bij mechanische ontwatering wanneer gekozen wordt voor een voorbehandeling of nabehandeling van slib.

Tabel 12.2 geven ontwateringsresultaten weer van thermofiel vergistte samples. Ook hier geldt dat voor de eerste reeks proeven, het d.s. gehalte na mechanische ontwatering omlaag gaat bij voorbehandeling en nabehandeling van slib. Ook hier kan dit tegen gegaan worden door het verhogen van de PE dosering naar 8 g/kg d.s. slib.

Voor alle ontwateringsresultaten geldt dat er met hetzelfde type PE gewerkt is. Doordat het slib voorbehandeld is, is het echter goed mogelijk dat een ander type PE een beter ontwateringsresultaat vertoont. Dit is echter niet verder onderzocht en zal bekeken moeten worden als de voorbehandelingsvarianten doorontwikkeld worden.

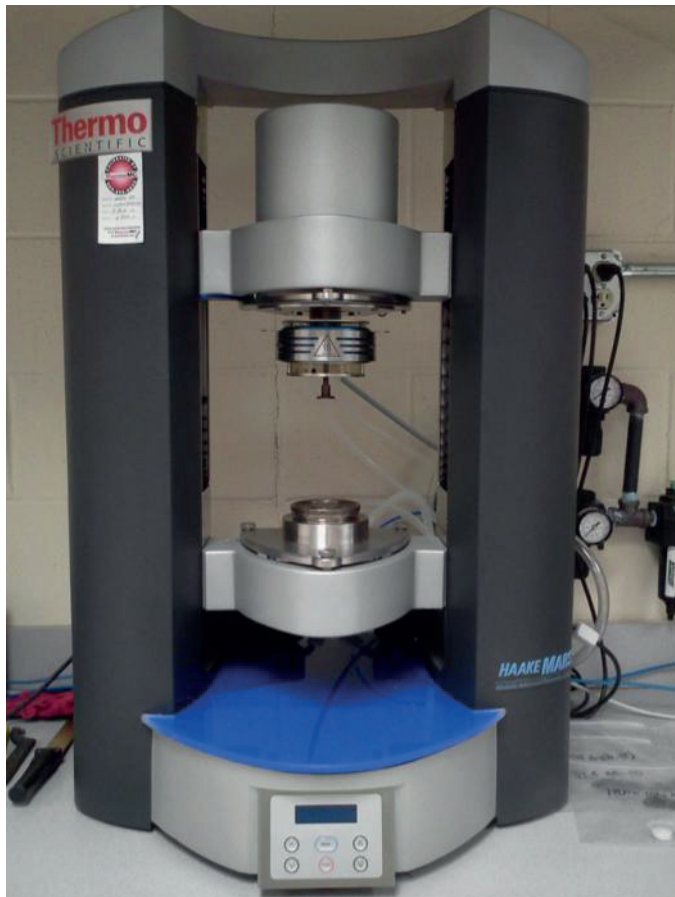
# 13

## VISCOSITEIT

Voor het verpompen van slib speelt het vloeigedrag een belangrijke rol. Deze rol wordt significanter naarmate het droge stofgehalte toeneemt en/of de pijpdiameter kleiner wordt. Het is belangrijk om een uitspraak te kunnen doen over dit vloeigedrag zowel voor proeven met de venturi op labschaal, als het vertalen van deze resultaten naar de praktijk. Door middel van metingen aan de afschuifspanning en afschuifsnelheid van een vloeistof is het mogelijk de viscositeit te bepalen. De afschuifspanning geeft een mate van de weerstand van een vloeistof tegen een parallelle kracht, zoals het vloeien in een pijp en is een functie van de afschuifsnelheid, welke aangeeft hoe dit verandert met de snelheid. Er is gekeken naar het effect van droge stofgehalte en afschuifsnelheid op het vloeigedrag van slib, waarbij de temperatuur wordt gevarieerd tot maximaal de pasteurisatie temperatuur van 70 °C.

FIGUUR 13.1

THERMO SCIENTIFIC HAAKE MARS III RHEOMETER



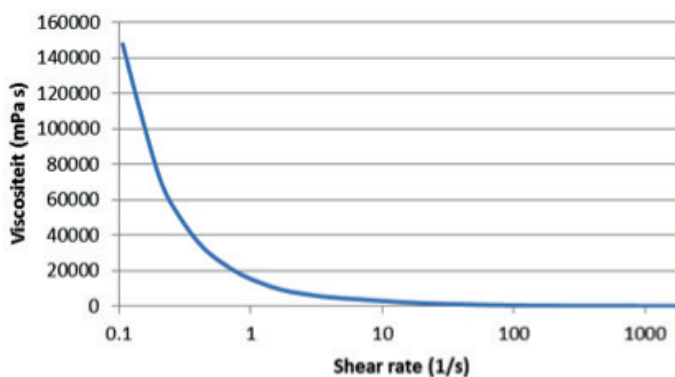
De afschuifspanning en de viscositeit als functie van afschuifsnelheid, percentage droge stof en temperatuur zijn gemeten op een Thermo Scientific Haake Mars III rheometer (Figuur 13.1). Twee milliliter slib monster werd aangebracht tussen de plaat en de cone. De afschuif-

snelheid werd in 30 stappen gevarieerd van 0.075 tot  $1750 \frac{1}{s}$ . De temperatuur werd in stappen van 10 graden gevarieerd van 20 tot 70°C. De afschuifspanning (T) en viscositeit ( $\eta$ ) werden bepaald door Rheowin software. Slib monsters met een droge stof gehalte van tussen de 2 en 10% werden gemeten. Het uitgangsmateriaal was secundair slib met een d.s. van 5,6%. De overige droge stof gehalten werden bereikt door het slib te verdunnen met demiwater of door het slib bij 40°C onder vacuüm in te dampen.

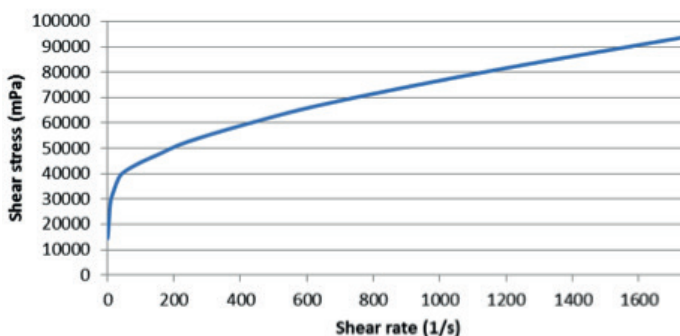
### 13.1 RESULTATEN

Alle gemeten slib monsters vertonen 'pseudoplastisch' gedrag. Bij een lage afschuifnelheid is de viscositeit hoog, bij een hogere afschuifnelheid gaat de viscositeit naar beneden. Met andere woorden, slib stroomt moeilijk vanuit stilstand, maar deze weerstand neemt af naarmate de snelheid hoger wordt. Figuur 13.2 en Figuur 13.3 geven een algemeen resultaat van de metingen.

FIGUUR 13.2 VISCOSITEIT ALS FUNCTIE VAN AFSCUIFSNELHEID (5,6%DS, 20°C)

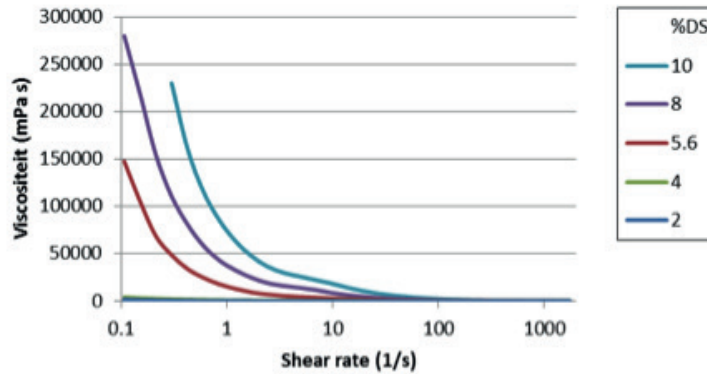


FIGUUR 13.3 AFSCUIFSPANNING ALS FUNCTIE VAN DE AFSCUIFSNELHEID (5,6%DS, 20°C)

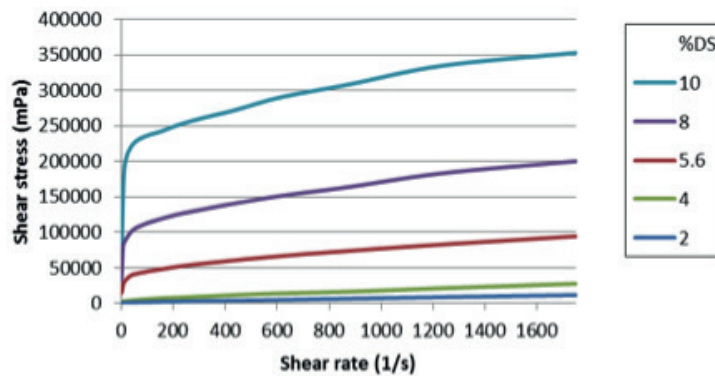


De viscositeit neemt toe naarmate het droge stof gehalte van het slib toeneemt. In Figuur 13.4 wordt de viscositeit als functie van de afschuifnelheid voor verschillende droge stof gehalten weergegeven. Figuur 13.5 laat de afschuifspanning zien als functie van de afschuifnelheid voor verschillende droge stof gehalten. Uit de resultaten valt op te maken dat de viscositeit van het slib exponentieel toeneemt met het droge stofgehalte terwijl dit afneemt naarmate de afschuifnelheid, en daarmee de vloeisnelheid van het slib, hoger wordt. De uitgesplitste resultaten zijn te vinden in 0 Viscositeit Data.

FIGUUR 13.4 VISCOSITEIT ALS FUNCTIE VAN % D.S. EN AFSCHUIFSNELHEID (20°C)



FIGUUR 13.5 AFSCHUIFSPANNING ALS FUNCTIE VAN % D.S. EN AFSCHUIFSNELHEID (20°C)



Uit de staafdiagrammen in de Appendix valt op te maken dat de viscositeit van slib afneemt naarmate de temperatuur toeneemt. Ook hierbij valt een exponentieel verband op te merken als functie van het droge stofgehalte, waarbij de viscositeit sneller afneemt bij slib met een lager droge stofgehalte. Bij een droge stofgehalte van 2 wt.% en 4 wt.% is deze afname minder goed waar te nemen dan bij hogere droge stofgehalten, mogelijk omdat de onderlinge verschillen kleiner zijn dan bij hogere droge stofgehalten. Voor de praktijk installatie moet daarom in hogere mate rekening gehouden worden met slib viscositeit wanneer d.s. gehalten hoger dan 4% ingezet worden. Dit kan gedaan worden door de leidingdiameter te vergroten, danwel een ander type pomp te kiezen wanneer het drogestofgehalte hoger is.

Voor het pasturi-destructie project valt te concluderen dat op labschaal hogere droge stofgehalten moeilijk te verpompen zullen zijn zonder krachtige pompen, maar dat zodra het slib in beweging is een vernauwing zoals die in een venturi waarschijnlijk niet voor problemen zal zorgen doordat de snelheid van het slib tegelijkertijd toeneemt. Daarnaast valt op te maken dat eventuele temperatuurbehandelingen vooraf een gunstig effect op het systeem kunnen hebben doordat bij een hogere temperatuur de viscositeit van het slib ook afneemt.

## 14

## REFERENTIES

- [1] 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.
- [2] J. Lu, „Optimization of anaerobic digestion of sewage sludge thermophilic anaerobic pre-treatment,” Lyngby, 2006.
- [3] 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.
- [4] S. Arrojo, Y. Benito en A. Martinez Tarifa, „A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation,” *Ultrasonics Sonochemistry*, pp. 903-908, 2008.
- [5] I. Lee en J.-I. Han, „The effects of waste-activated sludge pretreatment using hydrodynamic cavitation for methane production,” *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013.
- [6] A. F. Nieuwenhuijzen, E. Koornneef, P. J. Roeleveld, A. Visser, D. Berkhout, F. van den Berg-van Saparoea, V. Miska, E. van Voorthuizen en C. van Erp Taalman Kip, „Handboek Slibgisting,” Amersfoort, 2011.
- [7] W. M. Wiegant, M. Wurdemann, H. E. Kamphuis, J. van der Marel en W. F. Koopmans, „Slibketenstudie I,” STOWA, Utrecht, 2005.
- [8] P. Foladori, G. Andreottola en G. Ziglio, *Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants*, London: IWA Publishing, 2010.
- [9] 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.
- [10] D. Deublein en A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction*, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [11] Reynolds en Richards, *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, Boston, MA: PWS Publishing Company, 1996.
- [12] D. Bolzonella, C. Cavinato, F. Fatone, P. Pavan en F. Cecchi, „High rate mesophilic, thermophilic, and temperature phased anaerobic digestion of waste activated sludge - a pilot scale study,” *Waste Management*, vol. 32, pp. 1196-1201, 2012.
- [13] A. Hol, L. Luning, L. van Dijk en A. de Man, „Eerste full-scale continue thermische drukhydrolyse van slib operationeel op rwzi Venlo: efficiënt en effectief,” *H2O-online*, nr. 17 september 2014, 2014.
- [14] W. Noorderzijlvest, *Slibproductiecijfers 2012*, 2012.
- [15] A. v. Nieuwenhuijzen, „Biogasinventarisatie rwzi's verdieping en analyses,” Witteveen+Bos, Deventer, 2010.
- [16] M. J. Higgins, S. N. Murthy, Y.-C. Chen en N. Maas, „Factors affecting polymer demand,” in *Joint Residuals and Biosolids Management Conference*, 2005.

- [17] A. F. van Nieuwenhuijzen, E. Koornneef, P. J. Roeleveld, A. Visser, D. Berkhout, F. van den Berg van Saparoea, V. Miska, E. van Voorthuizen en C. van Erp Taalman Kip, „Handboek Slibgisting,” STOWA, Amersfoort, 2011.
- [18] L. Korving, „Trends in slibontwatering,” STOWA, Amersfoort, 2012.
- [19] 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.
- [20] J. H. Long en C. M. Bullard, „NC AWWA-WEA Public Documents Annual Conference Papers,” in *WAS pretreatment for enhanced volatile solids reduction and biogas production in anaerobic digestion - a process review*, 2011.
- [21] D. Whitlock, J. Sandino, J. Novak, B. Johnson en L. Fillmore, „Evaluation methodology framework for processes to reduce waste activated solids,” *Residuals and Biosolids*, pp. 620-656, 2010.
- [22] Siemens - Biogest, *Crown Process Presentation - Full Scale Results*, Siemens - Biogest, 2009.
- [23] „Enquete Polyminder,” 2012.
- [24] P. P. S. M.A. en W. B., „Benefits and drawbacks of thermal pre-hydrolysis for operational performance of wastewater treatment plants,” *Water Sci Technol.*, vol. 58, nr. 8, pp. 1457-53, 2008.
- [25] STOWA, „Verkenning thermische slibontsluiting, STOWA-rapport 2011-W03,” STOWA, Amersfoort, 2011.
- [26] D. Berkhof, E. Koornneef en H. Janus, „Thermische Slibontsluiting - Pilot-onderzoek naar de mogelijkheden en randvoorwaarden,” STOWA, Amersfoort, 2012.
- [27] CAMBI, *Productbrochure CAMBI*.
- [28] „Specificatie Cambi TDH voorbehandeling van secundair slib rwzi Den Bosch”.
- [29] Witteveen+Bos, *Referentieontwerp Energiefabriek Hengelo*, 2015.
- [30] Heijmans, *Referentieontwerp Energiefabriek Tilburg*, 2014.
- [31] C. Bougrier, J. P. Delgenès en H. Carrère, „Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion,” *Chemical Engineering Journal*, nr. 139, pp. 236-244, 2008.
- [32] C. Bougrier, J.-P. Delgenès en H. Carrère.
- [33] P. Bishnoi, „Effects of thermal hydrolysis pre-treatment on anaerobic digestion of sludge,” Blacksburg, VA, 2012.
- [34] M. Barjenbruch en O. Kopplow, „Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge,” *Advances in environmental research*, nr. 7, pp. 715-720, 2003.
- [35] M. Hiraoka, N. Takeda, S. Sakai en A. Yasuda, „Highly efficient anaerobic digestion with thermal pretreatment,” *Water science and technology*, nr. 17, pp. 529-539, 1984.
- [36] STOWA, „Voorbehandeling van surplus-slib met OpenCEL Technology, project 432667 (rapport in bewerking),” STOWA, Amersfoort, 2015.
- [37] GMB-Imtech, *Referentieontwerp Energiefabriek Apeldoorn*, 2013.
- [38] Y. Chen en A. Hashimoto, „Substrate Utilization Kinetic Model for Biological Treatment Processes,” *Biotechnology and Bioengineering*, vol. XII, pp. 2081-2095, 1980.
- [39] Nederlandse Waterschappen, „Enquete Polyminder,” 2012.
- [40] G. Tchobanglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi en F. Burton, *Metcalf&Eddy, Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*, 5th Ed., New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [41] STOWA, „Sharon-Anammox-Systemen - evaluatie van rejectiewaterbehandeling op slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk, STOWA-rapport 2008 18,” STOWA, Amersfoort, 2008.

- [42] W. Wiegant, „Voorspelling van de biogasproductie en de slibafbraak tijdens slibgisting,” *WT Afvalwater*, vol. 12, nr. Nr. 2, 2012.
- [43] C. F. Forster, „The rheological and physico-chemical characteristics of sewage sludges,” *Enzyme and Microbial Technology*, nr. 30, pp. 340-345, 2002.
- [44] N. Tixier, G. Guibaud en M. Baudu, „Determination of some rheological parameters for the characterization of activated sludge,” *Bioresource Technology*, nr. 90, pp. 215 - 220, 2003.
- [45] N. Ratkovich, W. Horn, F. P. Helmus, S. Rosenberger, W. Naessens, I. Nopens en T. R. Bentzen, „Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling,” *Water Research*, nr. 47, pp. 463-482, 2013.
- [46] X. D. Nguyen, „Development of the Venturi Cavitation System for Sludge Solubilization to Improve Anaerobic Digestibility,” 2007.
- [47] R. Borja, „Biogas Production,” in *Comprehensive Biotechnology*, 2nd Edition red., vol. 2, M. Moo-Young, Red., Amsterdam, Elsevier, 2011, pp. 785-798.
- [48] X. Liu, Z. Yan en Z.-B. Yue, „Biogas,” in *Comprehensive Biotechnology*, 2nd Edition red., vol. 3, M. Moo-Young, Red., Amsterdam, Elsevier, 2011, pp. 99-114.
- [49] R. Conrad, „Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments,” *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 28, nr. 3, pp. 193-202, March 1999.
- [50] E. Neyens, J. Baeyens, R. Dewil en B. De Heyder, „Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering,” *Journal of Hazardous Materials*, pp. 83-92, 2004.
- [51] N. Eshtiaghi, S. D. Yap, F. Markis, J.-C. Baudez and P. Slatter, “Clear model fluids to emulate the rheological properties of thickened digested sludge,” *Water Research*, pp. 3014-3022, 2012.
- [52] I.-S. Lee en B. E. Rittmann, „Effect of low solids retention time and focused pulsed pre-treatment on anaerobic digestion of waste activated sludge,” *Bioresource Technology*, nr. 102, pp. 2542-2548, 2011.
- [53] B. E. Abbassi, „Improvement of Anaerobic Sludge Digestion by Disintegration of Activated Sludge using Vacuum Process,” *Watery Quality Research Journal Canada*, vol. 38, nr. 3, pp. 515-526, 2003.
- [54] D. C. Berkhof, „Verkenning Thermische Slibontsluiting,” 2011.
- [55] A. de Man en J. Pereboom, „Introductie van Thermische Druk Hydrolyse in Venlo; een kosten-efficiënte aanpak,” in *Nationale Watertechnologieweek*, Gorinchem, 2015.
- [56] A. de Man, *per sms*, 12 februari 2015.
- [57] Sustec, „Sustec - Technologie,” [Online]. Available: <http://www.sustec.nl/29.html>. [Geopend 20 May 2013].
- [58] B. Rabinowitz en R. Stephenson, „Effect of MicroSludge on anaerobic digester performance and residuals dewatering at LA County’s JWPCP,” Water Environment Foundation, 2006.
- [59] S. L. Shepherd, „Rapid non-equilibrium decompression of microorganism-containing waste streams”. USA Patent 7527734, 5 May 2009.
- [60] OpenCel, [Online]. Available: <http://www.opencel.com/userfiles/files/OpenCEL%20Technology%20description.pdf>. [Geopend 21 May 2013].
- [61] M. Carlsson, A. Lagerkvist en F. Morgan-Sagastume, „The effects of substrate pre-treatments on anaerobic digestion systems - A review,” *Waste Management*, nr. 32, pp. 1634-1650, 2012.



- [62] 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.
- [63] P. Phothilangka, *Sludge disintegration technologies for improved biogas yield*, Innsbruck, 2008.
- [64] P. Vergine, J. Záborská en R. Canziani, „Low temperature microwave and conventional heating pre-treatments to improve sludge anaerobic degradability,” *Water Science & Technology*, November 2013.
- [65] I. Ferrer, S. Ponsá, F. Vázquez en X. Font, „Increasing biogas production by thermal (70 C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 42, nr. 2, pp. 186-192, 2008.
- [66] T. W. Bakker, „VibroCav - Hydrodynamic Vibration and Cavitation technology,” Delft, 2012.
- [67] J. H. Long en C. M. Bullard, „WAS Pretreatment For Enhanced Volatile Solids Reduction and Biogas Production in Anaerobic Digestion - A Process Review”.
- [68] R. Cord-Ruwisch, T. I. Mericz, C.-Y. Hoh en G. E. Strong, „Dissolved Hydrogen Concentration as an On-Line Control Parameter for the Automated Operation and Optimization of Anaerobic Digesters,” *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 56, nr. 6, pp. 626 - 634, 20 December 1997.
- [69] 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.
- [70] P. R. Gogate en A. M. Kabadi, „A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology,” *Biochemical Engineering Journal*, pp. 60-72, October 2009.
- [71] P. R. Gogate en A. B. Pandit, „A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 12, nr. 1-2, pp. 21-27, January 2005.
- [72] S. Zhang, P. Zhang, G. Zhang, J. Fan en Y. Zhang, „Enhancement of anaerobic sludge digestion by high-pressure homogenization,” *Bioresource Technology*, pp. 496-501, May 2012.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] H. Choi, S.-W. Jeong en Y.-j. Chung, „Enhanced anaerobic gas production of waste activated sludge pretreated by pulse power technique,” *Bioresource Technology*, nr. 97, pp. 198-203, 2006.
- [78] D. C. Devlin, S. R. R. Esteves, R. M. Dinsdale en A. J. Guwy, „The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge,” *Bioresource Technology*, nr. 102, pp. 4076-4082, 2011.



- [79] Y. Chen, S. Jiang, H. Yuan, Q. Zhou en G. Gu, „Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs,” *Water Research*, nr. 41, pp. 683-689, 2007.
- [80] K. Luo, Q. Ye, Q. Yang, X.-m. Li, H.-b. Chen, X. Liu en G.-m. Zeng, „Hydrolysis and acidification of waste-activated sludge in the presence of biosurfactant rhamnolipid-effect of pH,” *Applied Microbiological Biotechnology*, August 2012.
- [81] Y. Zhang, P. Zhang, G. Zhang, W. Ma, H. Wu en B. Ma, „Sewage sludge disintegration by combined treatment of alkaline+high pressure homogenization,” *Bioresource Technology*, nr. 123, pp. 514-519, 2012.
- [82] BIOGEST/SIEMENS, *Crown Disintegration System Video*.
- [83] R. T. Haug, D. C. Stuckely, J. M. Gossett en P. L. McCarty, „Effects of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges,” *Journal (Water pollution control federation)*, nr. 50, pp. 73-85, 1978.
- [84] STOWA, „Trends in slibontwatering, STOWA-rapport 2012-46,” STOWA, Amersfoort, 2012.

**APPENDIX A**

# UITGANGSPUNTEN TDH

Parameter	Zonder voorbehandeling		TDH voorbehandeling				Eenheid
	Kental	Range	Kental TDH	Range	Kental Cambi	Kental Sustec	
Drogestofgehalte PS (na voorindlikking)		4% 2-10% STOWA2011-16	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	%ds
Drogestofgehalte SS (na voorindlikking)		6% 1,5-8,0% STOWA2011-16	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	%ds
Droge stofgehalte naar gisting		4% 3-6%	9%	7-10%	9%	9,10%	%ds
<i>Afbraak gisting</i>		STOWA2011-16: 3-8%			Opgave Cambi CAMBI Hengelo: 8,8% (14,3% alleen surplusslib) CAMBI Den Bosch: 11,1 (14,9% alleen surplusslib)	Apeldoorn	
Organische stofgehalte primair silb		75%	75%	60-80%	75%	75%	% van ds
CZV-gehalte van organische stof primair silb		1,8	1,8	1,4-2,8	1,8	1,8	1,8 kg CZV/kg ODS
ods-afbraak primair silb		Wiegant 57,9%	Wiegant 57,9%	STOWA2005-26 55-65%	57,9%	57,9%	
Organische stofgehalte secundair silb		Chen-Hashimoto: SRT 20 dagen, 37°C 70%	Chen- Hashimoto: SRT 20 dagen, 37°C 70%	70-85%	CAMBI Hengelo: 55%	70%	70% van ds
CZV-gehalte van organische stof secundair silb		1,42		STOWA2011-16: 50-85	1,42	1,42	1,42 kg CZV/kg ODS
		Wiegant					

Kental	Zonder voorbehandeling			TDH voorbehandeling			Parameter
	Range	Kental TDH	Range	Kental Cambi	Kental Sustec	Eenheid	
ods-afbraak secundair slib	33,8%	25-35%	50%	45 - 53%	52%	47%	
	Chen-Hashimoto: SRT 20 dagen, 37°C				Opgave Cambi: opgave tender Den Bosch, tender Hengelo; theoretisch mogelijk maar wel hoog (relatief meer dan 50% extra afbraak)		
					CAMBI Hengelo: 50% Zit: 75-80% toename (33,8*1,75 = 59%)	H2O-artikel: 40% OS- afbraak (tabel 3) of 35% (pagina 10)	
Relatieve toename afbraak SS	n.v.t.	n.v.t.	47,9%	Bougrier (abschaal): 60%	53,8%	t.o.v. referentie	
Gasproductie	0,35	0,35	0,35	Bougrier (abschaal): 80%	Zit: 75-80%	0,35 m3 CH4/kg CZV verw.	
	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	
Gasproductie	65%	65%	65%	65%	65%	65% CH4/m3 biogas	
	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	standaardwaarde	
Gasproductie	900	850-1.000	900	850-1.000	900	900	900
		STOWA2011-16: 700-1100 /kg ods afgebroken					
Gasproductie theoretisch max.	1.080	n.v.t.	1.080	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	900 secundair slib
		o.b.v. 2,0 kg CZV/kg ods * 350 l CH4/kg CZV / 65% CH4					
Opbrengst WKK			40%				Elektriteit
Opbrengst WKK			15%				Thermische energie hoog
Opbrengst WKK			25%				Thermische energie laag

Zonder voorbehandeling		TDH voorbehandeling		Kental Sustec		Eenheid	Parameter
Kental	Range	Kental TDH	Range	Kental Cambi	Kental Sustec		
<i>TDH installatie</i>							
Droge stof gehalte ingaand	n.v.t.	n.v.t.	12%	9-16,5% (H2O-artikel)	Opgave Cambi	16%	10% DS
Energieverbruik installatie TDH + voordrinking	n.v.t.		45	42,5 - 50	H2O-artikel: 16% CAMBI Hengelo: 12-16,5-18% (min-gem-max)	DO Apeldoorn	
Stoomverbruik	n.v.t.	n.v.t.	150	120 - 170	688	47,5	45,3 kWh/ton DS
Stoomverbruik	n.v.t.	n.v.t.	700	650-800	Opgave Cambi	H2O-artikel: 15+52 = 67	120 kg/ton slib
Stoomproductie			0,75		CAMBI Hengelo: 155 kg/m3 slib (170 - 1,6*Tslib)	DO Apeldoorn	
Energie stoomproductie			550	500 - 600			
<i>Slibontwatering</i>							
Droge stofgehalte (zeefbandpers)	23	20-25%	29%	28-31%	Opgave Cambi	30%	30%
Drogestofgehalte (centrifuge)					CAMBI: 30-33% (decanter met 10-13 g PE/kg ds)	H2O artikel	
PE verbruik zeefbandpers	8,5	8-9	10,2	9-12			10,2 g actief/kg DS
PE verbruik centrifuge	14	13-15					
PE kosten	€					4,72	kg actief PE
Energieverbruik zeefbandpers					STOWA2014-08: 3,3-4,4 EUR/kg actief PE exclusief BTW		50 kWh/ton DS
Energieverbruik centrifuge					STOWA2012-46: 87 kWh/ton ds		120 kWh/ton DS
Realisatiekosten globaal (exclusief utiliteiten, inclusief verwarming en stoomsysteem)					STOWA2012-46: 122 kWh/ton ds		
Bouwkosten TDH			120.000	0	Referentieontwerp	Referentieontwerp	EUR/[t/ds/d]
Bouwkosten MI voordrinking			31.000	0	€	€	EUR/[t/ds/d]
					€	€	EUR/[t/ds/d]

Geraadpleegde bronnen									
H2O-artikel	Hol, A., Luning, L., Van Dijk, L. en De Man, A., Eerste full scale continue thermische drukhydrolyse van slib operatibneel op rwzi Venlo: efficiënt en effectief, H2O-online 17 september 2014								
STOWA2011-16	Handboek silbgisting								
Chen Hashimoto	Chen Y R & A G Hashimoto 1980. Substrate utilization model for biological treatment systems. Biotechnology & Bioengineering 22: 2081-2095.								
Wiegant	W. Wiegant 2012. Voorspelling van de biogasproductie en de silafbraak tijdens silbgisting. WT Afvalwater 12, nr. 2, april 2012								
STOWA2005-26	Silbketenstudie (I)								
Zirl	Phothlangka P, M A Schoen & B Wett Benefits and drawbacks of thermal pre-hydrolysis for operational performance of wastewater treatment plants								
STOWA2012-46	Trends in silbontwatering								
STOWA2014-08	Efficiënte polymeergebruik silbontwatering								
Bougrter	Bougrter, C., Delgenès, J.-P., Carrère, H., Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield								

APPENDIX B

# CHEN-HASHIMOTOMODEL

Witteveen Bos		Calculation of biogasproduction from sewage sludge				Signature			
Input and output values									
project:	Pasturidestructie			prepared by	Y. Severin MSc	<table border="1"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>			
client:	STOWA			checked by	A.B. Veldhoen MSc				
projectcode:	GN210-1			approved by	A.B. Veldhoen MSc				
date:	22 October 2014			revision	1				
<b>INPUT</b>									
<b>Process input</b>				<b>Model input</b>					
Total DS in	kg/d	primary sludge	secondary sludge	total	Minimal SRT	d	2.85		
Chemical sludge	kg/d	6.570	6.555	13.125	ft mesophilic	-	1.08		
DS excl. chem. sludge	kg/d	6.570	6.555	13.125	ft thermophilic	-	1.35		
ash-content excl. chem sludge	%	25	30	27	Sludge retention time	d	20		
DS content	%	4.0	6.0	4.8	Temperature	C	37		
Sludge volume	m3/d	164	109	274	TPH	Chose: Yes/No	No		
Organic material in	kg/d	4.928	4.589	9.516	TPH effect on ODS reduction	%	0		
Minimum SRT (T)	d	2.18	2.18		Biogas retention time	h	3		
Maximum reductie ODS	%	65	40	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	%	65							
Caloric value methane	MJ/m3	36							
Efficient utilization biogas	%	95%							
Electrical efficiency CHP	%	40%							
Thermal efficiency CHP	%	40%							
Intern biogas consumption	Nm3/d	0							
Intern elektrical consumption	kWh/year	0							
<b>OUTPUT</b>									
<b>Process output</b>				<b>Dimensions</b>					
total ODS out	kg/d	primary sludge	secondary sludge	total	Digester volume	m3	5.470		
DS OUT	kg/d	2.074	3.038	5.111	Biogas holder	m3	494		
DS reduction	%	3.716	5.004	8.720	CHP	kWe	404		
Methane production	Nm3/d	43.4	23.7	33.6					
Biogas production	Nm3/d	1.798	771	2.569					
biogas / kg degraded ODS	L/kg ods degraded	2.766	1.186	3.952					
biogas/kg total supplied DS	L/kg ds supplied	969	765	897					
Net methane production	Nm3/d	421	181	301					
Net biogas production	Nm3/d			2.569					
Caloric potention	MJ/day			3.952					
Electricity production CHP	MJ/day			87.600					
	MJ/year			35.000					
	kWh/day			12.775.000					
Net electricity production	kWh/year			9.700					
Thermal production CHP	MJ/day			3.548.600					
	MJ/year			35.000					
	kWh/day			12.775.000					
	kWh/year			9.700					
	kWh/year			3.548.000					

## APPENDIX C

## WARMTEBALANS

slibstroom	debiet	referentie temperatuur	venturi temperatuur	TVB temperatuur	TDH temperatuur		
	m <sup>3</sup> /d	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
<b>zomersituatie</b>							
primair	164	20	20	20	20		
secundair	109	20	20	20	55		63
totaal naar gisting	274	20	20	20	34		37
<b>wintersituatie</b>							
primair	164	10	10	10	10		
secundair	109	10	10	10	55		78
totaal naar gisting	274	10	10	10	28		37
Temperatuur slibgistingstank	[°C]	37	37	37	37		
Soortelijke massa slib	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.000	1.000	1.000	1.000		
Warmtecapaciteit slib	[kJ/kg.K]	4,2	4,2	4,2	4,2		
Slibdebiet totaal	[m <sup>3</sup> /s]	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032		
Slibdebiet TVB	[m <sup>3</sup> /s]			0,0013			
Soortelijke massa water	[kg/m <sup>3</sup> ]						1000
warmtebehoefte TVB zomer	kW	n.v.t.	n.v.t.		186		n.v.t.
warmtebehoefte SGT zomer	kW		226	226	40		0
warmtebehoefte TVB winter	kW	n.v.t.	n.v.t.		239		n.v.t.
warmtebehoefte SGT winter	kW		359	359	120		0
biogasproductie	Nm <sup>3</sup> /d	4.000	4.400	4.400	4.500		
biogas naar WKK	Nm <sup>3</sup> /d	4.000	4.400	4.400	4.500		
warmteproductie voor SGT	kW	432	475	475	486		
warmteoverschot zomer	kW	206	249	249	249		486
warmteoverschot winter	kW	73	116	116	116		485
<b>TDH</b>							
stoombehoefte	kg/d						6.555
stoomopwekking uit rookgassen	[kg stoom/m <sup>3</sup> biogas]						2,32 STOWA thermofiele slibgisting
stoomopwekking uit biogas (direct)	[kg stoom/m <sup>3</sup> biogas]						7,5 STOWA thermofiele slibgisting
stoomopwekking uit aardgas (direct)	[kg stoom/m <sup>3</sup> aardgas]						11,4 STOWA thermofiele slibgisting
biogas beschikbaar	Nm <sup>3</sup> /d						4.500
biogas naar WKK	Nm <sup>3</sup> /d						4.500
biogas naar biogasketel	Nm <sup>3</sup> /d						0
stoomproductie uit WKK	kg/d						10.440
stoomproductie uit biogasketel	kg/d						0
totale stoomproductie	kg/d						10.440
overschot stoom	kg/d						3.885



## APPENDIX D

## DROGESTOFBALANS

onderwerp:	business case		
project:	Pasturidestructie		
projectcode:	GN210-1		
opgesteld door:	Anna Veldhoen	datum:	06-11-2014
controle door:	Arjen van Nieuwenhuijzen	datum:	28-01-2015
laatste aanpassing:	Anna Veldhoen	datum:	17-08-2015
versie:	IDC08		

Technologische uitwerking standaard-rwzi (massabalans)

## Legenda

Blauw	Door opdrachtgever opgegeven waarde
Rood	Ingevoerde / aangenomen (proces-)parameter
Zwart	Berekende waarde

Parameter	eenheid	waarde	waarde	waarde	waarde
Slibproductie		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH

## primair slib uit voorbezinktank

gemiddelde slibproductie	kg ds/d	7.300	7.300	7.300	7.300
slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	429	429	429	429
drogestofgehalte	ds%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%
organisch stofgehalte	ods%	75%	75%	75%	75%

## secundair slib uit nabezinktank

gemiddelde slibproductie	kg ds/d	6.900	6.900	6.900	6.900
slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	863	863	863	863
drogestofgehalte	ds%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%
organisch stofgehalte	ods%	70%	70%	70%	70%

Voorindikking		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
---------------	--	------------	---------	-----------------------------	-----

## primair slib

afscheiding	%	90%	90%	90%	90%
ds gehalte na indikken	ds%	4%	4%	4%	4%
ds vracht na indikken	kg ds/d	6.570	6.570	6.570	6.570
slibafvoer na indikken	m <sup>3</sup> /d	164	164	164	164

## secundair slib

afscheiding	%	95%	95%	95%	95%
ds gehalte na indikken	ds%	6%	6%	6%	12%
ds vracht na indikken	kg ds/d	6.555	6.555	6.555	6.555
slibafvoer na indikken	m <sup>3</sup> /d	109	109	109	55

**Polymeerverbruik**

totale aanvoer	kgds/d	6.900	6.900	6.900	6.900
specifiek polymeerverbruik	g PE/kg ds	4,00	4,00	4,00	6,00
polymeerverbruik	kg/d	28	28	28	41
energieverbruik voorindikking	MWh/j	11	11	11	16
extra energieverbruik indikking	MWh/j	-	-	-	5

Parameter	eenheid	waarde	waarde	waarde	waarde
Slibaanvoer thermofiele voorbehandeling		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH

**Totale slibtoevoer**

toevoer secundair slib	m <sup>3</sup> /d	nvt	nvt	109	nvt
ds vracht	kgds/d	nvt	nvt	6.555	nvt
ds gehalte	ds%	nvt	nvt	6,0%	nvt

**Tank**

verblijftijd	uur	nvt	nvt	4,00	nvt
vullingsraad	%	nvt	nvt	80%	nvt
Tankvolume	m <sup>3</sup>	nvt	nvt	18	nvt

Stoomproductie TDH		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
--------------------	--	------------	---------	-----------------------------	-----

aanvoer secundair slib	m <sup>3</sup> /d	nvt	nvt	nvt	55
toevoeging stroom (watervolume)	m <sup>3</sup> /d	nvt	nvt	nvt	7
secundair slib naar slibgisting	m <sup>3</sup> /d	nvt	nvt	nvt	61
	m <sup>3</sup> /h	nvt	nvt	nvt	2,5

Slibaanvoer gistingsinstallatie		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
---------------------------------	--	------------	---------	-----------------------------	-----

**primair slib**

droge stof vracht	kg ds/d	6.570	6.570	6.570	6.570
organisch drogestofvracht	kg ods/dag	4.928	4.928	4.928	4.928
debiet	m <sup>3</sup> /d	164	164	164	164
drogestofgehalte	%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%
verhouding primair/totaal	%	50%			

**secundair slib**

droge stof vracht	kg ds/d	6.555	6.555	6.555	6.555
organisch drogestofvracht	kg ods/dag	4.589	4.589	4.589	4.589
debiet	m <sup>3</sup> /d	109	109	109	61
drogestofgehalte	%	6,0%	6,0%	6,0%	10,7%
verhouding secundair/totaal	%	50%			

**Totaal slibaanvoer (excl. piekfactor)**

droge stof vracht	kg ds/dag	13.125	13.125	13.125	13.125
debiet	m <sup>3</sup> /dag	274	274	274	225
ds gehalte	%ds	4,8%	4,8%	4,8%	5,8%
os gehalte	%os	72,5%	72,5%	72,5%	72,5%
ods vracht	kg os/dag	9.516	9.516	9.516	9.516
inerte vracht	kg as/dag	3.609	3.609	3.609	3.609

Slibgistingsinstallatie		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
<b>Volume</b>					
vullingsraad	%	80%	80%	80%	80%
tankvolume aanwezig	m <sup>3</sup>	6.900	6.900	6.900	6.900
ontwerpverblijftijd	d	20,0	20,0	20,0	20,0
werkelijke verblijftijd	d	20,2	20,2	20,2	24,5
aantal tanks	#	2,00	2,00	2,00	2,00
volume per tank	m <sup>3</sup>	3.450	3.450	3.450	3.450
<b>Afmetingen</b>					
totale hoogte tanks	m	14,00	14,00	14,00	14,00
diameter tanks	m	17,70	17,70	17,70	17,70
verhouding hoogte/diameter	-	0,79	0,79	0,79	0,79
check volume	m <sup>3</sup>	3.445	3.445	3.445	3.445
check gistingsvolume	m <sup>3</sup>	2.760	2.760	2.760	2.760
gistingsvolume nodig		2.735	2.735	2.735	2.254
temperatuur	°C	37,00	37,00	37,00	37,00
<b>Slibrecirculatie</b>					
Aantal keer recirculeren door venturi	-	-	10	-	-
aandeel van ingaand debiet gerecirculeerd	%	676%	1000%	676%	671%
totaal omvang recirculatiestroom	m <sup>3</sup> /u	77	114	77	63
Parameter	eenheid	referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
<b>Toename ods-afbraak in varianten</b>					
toename ods-afbraak primair slib	%	nvt	0,0%	0,0%	0,0%
toename ods-afbraak secundair slib	%	nvt	36,8%	39,5%	47,9%
extra ods-afbraak totaal	%	nvt	13,0%	13,9%	16,9%
<b>Afbraak gisting</b>					
ods-afbraak primair slib	%	57,9%	57,9%	57,9%	57,9%
ods-afbraak secundair slib	%	33,8%	46,3%	47,1%	50,0%
ods-afbraak totaal	%	46,3%	52,3%	52,7%	54,1%
ds-afbraak primair slib	%	43,4%	43,4%	43,4%	43,4%
ds-afbraak secundair slib	%	23,7%	32,4%	33,0%	35,0%
ds-afbraak totaal	%	33,6%	37,9%	38,2%	39,2%
ods-afbraak primair slib	kg/d	2.854	2.854	2.854	2.854
ods-afbraak secundair slib	kg/d	1.551	2.122	2.163	2.294
ods-afbraak totaal	kg/d	4.405	4.976	5.017	5.147
<b>Na gisting</b>					
ds-vracht primair slib	kg ds/d	3.716	3.716	3.716	3.716
ds-vracht secundair slib	kg ds/d	5.004	4.433	4.392	4.261
ds-vracht totaal	kg ds/d	8.720	8.149	8.108	7.978
organisch drogestofvracht	kg ods/dag	5.111	4.540	4.499	4.369

inerte vracht	kg as/dag	3.609	3.609	3.609	3.609
uitgegist slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	274	274	274	225
drogestofgehalte	%	3,2%	3,0%	3,0%	3,5%
organisch drogestofpercentage	%	58,6%	55,7%	55,5%	54,8%

Slibontwatering zeefbandpers		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
------------------------------	--	------------	---------	-----------------------------	-----

**Aanvoer**

drogestofvracht	kg ds/dag	8.720	8.149	8.108	7.978
slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	274	274	274	225
afscheiding	%	98%	98%	98%	98%
drogestofgehalte na ontwateren	%	23%	25%	25%	29%
toename polymeerverbruik	%	-	20%	20%	20%
specifiek polymeerverbruik	g PE/kg ds	16,00	19,20	19,20	19,20
polymeerverbruik zeefbandpers	kg/d	140	156	156	153
energieverbruik zeefbandpers	MWh/j	382	357	355	349
verschil energieverbruik zeefbandpers	MWh/j	223	198	196	190

**Afvoer naar slibsilos**

drogestofvracht	kg ds/dag	8.546	7.986	7.946	7.818
slibdebiet	m <sup>3</sup> /d	37	32	32	27

**Reductie slibafzet**

slibafzet in referentie	m <sup>3</sup> /d	nvt	37	37	37
slibafzet in variant	m <sup>3</sup> /d	nvt	32	32	27
reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /d	nvt	5	5	10
reductie slibafzet	m <sup>3</sup> /jaar	nvt	1.902	1.961	3.722

**Rejectiewater**

drogestofvracht	kg ds/dag	174,41	162,98	162,16	159,55
debiet	m <sup>3</sup> /d	236	242	242	198
drogestofgehalte	%	0,00	0,00	0,00	0,00
totaal ds afgebroken	kg ds/dag	4.405	4.976	5.017	5.147
N-percentage in ds (onvergist slib)	%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
N-vracht in rejectiewater	kg N/d	190	220	222	227

Biogasproductie en energieinhoud		referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
----------------------------------	--	------------	---------	-----------------------------	-----

ODS afbraak primair	kg/d	2.854	2.854	2.854	2.854
ODS afbraak secundair	kg/d	1.551	2.122	2.163	2.294
specifieke biogasproductie primair afgebroken	m <sup>3</sup> /kg ods afgebroken	,97	,97	,97	,97
specifieke biogasproductie secundair afgebroken	m <sup>3</sup> /kg ods afgebroken	,76	,76	,76	,76
Totaal biogasproductie	m <sup>3</sup> /d	4.000	4.400	4.400	4.500
	m <sup>3</sup> /jaar	1.460.000	1.606.000	1.606.000	1.642.500
Calorische waarde	MJ/m <sup>3</sup>	23,3	23,3	23,3	23,3
Totale energieinhoud	MJ/jaar	34.051.800	37.457.000	37.457.000	38.308.300
	kWh/jaar	9.458.800	10.404.700	10.404.700	10.641.200

## APPENDIX E

## KOSTENRAMINGEN - ACHTERGROND

dimensionering	eenheid	referentie	venturi	thermofiele voorbehandeling	TDH
<b>totale slibtoevoer naar slibgisting</b>					
debiet	m <sup>3</sup> /h	11,4	11,4	11,4	9,4
<b>leiding secundair slib naar voorbehandeling</b>					
debiet (ingedikt)	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	n.v.t.	4,6	2,3
ds-gehalte	%	n.v.t.	n.v.t.	6%	12%
stroomsnelheid	m/s	n.v.t.	n.v.t.	1	1
binnendiameter	mm	n.v.t.	n.v.t.	40	28
leidinglengte	m	n.v.t.	n.v.t.	20	20
<b>pomp slib naar warmtewisselaar slibvoorverwarming</b>					
debiet	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	n.v.t.	4,6	n.v.t.
<b>warmtewisselaar slibvoorverwarming</b>					
type				spiraal	n.v.t.
debiet	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	n.v.t.	4,6	n.v.t.
Tin	°C	n.v.t.	n.v.t.	12	n.v.t.
Tuit	°C	n.v.t.	n.v.t.	57	n.v.t.
soortelijke warmte water	kJ/kgK			4,2	n.v.t.
vermogen verwarming	kW			238	
<b>tank voorverwarmd slib incl. menger</b>					
aanvoerdebiet	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	n.v.t.	4,6	n.v.t.
verblijftijd	h	n.v.t.	n.v.t.	4	n.v.t.
volume	m <sup>3</sup>	n.v.t.	n.v.t.	18,2	n.v.t.
<b>pomp slib van voorverwarming naar SGT</b>					
debiet	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	n.v.t.	4,6	
<b>TDH-installatie totaal</b>					
debiet	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	2,3
stoomdebiet	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0,3
<b>slibgistingstank</b>					
aantal tanks	#	2	2	2	2
volume per tank	m <sup>3</sup>	3.450	3.450	3.450	3.450
<b>slibrecirculatie - leiding</b>					
debiet	m <sup>3</sup> /h	39	57	39	39
stroomsnelheid	m/s	1	1	1	1
binnendiameter	mm	117	142	117	117
leidinglengte	m				

**slibrecirculatie - pomp**

debiet	m <sup>3</sup> /h	39	57	39	39
--------	-------------------	----	----	----	----

**slibrecirculatie - warmtewisselaar**

debiet	m <sup>3</sup> /h	39	57	39	39
Tin	°C				
Tuit	°C				

**slibrecirculatie - venturi (CROWN)**

debiet	m <sup>3</sup> /h	n.v.t.	57	n.v.t.	n.v.t.
Pin	bara	n.v.t.	2	n.v.t.	n.v.t.
Puit	bara	n.v.t.	1,1	n.v.t.	n.v.t.

**slibontwatering**

ds-aanvoer	kg ds/h	363	340	338	332
aanvoerdebiet	m <sup>3</sup> /h	11,4	11,4	11,4	9,4
ingaaand ds-gehalte	%	3,2%	3,0%	3,0%	3,5%

**slibsilo**

aanvoer	m <sup>3</sup> /h	1,55	1,33	1,32	1,12
opslagperiode	d	2,0	2,3	2,3	2,8
volume	m <sup>3</sup>	74	74	74	74

**rejectiewater**

vrijgekomen N-vracht	kg N/h	7,93	9,16	9,24	9,44
----------------------	--------	------	------	------	------

**biogassysteem**

biogasproductie	Nm <sup>3</sup> /h	167	183	183	188
snelheid biogas	m/s	8	8	8	8
leidingdiameter	mm	86	90	90	91
leidinglengte	m				
volume gashouder	m <sup>3</sup>	500	550	550	563
opslagperiode	h	3,0	3,0	3,0	3,0

**WKK**

piekfactor voor WKK	-	1,2	1,2	1,2	1,2
WKK-capaciteit	Nm <sup>3</sup> /h	200	220	220	225
aantal extra WKK-installaties	#	0	1	1	1

<b>berekening WKK</b>	<b>eenheid</b>	<b>referentie</b>	<b>venturi</b>	<b>thermofiele voorbehandeling</b>	<b>TDH</b>
extra WKK-capaciteit (biogas)	Nm <sup>3</sup> /h		20	20	25
energie-inhoud	MJ/Nm <sup>3</sup>		23,3	23,3	23,3
elektrisch rendement	%		40%	40%	40%
elektrisch vermogen	kWe		52	52	65
prijs 2011 (formule tot 100 kWe)	EUR/kWe		2040	2040	1764
prijs 2011 (formule va 50 kWe)	EUR/kWe		1.885	1.885	1.672
prijs 2011 (tot 100 kW)	EUR		105.708	105.708	114.261
prijs 2014	EUR		115.510	115.510	124.856
<b>operationeel</b>					
kosten revisie 2011	EUR/kWe		288	288	271
kosten revisie 2014	EUR/kWe		315	315	296
kosten onderhoud 2011	EURcent/kWhel		2,58	2,58	2,32
kosten onderhoud 2011	EUR/draaiuur		1,34	1,34	1,50
kosten onderhoud 2014	EUR/draaiuur		1,46	1,46	1,64

## APPENDIX F

# KENTALLEN VAN PRIMAIR EN SECUNDAIR SLIB

Tabel F.1 laat kentallen zien van primair en secundair slib.

TABEL F.1 KENTALLEN A-TRAP EN SECUNDAIR SLIB [6], [7]

Parameter	Primair/A-trap slib	Secundair slib
D.s. zonder gravitaire indikking (ds.%)	0,5 – 4,0	0,5 – 1,5
D.s. met indikking ( ds.%)		
-Gravitair	2,0 – 10,0	1,5 – 3,5
-Mechanisch, met PE	0,5 – 10,0	0,5 – 8,0
Organische componenten (ds.%)	60 – 80	50 – 88
-Vetten (ds.%)	7 – 35	5 – 12
-Eiwitten (ds.%)	19 – 30	32 – 41
Vergistbaarheid (ds.%) als droge stofafbraak na 20-25 dagen mesofiele gisting	50 – 60	25 – 50
Energie inhoud (MJ/kg TS)	23 – 29	19 – 23

Organische componenten in slib kunnen in een relatief korte tijd worden afgebroken afhankelijk van hun toegankelijkheid voor biochemische reacties. Vetten kunnen agglomereren, wat langzamere afbreekbaarheid veroorzaakt. De resterende d.s. fracties in primair en secundair slib bestaan uit moeilijk of niet anaeroob te degraderen componenten. [1]



## APPENDIX G

## RELEVANTE PROCES PARAMETERS GISTING

Om een gisting te optimaliseren en zo de productie van biogas te vergroten dienen de condities binnen de 4 fasen van gisting optimaal te zijn. Daarnaast is het van belang om de condities van een gisting constante te houden, omdat significante conditieveranderingen het eco-systeem enkele weken kunnen verstoren of het eco-systeem in haar geheel kunnen doden. [10], [47],[1]

Tabel G.2 laat de door de literatuur als optimaal beschouwde condities zien voor anaerobe gisting [10],[9]

TABEL G.2 OPTIMALE CONDITIES STAPPEN ANAEROBE GISTING

Parameter	Hydrolyse/acidogenese	Methaanvorming
Temperatuur	25 – 35°C	Mesofiel: 32 – 42°C Thermofiel: 48 – 58°C
pH	5,2-6,3	6,7-7,5
C:N:P:S mol-ratio	500:15:5:3	600:15:5:3
Redox potentiaal	+400 to -300 mV	<-250 mV
Vermenigvuldigingstijd bacteriën	24 – 36 h	5 – 16 dagen
Sporen elementen	-	Ni, Co, Mo, Se

Als de gehele omzetting tot biogas in 1 processtap gedaan wordt, dienen omstandigheden vooral aangepast te worden aan eisen van methanogene bacteriën. Dit komt door hun langzamere groeisnelheid en hogere gevoeligheid voor hun milieu. Echter, degradatie van lignocelulose substraten wordt vaak verhindert door de snelheid van de hydrolyse stap. Het prioriteren van deze stap wordt dus ook aanbevolen.[1], [10], [47]

Als laatste dient vermeld te worden dat alle fasen bij een gelijke pH kunnen plaatsvinden, waardoor een 1-staps-gisting tot de mogelijkheden behoort.

Verdere relevante parameters voor anaerobe gisting worden in onderstaande paragrafen kort toegelicht.

## G.1 PARAMETER – PARTIEELDRUK WATERSTOF

De waterstofconcentratie in een gisting dient goed gebalanceerd te zijn, omdat waterstof een belangrijk intermediair is.[47] Aan de ene kant hebben methanogene bacteriën genoeg waterstof nodig, terwijl acetogene bacteriën een voldoende lage waterstof partieeldruk nodig hebben om te functioneren. [10]

Bij hogere waterstof concentraties kunnen stoffen als propionzuur accumuleren, ofwel door een te hoge productie, ofwel door een gebrek aan afbraak. [68] De maximaal acceptabele waterstof partieeldruk is afhankelijk van de soort bacteriën en de aanwezige substraten. Voor slibgisting is gevonden dat wanneer de waterstof partieeldruk hoger is dan 6,5-7 Pa, er ophoping van vetzuren plaatsvindt, waardoor methaan productie gereduceerd wordt. [68] Deze ophoping verzuurt de reactor waardoor uiteindelijk de methanogene populatie afsterft.

## G.2 PARAMETER – CONCENTRATIE MICRO-ORGANISMEN

Bij een gelijkblijvende verblijftijd in een gisting, dient de concentratie van een langzaam delend organisme hoger te zijn dan die van een snel delend organisme. De optimale concentratie micro-organismen is daarom evenredig met de regeneratie snelheid van een organisme. Tabel G.3 geeft ter indicatie regeneratie tijden weer van verschillende soorten micro-organismen. [10]

TABEL G.3 VERDUBBELINGSTIJDEN VAN VERSCHILLENDE MICRO-ORGANISMEN

Anaeroob micro-organisme	Verdubbelingstijd
Acidogenic bacteria	
Bacterioids	<24 h
Clostridia	24 – 36 h
Acetogenic bacteria	80 – 90 h
Methanogenic bacteria	
Methanosarcina barkeri	5 – 16 d
Methanococcus	Ca. 10 d

## G.3 PARAMETER – TYPE SUBSTRAAT

De substraat compositie voor een anaerobe gisting bepaalt de omzettingssnelheid en is daarom een belangrijke proces parameter. Als een vitaal component niet meer aanwezig is in het substraat, stoppen de micro-organismen hun stofwisseling en valt de gisting stil. Dit kan voorkomen worden door koolhydraten, vetten of sporen elementen te doseren. [10],[47]

Verder bepaalt het type substraat de benodigde verblijftijd in een gisting. Glucose wordt bijvoorbeeld sneller afgebroken dan cellulose. De afbraaksnelheid van cellulose is weer afhankelijk van de lignine fractie. [10]

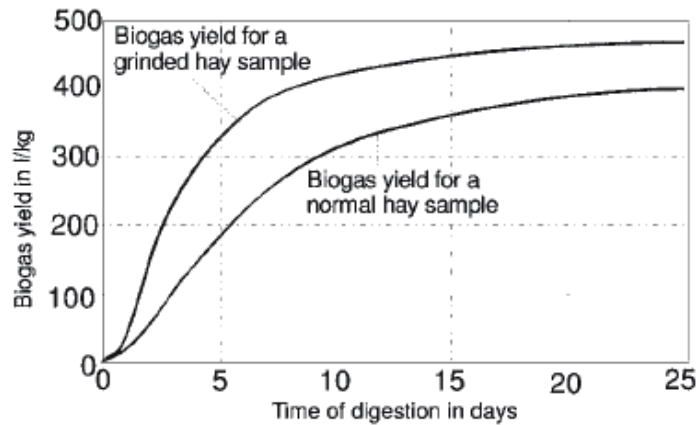
## G.4 PARAMETER – SPECIFIEK OPPERVLAK VAN MATERIAAL

Een groter specifiek substraat oppervlak ondersteunt de snelheid van biochemische reacties. Het specifieke oppervlak is vaak direct omgekeerd kwadratisch gerelateerd aan de deeltjesgrootte. Een reductie in deeltjesgrootte, bijvoorbeeld bij een malingsstap, heeft dus een gunstig effect op de biogas opbrengst in een gisting. [47] Dit heeft het meest effect op substraten als cellulose en lignine. [10]

Figuur 14.1 laat het verschil in biogas opbrengst zien tussen een referentie substraat monster en een vermalen substraat monster dat een grote fractie cellulose bevatte.

FIGUUR 14.1

BIOGASOPBRENGST - REFERENTIE TEGEN VERMALEN SUBSTRAAT (HOOI)



In de figuur wordt het effect op hooi weergegeven wat rijk is aan cellulose. Hoewel dit niet hetzelfde is als slib, kan het effect op de cellulose fractie van slib vergelijkbaar zijn.

Naast de hogere biogas opbrengst na maling, werd gevonden dat de benodigde verblijftijd in de gisting omlaag ging voor een vergelijkbare biogas opbrengst.

### G.5 PARAMETER – DESINTEGRATIE

Desintegratie is het proces waarbij cel structuren van substraat kapot worden gemaakt. Dit kan door een voldoende grote kracht op de cel te zetten, waardoor de celwand openbreekt. Desintegratie van substraat heeft verschillende voordelen [10]:

- Verhoogde slibafbraak
- Gereduceerde hoeveelheid digestaat
- Verhoogde biogasopbrengst
- Verlaagde slibviscositeit
- Verbeterde sedimentatie eigenschappen
- Schuimvorming in de gisting wordt verminderd

Er zijn echter ook nadelen bij desintegratie van slib. Hoewel sedimentatie eigenschappen van het slib verbeteren, wordt de vlok grootte kleiner. De vlokken worden voor desintegratie samengehouden door extracellulaire polymeren zoals polysacchariden, eiwitten en vetten. [50] Bij desintegratie worden interne cel polysacchariden vrij gelaten. Deze stoffen zijn moeilijk afbreekbaar door hun complexe structuur. Samen met eiwitten, hebben ze invloed op de effectiviteit van flocculanten door een negatieve lading op hun zijgroepen. [50] Dit fenomeen wordt in de literatuur als oorzaak genoemd voor slechtere ontwatering van anaeroob vergist slib. [43],[51] Ook wordt aangegeven dat flocculant gebruik tot 40% kan toenemen om vergelijkbare ontwateringsresultaten te behalen in vergelijking met niet-gedesintegreerd slib. [10] Daarnaast verhoogd slib desintegratie de tijd die nodig is om vergelijkbare ontwateringsresultaten te bereiken.

Door het vrijkomen van polymere structuren uit cellen, wordt bij desintegratie de hoeveelheid stikstof componenten in de waterfase verhoogd tot 30% tegenover niet-gedesintegreerd slib. [10] Dit komt doordat ammonium achterblijft als eindproduct na desintegratie. Hiernaast neemt ook de fractie opgelost organisch materiaal toe in de waterfase na mechanische destructie. [10]

## G.6 PARAMETER – CULTIVATIE, MIXEN EN VOLUMEVRACHT

Het opstarten van een gisting kan tot enkele maanden duren. Dit is omdat delicate evenwichten in biologische activiteit ingesteld dienen te worden. Om de opstarttijd te verkorten wordt gistingsslib gemixed met vers slib. Het is cruciaal om de verhouding tussen beide stromen juist te kiezen om de micro-organismen te voorzien van adequate hoeveelheden nutriënten. Daarnaast dienen temperatuur gradiënten binnen de gisting niet te groot te zijn wat mixen noodzakelijk maakt. De micro-organismen zijn echter gevoelig voor stress en moeten niet teveel geagiteerd worden.

De volumevracht is afhankelijk van de temperatuur, organisch droge stofgehalte en de verblijftijd. Bij meer dan 12 wt.% aan vaste stof wordt de gasproductie gehinderd, terwijl een lagere fractie inefficiënties met zich meebrengt. [10]

## G.7 PARAMETER – LICHT

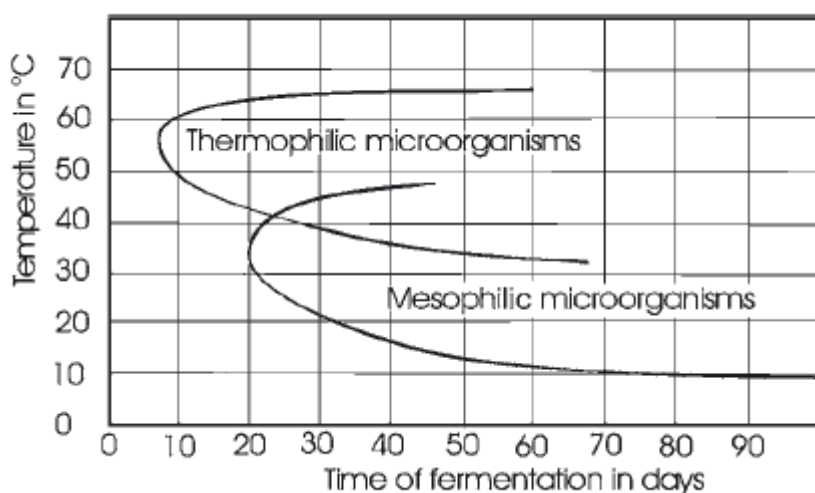
Licht inhibeert methanogene bacteriën. Om deze reden dient de gisting plaats te vinden in donkere omstandigheden. [10]

## G.8 PARAMETER – TEMPERATUUR

Van de methanogene bacteriën vallen de meeste binnen de mesofiele groep. Deze groep opereert binnen een optimaal temperatuur bereik van 32 – 42°C. Een kleiner deel opereert optimaal binnen een thermofiel temperatuur bereik van 48 – 58°C. Ongeacht van het temperatuur niveau van een gisting dienen temperatuur schommelingen niet boven de  $\pm 2^\circ\text{C}$  uit te komen. Temperatuur schommelingen buiten dit bereik kunnen de gasopbrengst van de gisting tot 30% reduceren. [10]

Onder thermofiele condities kunnen hogere afbraaksnelheden bereikt worden (Figuur 14.2), zeker wanneer het substraat een hoge concentratie vetten bevat. Bij een gelijkblijvende verblijftijd levert een thermofiele gisting dus over het algemeen meer biogas. [1] Hier komt bij dat bij thermofiele gisting met een temperatuur boven 55°C de pathogene organismen gedeactiveerd worden.

FIGUUR 14.2 INVLOED VAN FERMENTATIE TIJD BIJ MESOFIELE EN THERMOFIELE GISTING



### G.9 PARAMETER – PH

De concentratie waterstof ionen, uitgedrukt in pH, speelt een belangrijke rol in slibgisting. In de acetogene fase worden waterstof ionen gebruikt door enzymen voor oxidatie reacties die H<sub>2</sub> genereren. Deze reacties vinden plaats onafhankelijk van hydrolyse en acidogenese. [10] De reacties verlagen de pH en verminderen de activiteit van methanogene bacteriën wanneer de pH onder een waarde van 6,7 komt. Wanneer de pH onder de 6,5 komt, worden meer organische zuren gevormd die de pH verder omlaag brengen en een gisting kunnen stoppen.

### G.10 PARAMETER – REDOX POTENTIAAL

Oxiderende componenten zoals zuurstof, sulfaten, nitraten of nitrieten beïnvloeden redox potentiaal. Binnen een slibgisting dient een lage redox potentiaal aanwezig te zijn voor methanogene bacteriën. [10],[47],[6]

### G.11 PARAMETER – NUTRIËNTEN

Optimale verhoudingen van nutriënten (C:N:P:S) staan weergegeven in Tabel G.2. Vooral de C/N ratio speelt een belangrijke rol. Substraten met een te lage C/N verhouding geven een verhoogde ammoniak productie wat methaan productie inhibeert. Een te hoge C/N ratio heeft een negatief effect op eiwit formatie van aanwezige micro-organismen en dus hun metabolisme. [10],[6]

### G.12 PARAMETER – SPOREN ELEMENTEN

Micro-organismen hebben minimale concentraties sporen elementen nodig (zie Tabel G.2). Naast de genoemde concentraties Ni, Co, Mo en Se uit de figuur, hebben de organismen kationische elementen zoals Na en K nodig voor groei. Een te hoge concentratie van kationische elementen kan toxisch zijn voor de organismen. [10]

### G.13 PARAMETER – PRECIPITATEN

Van de vele componenten aanwezig in slib, kunnen enkele precipiteren bij een te hoge concentratie en afhankelijk van pH en temperatuur. De meest voorkomende neerslagen zijn calcium carbonaat, magnesium ammonium fosfaat en andere fosfaat verbindingen. Deze neerslagen zorgen voor scaling in reactoren, pompen en pijpen en hinderen continue bedrijfsvoering. [10]

### G.14 PARAMETER – BIOGAS AFVOER

Geproduceerd biogas bevat methaan, CO<sub>2</sub> en waterstof sulfide. Hoge concentraties van deze gassen inhiberen verdere omzetting in een gisting. Een afdoende verwijdering van de gassen kan organisme concentraties verhogen tot een factor 12. [10]

### G.15 PARAMETER – INHIBITORS

Tijdens anaerobe gisting wordt een grote variëteit aan componenten gevormd als product van metabolisme van micro-organismen. Deze componenten kunnen fungeren als inhibitor afhankelijk van hun concentratie, substraat compositie en aanpassingscapaciteit van de organismen. Hoewel er veel literatuur beschikbaar is over het effect van inhibitors, spreken resul-

taten elkaar dikwijls tegen. [10] Een verklaring voor de tegenspraak is mogelijk de verschillende types gistingen waarvan gebruik wordt gemaakt, verschillen in gebruikte substraten en een verscheidenheid aan omgevingsfactoren die in meer of mindere mate beschreven zijn. Over het algemeen kan geconstateerd worden dat anaerobe processen relatief ongevoelig zijn voor inhiberende stoffen door hun grote mate van aanpassingsvermogen. [10] De stoffen waarvan wel kwantitatieve data beschikbaar zijn omvatten; zuurstof, zwavel componenten, zuren, N-componenten en zware metalen.

#### **G.15.1 INHIBITOR – ZUURSTOF**

Onder de aanwezig micro-organismen in slib zijn obligate en facultatieve anaerobe organismen. Methanogenen behoren tot de eerste categorie en kunnen inhibitie ondervinden vanaf een zuurstof concentratie van 0,1 mg/L. [10]

Facultatieve anaerobe organismen zoals verzuringsorganismen, zijn minder gevoelig voor hogere zuurstof concentraties.

#### **G.15.2 INHIBITOR – ZWAVELCOMPONENTEN**

Zwavelcomponenten kunnen aanwezig zijn in verschillende vormen, zowel in de gasfase als in de vloeistoffase:

- Sulfaat
- Sulfide
- Waterstofsulfide ( $H_2S$ )

Naast bovengenoemde componenten zijn in zeer lage hoeveelheden ook andere gedissocieerde zwavelcomponenten aanwezig in slib.

Sulfaat kan op twee manieren problematisch zijn in een gisting; het kan waterstofsulfide vormen, maar het kan ook direct methaan productie inhiberen. Dit komt doordat sulfaat-degraderende organismen minder energie nodig hebben dan methanogenen. Dit zorgt ervoor dat het degradatie proces dominant is. [10],[1]

$H_2S$  wordt gevormd als bijproduct in slibgisting en kan gevonden worden in biogas of opgelost, gedissocieerd of niet-gedissocieerd in het substraat. De inhibitie van  $H_2S$  vindt plaats bij concentraties hoger dan 50 mg/L. Het opgelost  $H_2S$  werkt als cellulair vergif, zelfs bij lage concentraties. Dit effect wordt groter bij hogere temperaturen en lagere pH. [10]  $H_2S$  kan vrij diffunderen door cel membranen en veroorzaakt denaturatie van eiwitten. Op deze manier wordt het metabolisme van organismen verstoord.

#### **G.15.3 INHIBITOR – ZUREN**

Organische zuren zijn aanwezig in slib en worden gedegeneerd door methanogenen. Zoals waterstofsulfide, bestaan zuren in gedissocieerde en niet-gedissocieerde vorm en laten ze een vergelijkbare afhankelijkheid van pH zien als zwavel componenten. Vooral niet-gedissocieerde zuren hebben een inhiberend effect, omdat ze door de celwand kunnen diffunderen en binnen de cel eiwitten denatureren. [10] Een te hoge zuurconcentratie en dus een lage pH, kan een gisting stil laten vallen.

Vooraf bij een pH lager dan 7 treedt inhibitie op, hoofdzakelijk door propionzuur.

#### **G.15.4 INHIBITOR – N-COMPONENTEN**

Ammoniak en ammonium komen voort uit anaerobe degradatie van stikstof componenten. De hoeveelheid ammonia en ammonium is afhankelijk van pH en temperatuur.

Ammonia heeft een inhiberend effect op de gisting en kan zelfs toxisch zijn bij hogere concentraties. [10] Ammonium kan leiden tot een verlies van kalium wat vooral een negatief effect heeft op methanogenen. [1] Bij lagere pH waarden en hogere temperatuur verschuiven evenwichten richting  $\text{NH}_3$  productie waardoor voornamelijk inhibitie optreed.

Thermofiele gisting is gevoeliger voor dit effect dan mesofiele gisting. [1]

#### **G.15.5 INHIBITOR – ZWARE METALEN**

Lage concentraties van sporen elementen zoals lood, koper, zink, cadmium, chroom, nikkel, en kwik kunnen stimulerend werken op de aanwezige micro-organismen in slib. Bij hogere concentraties kunnen de metalen echter een toxisch effect hebben. Dit is ook het geval voor natrium, kalium, calcium en magnesium. [10] Een te hoge concentratie van metalen kan tegen gegaan worden door een kleine hoeveelheid sulfide of andere metaalcomplex vormende stoffen toe te voegen. De complexen slaan op deze manier neer en vormen geen bedreiging meer voor de gisting. [10]

#### **G.15.6 OVERIGE INHIBERENDE STOFFEN**

Slib kan ook andere gisting-inhiberende stoffen bevatten zoals desinfectiemiddelen, pesticiden, insecticiden, oplosmiddelen en antibiotica. In de praktijk zijn effecten van deze stoffen minimaal, omdat concentraties laag zijn. Daarnaast kunnen aanwezige micro-organismen geleidelijk een tolerantie ontwikkelen. [10], [47],[1]

## APPENDIX H

# VOORBEHANDELINGSMETHODEN

Hydrolyse wordt in de literatuur aangeduid als snelheidslimiterende stap in anaerobe gisting [10],[9],[1] 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 gewicht moleculen afgebroken naar lager gewicht moleculen. Op deze manier wordt de hydrolyse stap versneld of omzeild. [1]

In de literatuur worden verschillende manieren van biomassa voorbehandeling aangegeven; chemische voorbehandeling (20-60% verhoogde afbraak), mechanische voorbehandeling (20-90%), ultrasone voorbehandeling (40-80%), thermofiele voorbehandeling (50-90%) en enzymatisch versnelde hydrolyse (tot 210%).[9] Hierbij is het niet ongewoon om een of meerdere van deze manieren te combineren.

## H.1 THERMOFIELE VOORBEHANDELING

Het positieve effect op de gisting van thermofiele voorbehandeling van slib werd al aangetoond in 1970. [1] In de literatuur wordt een breed temperatuurbereik aangegeven, liggend tussen de 150 - 200 °C met drukken variërend tussen de 600 en 2500 kPa. [1], [19] Lagere temperaturen worden ook gebruikt[69], maar op dit punt wordt ook de biologische activiteit van het slib gestimuleerd, wat betekent dat enzymatische en thermische hydrolyse tegelijkertijd plaatsvinden. [1],[2],[3]

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

De resultaten van thermofiele 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. [1] Ook heeft thermofiele behandeling een groter effect op biogas productie bij gisting voor een mesofiele gisting dan voor een thermofiele gisting. [1]

## H.2 CHEMISCHE VOORBEHANDELING

In chemische voorbehandeling wordt slib met het gebruik van chemicaliën hydrolyse bewerkstelligd van celwanden en celmembranen. Zo wordt extra intern cel materiaal vrij gemaakt. Verschillende behandelingsmethoden zijn ontwikkeld; alkalische hydrolyse, ozonatie, en verregaande oxidatie. [1]



### H.2.1 ZUUR EN ALKALISCHE HYDROLYSE

De toevoeging van zuur of base kan gedaan worden om vaste slib bestanddelen op te lossen. Deze toevoeging vindt vaak plaats bij thermofiele slib-voorbehandeling. De samentrekking van methoden maakt dat minder hoge temperaturen nodig zijn voor slibdestructie. [1]

Deze processen zijn aantoonbaar effectief in slib-voorbehandeling, maar presenteren ook nadelen. De benodigde pH waarden zijn relatief extreem, waardoor een subsequente pH correctie nodig is met bijbehorende kosten. [1],[19]

### H.2.2 OXIDATIEVE VOORBEHANDELING

Ozonatie en peroxidatie zijn de meest gebruikte oxidatieve voorbehandelingsmethoden en zijn gebaseerd op de generatie van hydroxyl radicalen. De radicalen zijn zeer sterke oxidanten.

Ozon kan ingezet worden voor desinfectie van drinkwater en destructie van pathogenen, maar kan ook ingezet worden voor de destructie van cellulair materiaal. [1]

Een ander proces, Fenton peroxidatie geheten, gebruikt waterstofperoxide samen met transitie metalen zoals  $Fe^{3+}$  voor oxidatie van cellulair materiaal. Het grootste nadeel van dit proces is dat het bij een zeer lage pH van 3 plaatsvindt, waardoor ook oxidatie van apparatuur en leidingwerk kan opreden als deze niet van adequate materialen zijn gemaakt.

Gebruik van een van beide methoden behoeft geen stringente reactie condities en beide methoden leveren significant meer biogas bij gisting op. [1]

## H.3 MECHANISCHE VOORBEHANDELING

Mechanische slib-voorbehandelingsmethoden richten zich primair op desintegratie van celwanden. Een hoge schuifspanning breekt celwanden open, waardoor intern celmateriaal vrij komt. Het opwekken van schuifspanning gebeurt onder hoge druk die opgewekt kan worden door bal molens, homogenisatoren, centrifugaal pompen en pulsatie technieken [1],[46]. Van deze technieken kunnen hoge druk homogenisatoren en ultrasone homogenisatoren gezien worden als cavitatie technieken.

### H.3.1 CAVITATIE TECHNIEKEN

Het verschijnsel dat cavitatie genoemd wordt, ontstaat wanneer een vloeistof verhit wordt of wanneer een plotselinge drukverlaging optreedt. In beide gevallen wordt een stadium bereikt waar zichtbare bellen ontstaan en groeien. Deze bellen zijn gevuld met vloeistof damp of een mix van vloeistofdamp en opgeloste gassen.

Langzame bel-groei ontstaat door diffusie van opgeloste gassen of de expansie van vloeistof damp. Snelle bel-groei ontstaat wanneer relatief grote hoeveelheden damp vrijkomen in de bel bijvoorbeeld door een zeer snelle temperatuursverhoging. In de meeste gevallen wordt de term cavitatie echter gebruikt voor een snelle afname van druk bij constante temperatuur waarbij bellen ontstaan. [66]

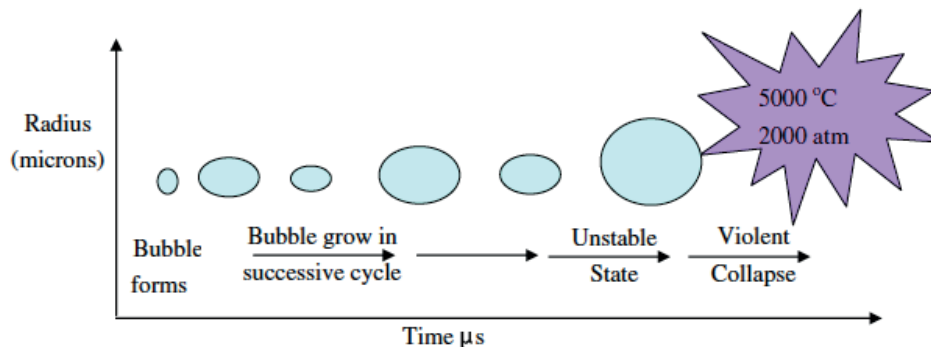
De laatst genoemde vorm van cavitatie kan fungeren als biocide, door generatie van  $OH^-$  radicalen of fysieke destructie techniek. Cavitatie wordt gezien als een effectieve manier om agglomeraten in slib kapot te maken, waardoor bacteriën niet langer beschermd zijn door externe micro-organismen. Hierdoor wordt de afbreekbaarheid in de gisting verhoogd. [4], [5]

Voorbeelden van cavitatie methoden zijn hoge druk homogenisatie en ultrasone homogenisatie. Hoewel deze technieken effectief blijken te zijn, hebben ze een negatieve netto energie balans. [70] In de literatuur wordt het gebruik van een venturi buis of een orifice plate om hydrodynamische cavitatie op te wekken als meest interessante alternatief bestempeld. [70] Deze technieken laten een netto positieve energie balans zien, wat inhoudt dat meer energie vrij komt uit de productie van extra biogas dan nodig is om de voorbehandeling te doen. [46], [4]

### H.3.1.1 ULTRASONE OF AKOESTISCHE CAVITATIE

Ultrasone slib-desintegratie is gebaseerd op het achtereenvolgens comprimeren en laten expanderen van een medium in meerdere cycli. Figuur 14.3 laat zien hoe een bel gevormd wordt in meerdere cycli.

FIGUUR 14.3 ONTWIKKELING VAN BELLEN BIJ ULTRASONE CAVITATIE



De bel groeit bij iedere cyclus tot een onstabiele bel diameter bereikt wordt en de bel instort. Hierbij worden lokaal extreme condities opgewekt en kan slib desintegratie plaatsvinden. [1]

Ultrasone cavitatie onderzoeken hebben laten zien dat 100% van de aanwezige cellen gedesintegreerd kunnen worden. Echter hiervoor is energie consumptie onevenredig hoog. [1] Het optimale d.s. bereik voor deze techniek ligt tussen de 2,3 en 3,2% d.s.. Boven dit bereik neemt de viscositeit van het slib dusdanig toe dat cavitatie verhindert wordt. Een mogelijke manier om toch hogere d.s. gehalten te verwerken is een temperatuur behandeling. [19]

Ultrasone cavitatie is onderzocht bij meerdere rwzi's met een capaciteit van 50.000 tot 750.000 i.e., waarbij 40 – 55% meer organische droge stofafbraak en biogas gemeten is. Een positief effect van ultrasone cavitatie is dat het d.s. gehalte van de slibkoek na ontwatering met 5% toeneemt en het flocculant gebruik met 30% daalt. [19]

### H.3.1.2 HYDRODYNAMISCHE CAVITATIE

Hydrodynamische cavitatie wordt voornamelijk toegepast in de chemische industrie, omdat deze techniek het meest geschikt is voor grote schaal continue bulk processen. [66], [71] Deze manier van cavitatie opwekking is relatief eenvoudig omdat een medium alleen door een vernauwing zoals een orifice plate, een smooorklep of een venturi buis gepompt hoeft te worden.

#### H.3.1.2.1 HOGE DRUK HOMOGENISATIE

Bij hoge druk homogenisatie wordt slib onder een druk van 12 tot 600 bar gebracht. [19], [1] De druk wordt afgelaten over een klep die het slib met een hoge snelheid tegen een impact ring brengt. Hierbij worden cellen onderworpen aan turbulentie, cavitatie en een hoge schuifspanning, resulterend in cel desintegratie. [1], [72]

De verhoogde opgelost eiwit concentratie die hoge druk homogenisatie voortbrengt kan leiden tot 30% meer biogas opbrengst bij gisting. [19] Hoewel de energie efficiëntie van de techniek laag is, zijn geen chemicaliën of verhittingsstappen nodig. Wel wordt in de literatuur een negatief effect op de ontwaterbaarheid van slib gerapporteerd. [19]

#### **H.3.1.2.2 ORIFICE PLATE EN VENTURI**

Het leiden van een vloeistof over een vernauwing maakt dat de snelheid van de vloeistof in de vernauwing omhoog gaat. Wanneer de snelheid voldoende omhoog gaat, komt de druk van de vloeistof en/of de daarin opgeloste stoffen onder de respectievelijke dampspanning. Dit veroorzaakt cavitatie. [71]

Na het passeren van de vernauwing gaat de snelheid van het medium weer omlaag resulterend in een hogere druk en implosie van ontstane bellen.[66] De intensiteit van cavitatie wordt beïnvloed door het type restrictie en kan een venturi buis of een orifice plate met 1 of meerdere gaten zijn. Over de keuze tussen een orifice plate en een venturi buis wordt in de literatuur genoemd dat een orifice plate alleen nodig is voor intense chemische reacties. Bij mildere processen (15 tot 20 bar) wordt een venturi buis aangeraden. [46], [66],[70]

In een studie gebruik makende van *Escherichia coli* (*E. coli*) werd gevonden dat een venturi buis 2,5 tot 15 keer meer bacteriën kon doden dan een orifice plate. De belangrijkste reden hiervoor is de bij een venturi buis langere tijd voor bel groei. [4] Ook is het drukherstel geleidelijker, waardoor meer bel-bel interactie plaatsvindt en dus meer diffusie. [66],[4]

Het belang van geleidelijk druk herstel is ook aangetoond in een specifieke slib studie. [46] Hier is geëxperimenteerd met verschillende expansie hoeken (8°, 12° en 15°) en werd een optimale expansie hoek van 12° gevonden. Als verklaring hiervoor wordt gegeven dat een te langzaam druk herstel zwakkere cavitatie effecten veroorzaakt, terwijl een te snel druk herstel bel groei hindert.

Cavitatie effecten in een venturi buis worden ook beïnvloed door gebruikte drukken en medium viscositeit. [4] Helaas zijn geen relaties gevonden in de literatuur tussen deze parameters en slib desintegratie ofwel biogas opbrengst bij gisting.

## **H.4 BIOLOGISCHE VOORBEHANDELING**

Biologische voorbehandeling is een verzamelnaam voor verschillende processen die als doel hebben om de hydrolyse te verbeteren.[19] Een goed voorbeeld van zo'n proces is een temperatuur gefaseerde anaerobe gisting (TPAD) die, milde temperaturen toepast om thermofiele activiteit te stimuleren. Gebruikte temperaturen zijn in het thermofiele (rond 55°C)[62] of hyper-thermofiel (60 – 70°C) gebied, zowel aeroob als anaeroob.[19],[73] Bij een voorbehandeling van slib gedurende 12 uur bij 55°C is bijvoorbeeld een toename in de methaanproductie gemeten van 23%.[62] Deze processen kunnen versterkt worden door het toevoegen van specifieke bacteriële stammen die de hydrolyse versterken in bepaalde temperatuurgebieden. Zo kan *Geobacillus stearothermophilus* moeilijk afbreekbaar organisch materiaal goed afbreken bij 65. [9],[1],[19] Naast het toevoegen van bacterie stammen is er ook succes behaald met het toevoegen van enzymen [74], schimmels [75], [76], of andere biomassa die extra nutriënten kunnen bevatten voor de aanwezige micro-organismen. [10], [75], [76]

## H.5 ELEKTRISCHE VOORBEHANDELING

Het gebruik van elektrische pulsen kan cellen desintegreren doordat componenten in de celwanden en -membranen negatief geladen zijn, en daarmee gevoelig zijn voor elektrische ladingen. [8], [57], [52] Een sterk elektrisch veld met pulsen van 20-30 kV kan celmembranen en complexe componenten verzwakken of openbreken. [52] Door het toepassen van deze pulsen zijn toenames in methaanproductie gemeten tot 33%, met als bijkomend voordeel dat de verblijftijd in de reactor verkort kon worden waardoor de efficiëntie van de reactor met 40% toenam. [52], [77]

## H.6 VACUÛM VOORBEHANDELING

Het gebruik van een vacuüm van 0,02 bar is onderzocht als een mogelijk slibvoorbehandeling. [74],[53] Het drukverschil tussen het binnenste van de cel en zijn omgeving oefent een hydrostatische kracht uit op de celwand, waardoor deze opengebroken wordt. Een behandeling van een half uur leidde hierbij tot een verdubbeling van de biogasopbrengst na drie weken mesofiel vergisten. [53] Dit effect wordt versterkt wanneer een base wordt toegevoegd zoals  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  of NaOH. Het toevoegen van de base lijkt de vacuüm behandeling te versterken, meer dan het optellen van de effecten van een chemische en vacuüm behandeling.

## APPENDIX I

## FULL-SCALE

## VOORBEHANDELINGSTECHNOLOGIEËN

Er zijn verschillende pilot en full-scale processen ontwikkeld voor slibdesintegratie. De processen kunnen toegepast worden op een bestaande gistinginstallatie met minimale verstoring van bestaande processen.

TABEL I.4 OVERZICHT VAN VOORBEHANDELINGSPROCESSEN OP FULL-SCALE GETEST EN DE GERAPPORTEERDE EFFECTEN

Voorbehandeling	Organische stofafbraak	Biogas toename	Ontwateringseffecten	Bronnen
Thermische hydrolyse	10 – 50 %	10 – 50 %	Toename PE	[20], [54], [27]
Chemische behandeling	54 – 57 %	5 %	-	[19],[20],[58]
Mechanisch!:				
- CROWN	20 %	16 – 40 %	3 – 6 % verbetering	[19], [20],[21]
- Cellruptor	30 – 40 %	30 – 40 %	-	[19],[59]
- BioLysis	17 - 110 %	15 – 46 %	-	[20],[21]
- BioCrack	11 %	8%	Afname PE	[20],[21]
Ultrasoon	15 – 35 %	15 – 35 %	Onbeslist	[19],[20],[21]
Electrisch	40 %	60 %	-	[20],[60]

## I.1 THERMISCHE VOORBEHANDELING

Thermische hydrolyse technieken zijn in bedrijf op meer dan 20 rwzi's in West-Europa [20],[54]. Daarnaast is in Nederland de technologie recent op pilot-schaal onderzocht. [26] Het meest gebruikte proces is het CAMBI™ proces[54] ontwikkeld door het gelijknamige Noorse bedrijf. De Franse firma Veolia Water biedt een vergelijkbaar proces aan genaamd Bio-Thelys™.[20] Beide processen gebruiken verhoogde druk en verhoogde temperatuur voor slib-desintegratie voorafgaand aan anaerobe gisting.

Het CAMBI proces bestaat uit 3 stappen. Voorafgaand aan het proces wordt slib mechanisch ontwaterd tot 14-18% d.s.. In de eerste stap wordt slib verwarmd tot 97 °C in een pulper met een verblijftijd van ongeveer 1,5 uur. Vervolgens stroomt het voorverwarmde slib naar een reactor waar stoom met een druk van 12 bar wordt geïnjecteerd om de temperatuur naar 150 – 160 °C te brengen onder een druk van 6-10 bar gedurende 15-30 minuten. Het behandelde slib stroomt naar een flash tank waar de temperatuur gereduceerd wordt naar 100 °C. De verblijftijd in deze tank is 1,5 uur. Het slib wordt verdunt tot 10% d.s. om stromingseigenschappen te verbeteren en stroomt via een warmtewisselaar naar de gisting. [20], [54], [27]

Naast dit batch proces, heeft de Nederlandse firma Sustec een continu proces ontworpen, genaamd Turbotec. Deze installatie draait momenteel op rwzi Venlo. [57] Ook Veolia Water biedt een continu proces aan, genaamd Exelys™. [20],[54] De processen opereren op een vergelijkbare manier als de batch processen, maar variëren in verblijftijd, drukken, temperaturen en d.s. gehalten. Voor een gedetailleerde beschrijving van deze technieken wordt verwezen naar de STOWA rapportage. [26]

Voordelen van de processen zijn een toename van 10-50% in organische vaste stof destructie, vergezeld door een 10-50% hogere biogas opbrengst bij vergisting. De gemiddelde verhoging van biogas opbrengst ligt hierbij op 25% in vergelijking met mesofiele gisting zonder thermofiele voorbehandeling. [20],[54]

Bijkomende voordelen van de voorbehandelingsstappen zijn verhoogde gistingcapaciteit, verbeterde ontwaterbaarheid en vermeden schuimvorming in de gisting. Een nadeel van de processen is de hoge mate van complexiteit die zorgt voor de noodzaak van adequate training van personeel. Omdat gewerkt wordt met hoge drukken en temperaturen zijn ook extra veiligheidsmaatregelen aan de orde bij implementatie. Als laatste is relatief veel energie nodig voor de technieken wat zorgt voor additionele kosten. Ter overweging dienen de extra kosten afgewogen te worden tegen de verhoogde biogas opbrengst en de verbeterde ontwaterbaarheid. [20]

## I.2 CHEMISCHE VOORBEHANDELING

Een commercieel beschikbare chemische slib-voorbehandeling is het MicroSludge™ systeem. Het proces combineert alkalische stoffen of zuur conditionering met mechanische behandeling.

Slib wordt naar een pH van 2 of 11 gebracht om celwanden te verzwakken, waarna het slib gedesintegreerd wordt met behulp van een hoge druk homogenisator bij een druk van 830 bar. [19],[20],[58]

Het gebruik van alkalische stoffen is effectiever dan zuur gebruik. Verder werken de combinatie van een pH verhoging en hoge druk homogenisatie versterkend aan elkaar. Dit houdt in dat de combinatie meer effect laat zien dan de som van de twee individuele stappen. [5],[78],[79],[80],[81]

Het MicroSludge systeem met NaOH additie is getest op ten minste 3 full scale installaties en laat matige verbeteringen zien. Een studie in de VS gaf een verhoogde destructie van 54 naar 57% met 5% extra biogas productie in de gisting. Hierdoor werd de technologie als niet kosteneffectief bestempeld.[20]

## I.3 MECHANISCHE VOORBEHANDELING

Bestaande mechanische slib-voorbehandelingstechnieken maken gebruik van schuifspanning, druk verandering en cavitatie om vlok desintegratie en celwand destructie op te wekken. Commercieel beschikbare systemen zijn CROWN™, Biogest, Cellruptor of Rapid non-equilibrium Decomposition (RnD), MicroSludge™, BioCrack en Biolysis. [19], [20],[21]

Het CROWN desintegratie systeem is gebaseerd op een homogenisatie proces waarin slib op een druk van 12 bar gebracht wordt en door een hoge snelheid mixer over een venturi buis wordt geleid. Het systeem wordt over de hele wereld toegepast en resulteert in een d.s. afbraak van gemiddeld 20%, 16-40% verhoogde biogas productie en 3-6% punt hogere d.s. gehalten na mechanische ontwatering.[20], [21], [82] Voordelen van dit systeem zijn eenvoudige bedienbaarheid, het feit dat geen temperatuur of chemicaliën behandeling nodig is, vermindering van schuimvorming in de gisting en gereduceerd polymeerverbuik voor mechanische ontwatering.

Het Cellruptor proces maakt ook gebruik van drukverschillen om celwanden kapot te maken. In het proces wordt het medium op een druk boven de 2 bar gebracht en wordt een oplosbaar gas toegevoegd. Het gas diffundeert naar de vloeistoffase en wordt getransporteerd naar de binnenkant van cellen. Wanneer de druk afgelaten wordt, expanderen de cellen tot 1837%, wat leidt tot het openbarsten van de cellen. Praktijk voorbeelden laten zien dat 30-40% extra cel afbraak bereikt wordt gepaard gaande met 30-40% meer biogas opbrengst in de gisting. [19],[59]

De andere genoemde systemen laten maximaal 15% meer biogas opbrengst zien en worden aangemerkt als niet kosteneffectief. [20],[21]

#### **I.4 ULTRASONE VOORBEHANDELING**

Er zijn meerdere aanbieders van ultrasone voorbehandelingsapparatuur in verschillende configuraties, maar het werkingsprincipe is in alle gevallen hetzelfde. Twee voorbeelden van deze technieken zijn het systeem van Sonolyzer<sup>TM</sup> geleverd door Wasser & Umwelttechnologien GMBH en het Sonix<sup>TM</sup> systeem geleverd door Sonico. Het Sonolyzer systeem is op ten minsten 20 full-scale en 17 pilot-scale installaties in gebruik ten tijde van schrijven, hoofdzakelijk in Duitsland. De resultaten van deze installaties tonen een toename in organische stofafbraak en biogas productie van 15 – 35% bij secundair slib. De apparatuur is erg compact en eenvoudig te bedienen waardoor het eenvoudig is om te installeren op bestaande locaties. Een groot nadeel van deze techniek is echter de grote hoeveelheid energie die nodig is om de gewenste effecten te krijgen, wat mogelijk niet genoeg gecompenseerd wordt door de toename in biogasproductie. Daarnaast is het onduidelijk wat het effect is op de ontwatering; er worden zowel verbeteringen als verslechtingen gerapporteerd ten aanzien van het PE verbruik en de ontwateringsresultaten. [19],[20],[21]

#### **I.5 ELEKTRISCHE VOORBEHANDELING**

De OpenCel<sup>TM</sup> technologie gebruikt pulserende elektrische velden om direct de bouwstenen van celwanden en -membranen aan te vallen.[60] Er is ten tijde van schrijven slechts één full-scale installatie in Mesa, Arizona in de Verenigde Staten. De resultaten van deze installatie zijn veelbelovend, met een toename van 60% in biogas en een reductie van 40% droge stof. Daarnaast blijkt de toename in biogasproductie en de afname in verwerkingskosten voldoende te zijn om de kosten van de behandelingsmethode te compenseren. [20],[60]

## APPENDIX J

## VERZURINGSEXPERIMENTEN

## J.1 INGEZETTE EXPERIMENTEN

TABEL D.5 INGEZETTE VERZURINGSEXPERIMENTEN 2013

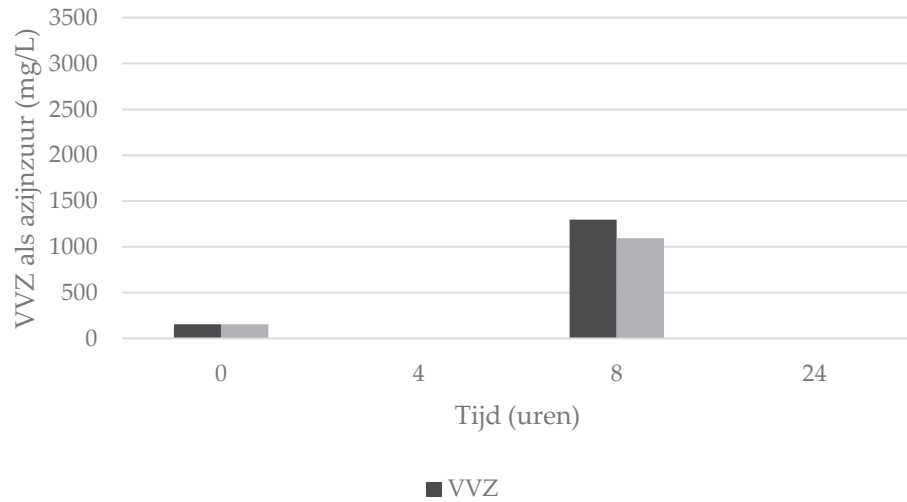
Datum	Beluchting	Temp.	D.s.
10 sept.	Micro-aeroob	37°C	4,62%
	Micro-aeroob	37°C	4,76%
17 sept.	Micro-aeroob	37°C	4,44%
	Micro-aeroob	37°C	4,44%
18 sept.	Micro-aeroob	55°C	4,60%
	Micro-aeroob	55°C	4,60%
19 sept.	Micro-aeroob	45°C	4,46%
	Micro-aeroob	45°C	4,46%
15 okt.	Anaeroob	55°C	5,86%
	Anaeroob	55°C	5,86%
	Anaeroob	55°C	5,86%
	Anaeroob	55°C	5,86%
22 okt.	Anaeroob	55°C	5,52%
	Anaeroob	55°C	5,37%
	Anaeroob	55°C	4,15%
	Anaeroob	55°C	4,64%

## J.2 MICRO-AEROBE EXPERIMENTEN

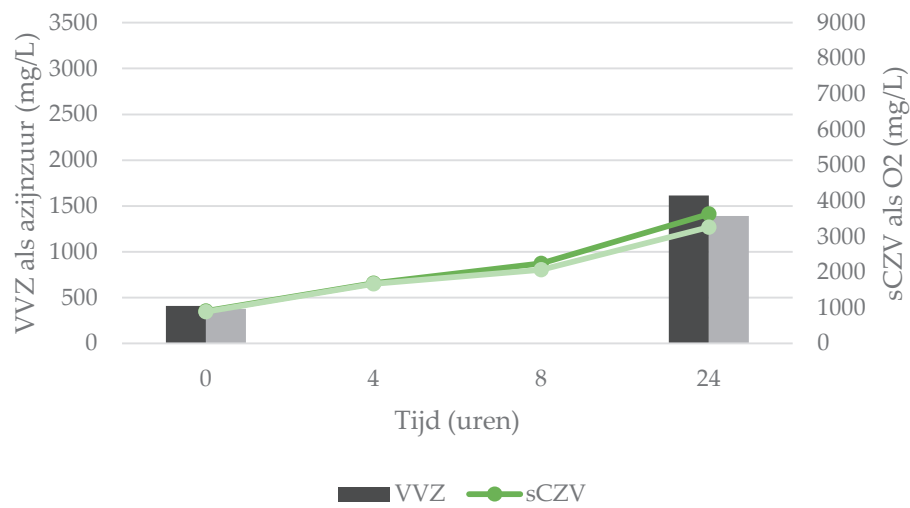
In eerder onderzoek is aangetoond dat de productie van VVZ hoger is onder micro-aerobe omstandigheden – waar een kleine hoeveelheid zuurstof aanwezig is – ten opzicht van anaerobe omstandigheden. [62] In de micro-aerobe experimenten is gekeken naar de verandering van pH, VVZ productie en de bijbehorende sCZV concentratie bij verschillende temperaturen over de tijd. In de figuren hieronder staan de resultaten van deze experimenten, waarbij de verandering van pH niet is getoond doordat deze nagenoeg niet veranderde. Elk experiment is in duplo uitgevoerd, en de ruwe data verderop te vinden in de appendix.



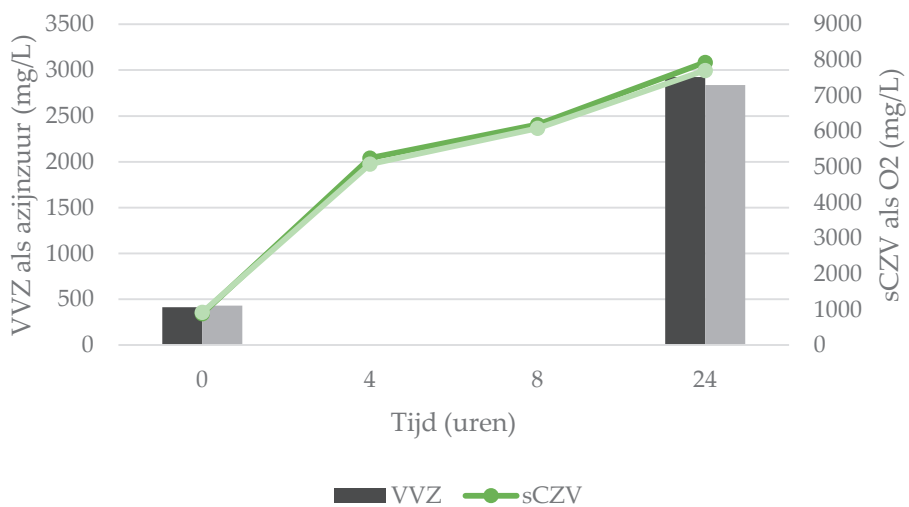
FIGUUR 14.4 VERANDERING IN VVZ, MICRO-AEROOB, 37°C, 4,6 WT.% D.S.



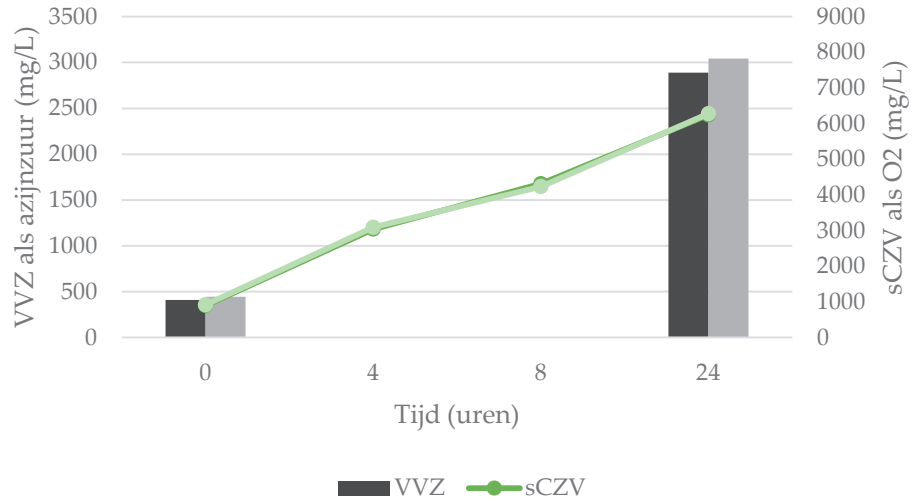
FIGUUR 14.5 VERANDERING IN VVZ, MICRO-AEROOB, 37°C, 4,4 WT.% D.S.



FIGUUR 14.6 VERANDERING IN VVZ EN SCZV, MICRO-AEROOB, 45°C, 4,5 WT.% D.S.



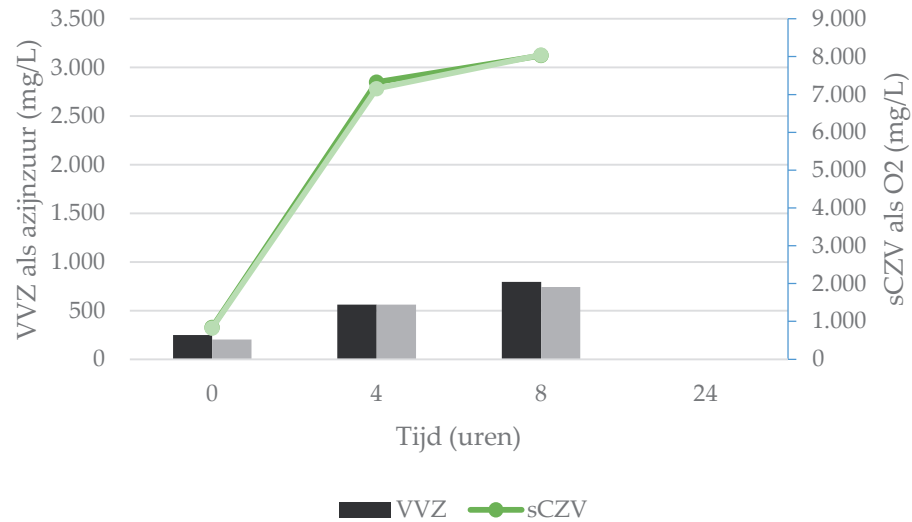
FIGUUR 14.7 VERANDERING IN VVZ EN SCZV, MICRO-AEROOB, 55°C, 4,6 WT.% D.S.



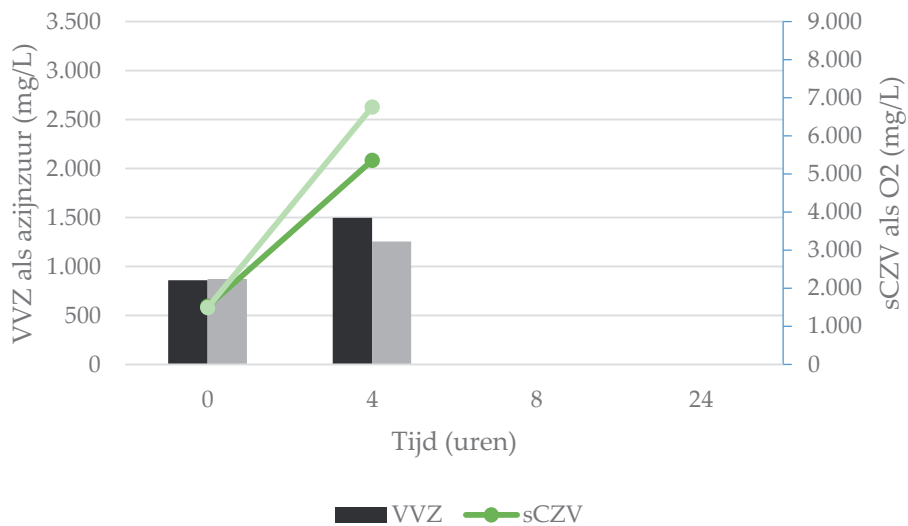
Ondanks dat de pH nagenoeg hetzelfde bleef gedurende de experimenten, is er wel een duidelijke toename in VVZ en sCZV gemeten. De sCZV concentratie lijkt lineair toe te nemen bij 37°C en 55°C terwijl deze bij 45°C af lijkt te vlakken na 4 uur. Het verloop van de sCZV concentratie lijkt direct beïnvloed te worden door de temperatuur, en lijkt het sterkst toegevoegd te zijn bij 45°C. De sterkste toename in VVZ valt te zien bij 45°C en 55°C.

### J.3 ANAEROBE EXPERIMENTEN

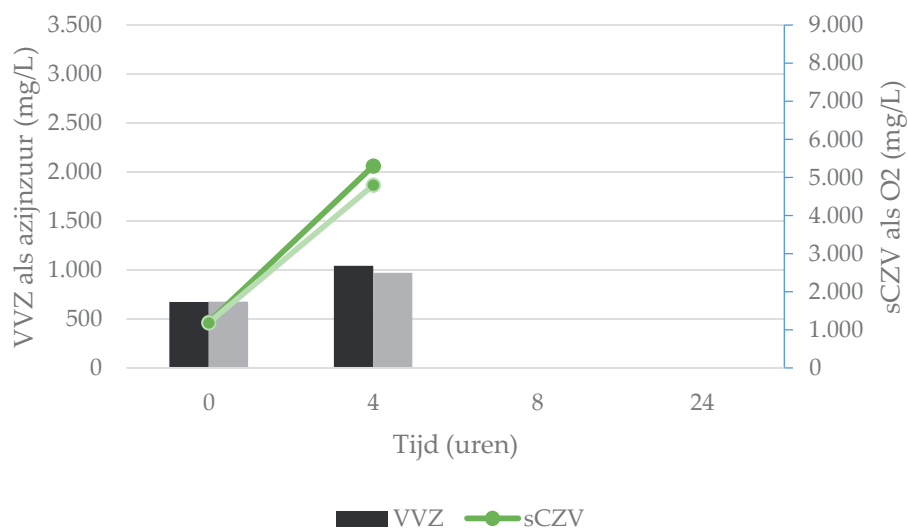
FIGUUR 14.8 VERANDERING IN VVZ EN SCZV, ANAEROOB, 55°C, 5,9 WT.% D.S.



FIGUUR 14.9 CONCENTRATIE VVZ EN SCZV, ANAEROOB, 55°C, 5,5 WT.% D.S.



FIGUUR 14.10 CONCENTRATIE VVZ EN SCZV, ANAEROOB, 55°C, 4,2 WT.% D.S.



## J.4 RUWE DATA VERZURINGSEXPERIMENTEN

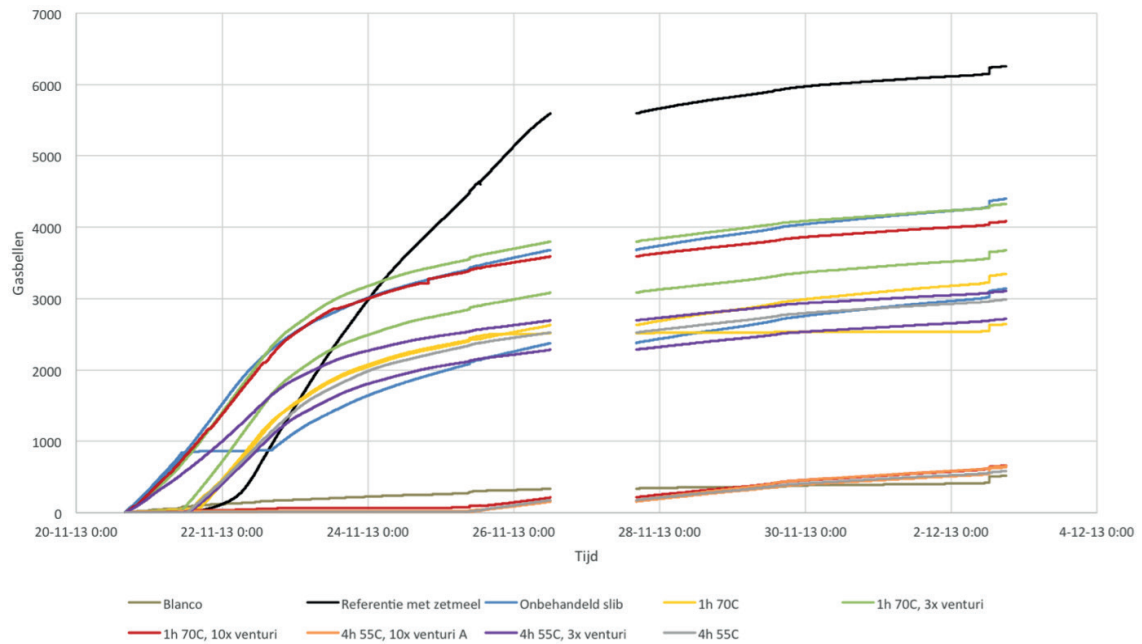
TABEL J.2 PH, SCZV EN VVZ-ONTWIKKELING OVER DE TIJD

Date	Aeration	Temp.	pH				sCZV				VVZ			
			0 h	4 h	8 h	24 h	0 h	4 h	8 h	24 h	0 h	4 h	8 h	24 h
10-sep	Micro-aeroob	37 °C	6	5.9	6							154		1298
10-sep	Micro-aeroob	37 °C	6	5.9	6							155		1094
17-sep	Micro-aeroob	37 °C	5.8	6.1	6.1	6	908	1688	2244	3632	410			1614
17-sep	Micro-aeroob	37 °C	5.8	6	6	5.9	887	1671	2067	3261	379			1392
18-sep	Micro-aeroob	55 °C	6.1	6	5.9	6.2	883	5248	6187	7932	412			2926
18-sep	Micro-aeroob	55 °C	6.1	6	5.9	6.2	921	5081	6085	7706	431			2836
19-sep	Micro-aeroob	45 °C	6	6	5.9	6	895	3040	4312	6243	410			2888
19-sep	Micro-aeroob	45 °C	6	6	5.8	5.9	915	3088	4232	6277	443			3042
15-okt	Anaeroob	55 °C	5.8	5.7			842	7327			250	562		
15-okt	Anaeroob	55 °C	5.8	5.6			823	7153			204	560		
15-okt	Anaeroob	55 °C	5.8		5.4		842		8032		250		796	
15-okt	Anaeroob	55 °C	5.8		5.4		823		8042		204		744	
22-okt	Anaeroob	55 °C	5.7	5.8			1524	5357			860	1496		
22-okt	Anaeroob	55 °C	5.7	5.8			1489	6757			872	1256		
22-okt	Anaeroob	55 °C	5.7	5.8			1197	5302			674	1042		
22-okt	Anaeroob	55 °C	5.7	5.8			1183	4800			676	972		

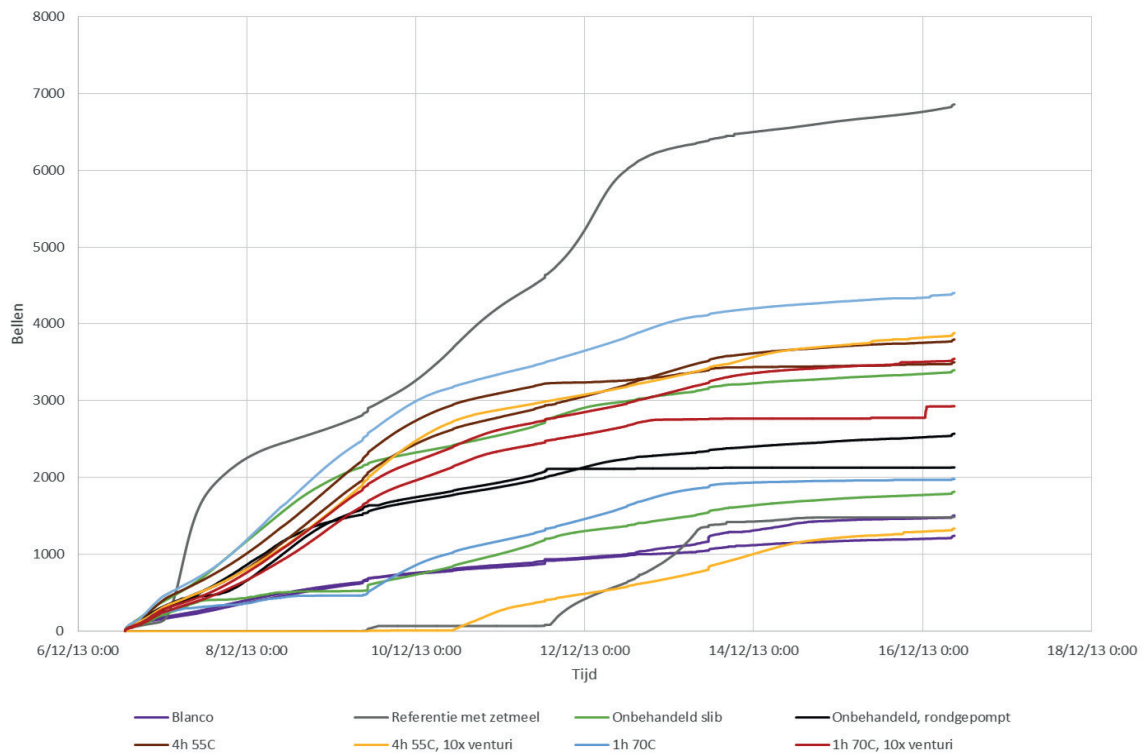
## APPENDIX K

## RUWE DATA VERGISTINGSEXPERIMENTEN

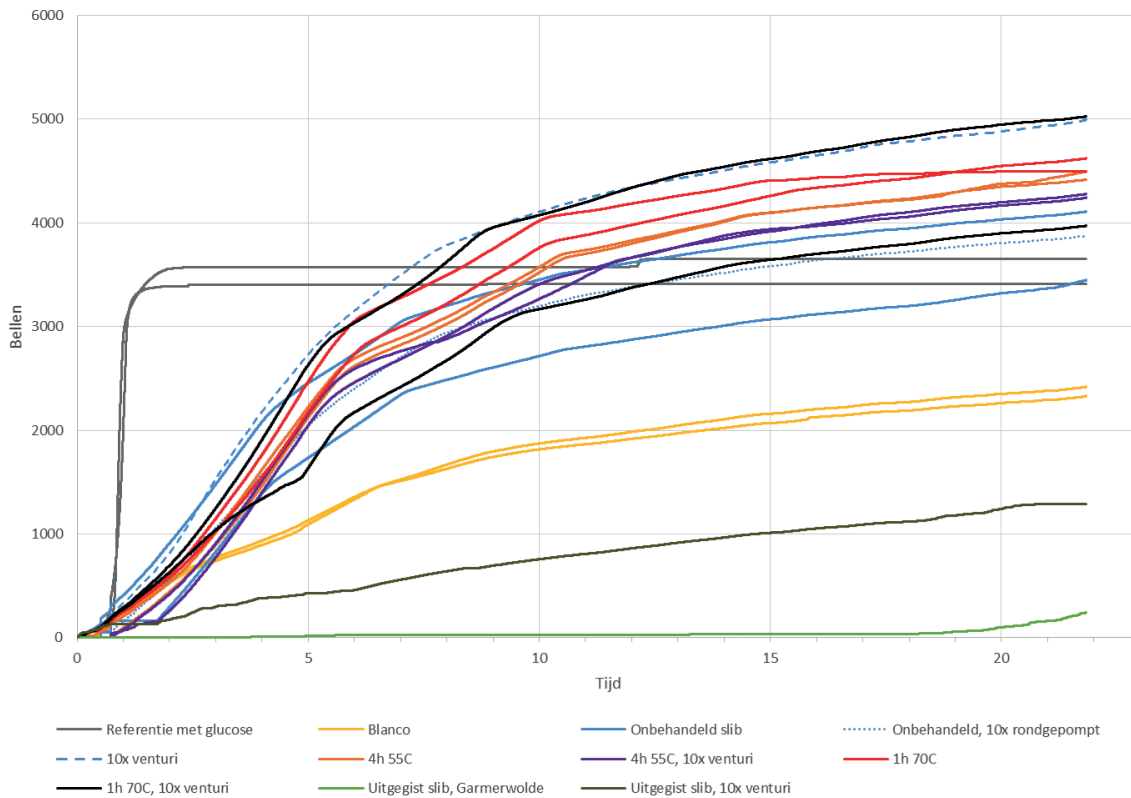
FIGUUR 14.11 MESOFIELE GISTING, RUWE DATA, NOVEMBER 2013



FIGUUR 14.12 THERMOFIELE GISTING, RUWE DATA, DECEMBER 2013



FIGUUR 14.13 MESOFIELE GISTING, RUWE DATA, DECEMBER 2013 – JANUARI 2014



## APPENDIX L

## CENTRAAT

Het effect wat de onderzochte voorbehandelingsmethoden hebben op de samenstelling van het centraat is onderzocht op basis van het sCZV-gehalte, het totale gebonden stikstof (T-N) en het orthofosfaatgehalte (Ortho-P). De resultaten staan weergegeven in onderstaande tabellen. Alle getallen zijn op twee manieren weergegeven: als absoluut getal in mg/L en als relatief getal als mg/L per gram behandelde droge stof.

TABEL L.1 CENTRAAT ANALYSE NA 12 DAGEN MESOFIELE GISTING, NOVEMBER 2013, DE LETTERS A EN B BETREFFEN DUPLO EXPERIMENTEN

Experiment	pH-eind	sCZV (mg/L)	sCZV (mg/L/g d.s.)	Ortho-P (mg/L)	Ortho-P (mg/L/g d.s.)
Onbehandeld A	7,2	1606	414	122	32
Onbehandeld B	7,2				
4h 55°C A	7,2	4826	1160	153	37
4h 55°C B	7,2				
4h 55°C +3x Venturi A	7,2	4527	1172	138	36
4h 55°C +3x Venturi B	7,2				
4h 55°C +10x Venturi A	7,2	4527	1173	138	36
4h 55°C +10x Venturi B	7,2				
1h 70°C A	7,2	3765	977	130	34
1h 70°C B	7,2				
1h 70°C +3x Venturi A	7,1	4043	1049	136	35
1h 70°C +3x Venturi B	7,1				
1h 70°C +10x Venturi A	7,1	4049	1051	136	35
1h 70°C +10x Venturi B	7,2				

Bij de eerste reeks batch experimenten is de centraat analyse uitgevoerd op de gecombineerde duplo's; hierdoor is er steeds alleen een meting voor de eerste duplo. De waardes in Tabel L. moeten daarom gezien worden als gemiddeldes. Wat op te maken valt uit de tabel is dat de behandelde monsters allemaal een toename laten zien in sCZV en in mindere mate Ortho-P. Het toevoegen van een venturi behandeling lijkt het sCZV-gehalte te doen toenemen, maar dit is niet gevonden voor de Ortho-P concentratie. De verzuurde monsters laten een sCZV concentratie zien die 11-18% hoger is dan de gepasteuriseerde varianten.



TABEL L.2 CENTRAAT ANALYSE NA 12 DAGEN THERMOFIELE GISTING, DECEMBER 2013, DE LETTERS A EN B BETREFFEN DUPLO EXPERIMENTEN

Experiment	pH-final	sCZV (mg/L)	sCZV (mg/L/g d.s.)	T-N (mg/L)	T-N (mg/L/g d.s.)	Ortho-P (mg/L)	Ortho-P (mg/L/g d.s.)
Onbehandeld A	7,9	3028	993	1385	454	138	45
Onbehandeld B	7,9	3191	1046	1467	481	118	39
Onbehandeld, 10x rondgepompt A	7,8	3070	1007	1085	356	125	41
Onbehandeld, 10x rondgepompt B	7,6	2899	951	1324	434	121	40
4h 55°C A	7,7	3753	1020	1357	369	131	36
4h 55°C B	7,7	3881	1055	1581	430	129	35
4h 55°C + 10x Venturi A	7,8	3834	1165	1560	474	137	42
4h 55°C + 10x Venturi B	7,6	3453	1050	1575	479	134	41
1h 70°C A	7,7	3508	1063	1729	524	120	36
1h 70°C B	7,6	3457	1048	1511	458	123	37
1h 70°C + 10x Venturi A	7,5	3387	1052	1288	400	135	42
1h 70°C + 10x Venturi B	7,6	3446	1070	1495	464	123	38

De thermofiele batch experimenten laten een kleine variatie zien in de sCZV concentratie voor de verschillende behandelingsvarianten na gisting. Ook voor de totale gebonden stikstofconcentratie en Ortho-P concentratie lijkt er geen duidelijk verband te zijn met de behandelingsmethode van het slib.

TABEL L.3 CENTRAAT ANALYSE NA 22 DAGEN MESOFIELE GISTING, DECEMBER 2013 - JANUARI 2014, DE LETTERS A EN B BETREFFEN DUPLO EXPERIMENTEN

Experiment	pH-final	sCZV (mg/L)	sCZV (mg/L/g d.s.)	T-N (mg/L)	T-N (mg/L/g d.s.)	Ortho-P (mg/L)	Ortho-P (mg/L/g d.s.)
Onbehandeld A	7,6	912	259	1359	385	137	39
Onbehandeld B	7,6	924	262	1364	387	128	36
Onbehandeld, 10x rondgepompt	7,6	920	261	1112	315	132	37
10x Venturi	7,6	1247	354	1756	498	135	38
4h 55°C A	7,7	1580	403	1617	413	155	39
4h 55°C B	7,7	1575	402	2109	538	137	35
4h 55°C + 10x Venturi A	7,7	1539	399	1585	410	149	39
4h 55°C + 10x Venturi B	7,7	1520	394	1577	408	152	39
1h 70°C A	7,7	1507	377	1547	387	136	34
1h 70°C B	7,7	1521	381	1649	413	139	35
1h 70°C + 10x Venturi A	7,6	1609	416	1600	413	146	38
1h 70°C + 10x Venturi B	7,6	1553	401	1562	403	137	35
Gistingsslib GMW	7,6	1442	412	1750	500	139	40
Gistingsslib GMW + 10x Venturi	7,7	1536	439	1699	485	131	38

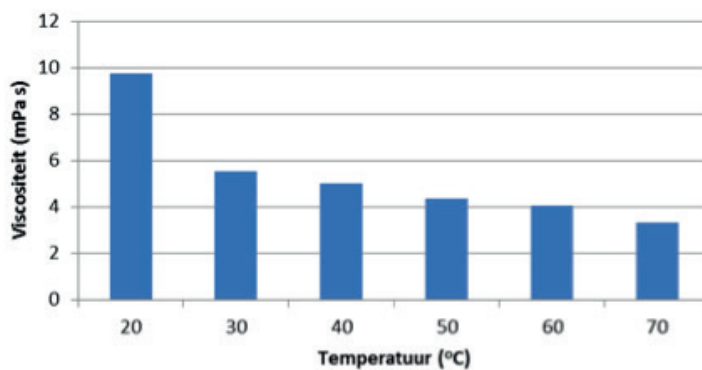
Na 22 dagen mesofiele gisting valt uit bovenstaande tabel op te maken dat het onbehandelde slib, zowel rondgepompt als niet, de laagste sCZV-concentratie heeft: ongeveer 260 mg/L per gram d.s.. Dit neemt toe voor alle voorbehandelde monsters, waarbij het hoogste sCZV-gehalte gemeten is bij gepasteuriseerd slib wat ook venturi behandeld is. Het totaal gebonden stikstof neemt voor de behandelde varianten relatief met 4 - 30% toe. Hier lijkt echter niet een lineair verband te bestaan met de intensiteit van de behandeling. Hetzelfde kan gezegd worden van de Ortho-P concentratie die voor alle varianten tussen de 34 - 40 mg/L per gram d.s. blijft.

## APPENDIX M

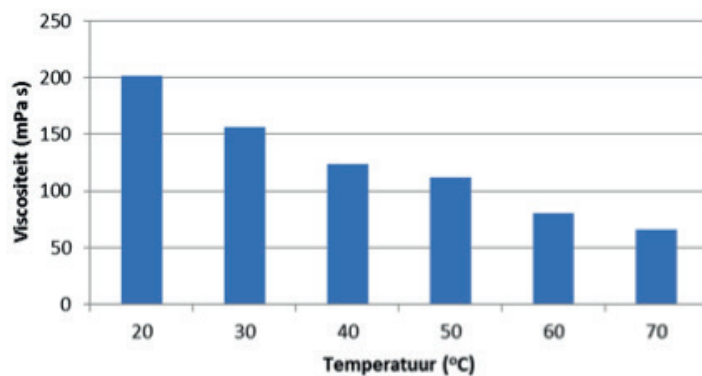
## VISCOSITEIT DATA

De viscositeit van het slib neemt over het algemeen af bij hogere temperaturen. De volgende figuren geven de viscositeit bij een afschuifsnelheid van  $1750 \text{ s}^{-1}$  weer bij verschillende temperaturen en percentages droge stof.

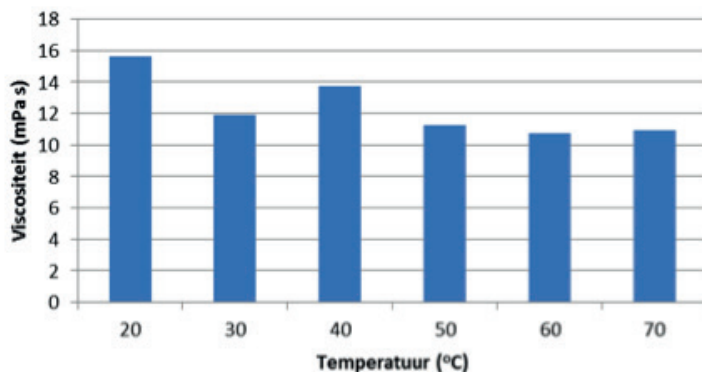
FIGUUR 14.14 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR,  $1750 \text{ S}^{-1}$ , 2% D.S.

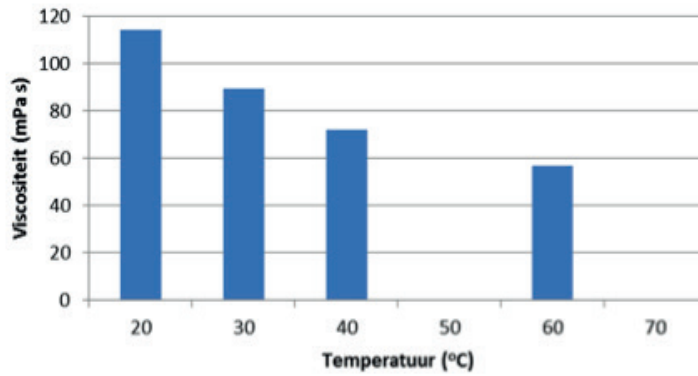
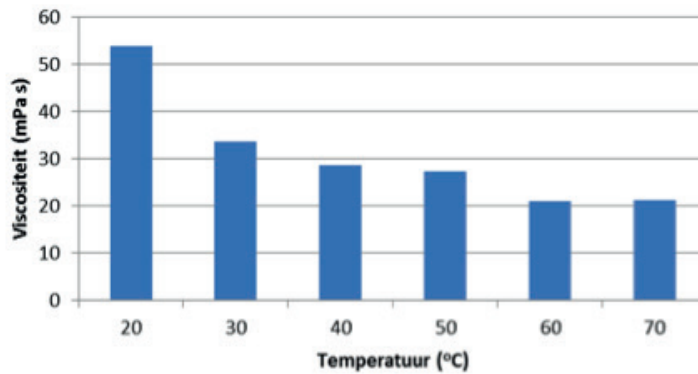


FIGUUR 14.15 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR,  $1750 \text{ S}^{-1}$ , 10% D.S.



FIGUUR 14.16 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR,  $1750 \text{ S}^{-1}$ , 4% D.S.



FIGUUR 14.17 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 1750 S<sup>-1</sup>, 8% D.S.FIGUUR 14.18 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 1750 S<sup>-1</sup>, 5,6% D.S.

De viscositeit is tevens gemeten bij verschillende afschuifspanningen. De staafdiagrammen zijn te vinden in Appendix C. De waardes van deze metingen staan samengevat in onderstaande tabellen.

Uit de staafdiagrammen valt op te maken dat de viscositeit van slib afneemt naarmate de temperatuur toeneemt. Ook hierbij valt een exponentieel verband op te merken als functie van het droge stofgehalte, waarbij de viscositeit sneller afneemt bij slib met een lager droge stofgehalte. Bij een droge stofgehalte van 2 wt.% en 4 wt.% is deze afname minder goed waar te nemen dan bij hogere droge stofgehaltenes, mogelijk omdat de onderlinge verschillen kleiner zijn dan bij hogere droge stofgehaltenes. Voor de praktijk installatie moet daarom in hogere mate rekening gehouden worden met slib viscositeit wanneer d.s. gehaltenes hoger dan 4% ingezet worden. Dit kan gedaan worden door de leidingdiameter te vergroten, danwel een ander type pomp te kiezen wanneer het drogestofgehalte hoger is.

De volgende tabellen geven de viscositeit als functie van percentage d.s. en temperatuur.

TABEL M.1 VISCOSITEIT BIJ SHEAR RATE  $1750 \frac{1}{5}$  (MPA S)

T (°C)	Percentage droge stof				
	2%	4%	5,6%	8%	10%
20	9,8	15,6	53,8	114,2	201,5
30	5,6	11,9	33,5	89,2	155,9
40	5,0	13,7	28,7	72,0	123,8
50	4,4	11,2	27,3		111,9
60	4,1	10,7	21,1	56,7	80,0
70	3,3	11,0	21,3		65,7

TABEL M.2 VISCOSITEIT BIJ SHEAR RATE  $109 \frac{1}{5}$  (MPA S)

T (°C)	Percentage droge stof				
	2%	4%	5,6%	8%	10%
20	14,7	53,4	412,3	1041,8	2173,2
30	12,6	47,3	185,5	602,6	1197,5
40	10,9	60,0	158,8	478,3	907,2
50	10,2	52,7	154,4		1227,2
60	8,3	51,6	130,8	387,0	610,3
70	8,6	51,8	131,6		441,5

TABEL M.3 VISCOSITEIT BIJ SHEAR RATE  $9,6 \frac{1}{5}$  (MPA S)

T (°C)	Percentage droge stof				
	2%	4%	5,6%	8%	10%
20	60,7	255,8	3029	8786	18714
30	46,6	246,7	1278	5216	10422
40	42,2	301,1	1055	4036	7290
50	44,2	294,0	1009		8952
60	28,5	303,5	851	3206	5036
70	31,9	240,8	472		4123

TABEL M.4 VISCOSITEIT BIJ SHEAR RATE  $0,85 \frac{1}{5}$  (MPA S)

T (°C)	Percentage droge stof				
	2%	4%	5,6%	8%	10%
20	320	1074	17854	42917	85265
30	186	901	5193	20308	39519
40	163	1060	4193	16592	29863
50	241	960	3984		47866
60	98	984	3867	11533	19805
70	122	1247	3590		24747

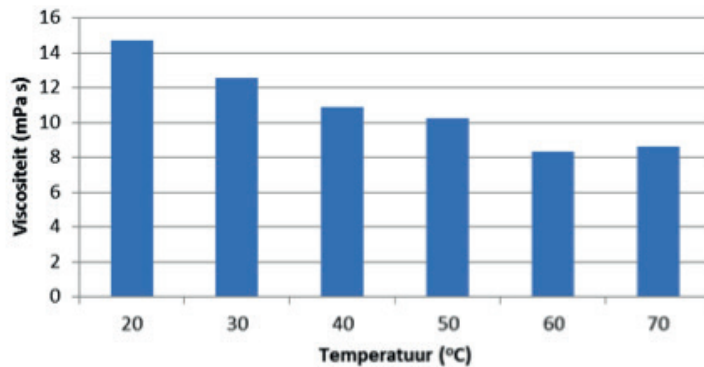
Op basis van bovenstaande figuren en tabellen is op meerdere manieren het verband aange-  
toond tussen de afschuifsnelheid, temperatuur, en het d.s. gehalte van het slib. Hieruit valt te  
concluderen dat slib minder weerstand tegen verpompen vertoont bij hogere temperaturen,  
bij hogere snelheden, en bij lagere droge stofgehaltes.

Voor het pasturi-destructie project valt te concluderen dat op labschaal hogere droge stofge-  
haltes moeilijk te verpompen zullen zijn zonder krachtige pompen, maar dat zodra het slib in  
beweging is een vernauwing zoals die in een venturi waarschijnlijk niet voor problemen zal

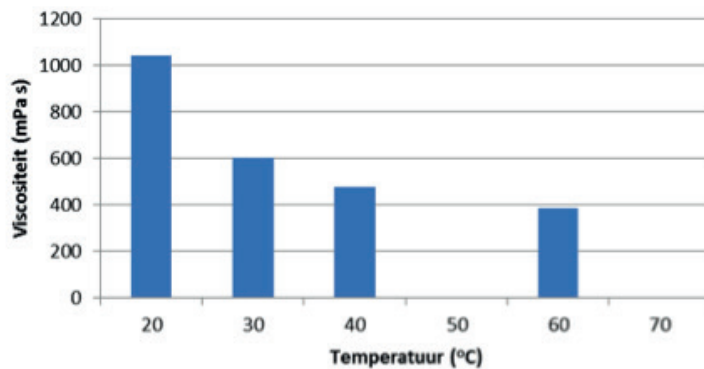
zorgen doordat de snelheid van het slib tegelijkertijd toeneemt. Daarnaast valt op te maken dat eventuele temperatuurbehandelingen vooraf een gunstig effect op het systeem kunnen hebben doordat bij een hogere temperatuur de viscositeit van het slib ook afneemt.

De volgende figuren geven de viscositeit bij een afschuifsnelheid van  $109 \text{ s}^{-1}$  weer bij verschillende temperaturen en percentages droge stof.

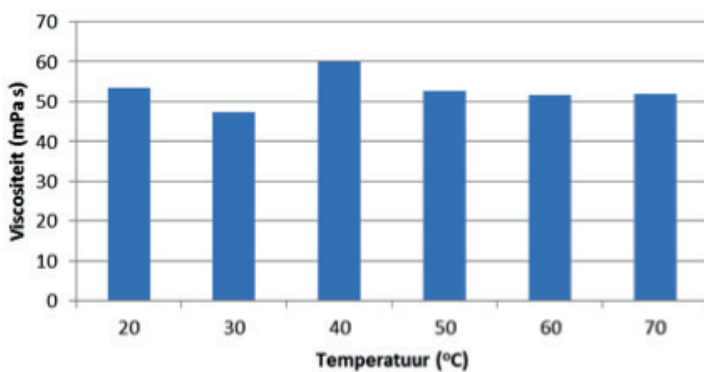
FIGUUR 14.19 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERAATUUR,  $109 \text{ s}^{-1}$ , 2% D.S.

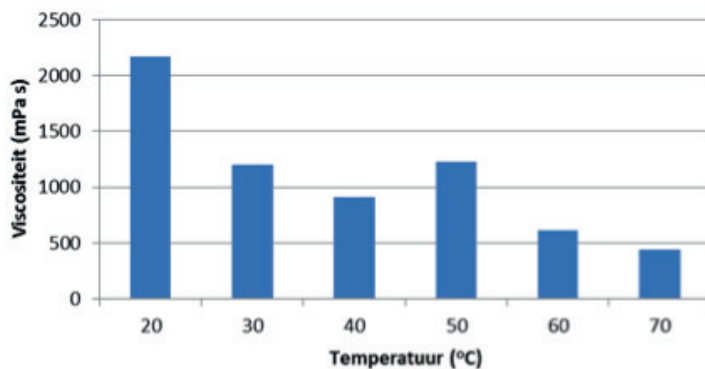
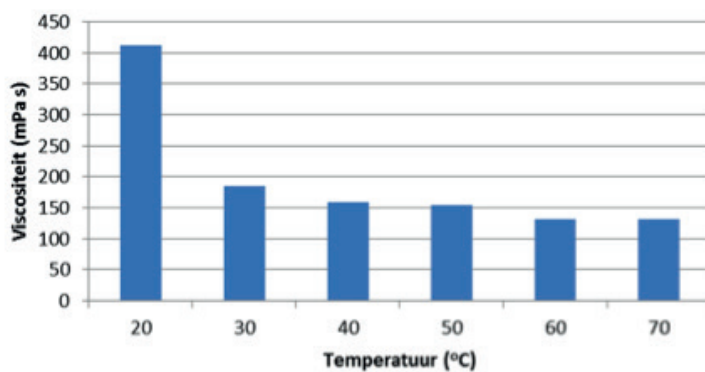


FIGUUR 14.20 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERAATUUR,  $109 \text{ s}^{-1}$ , 8% D.S.

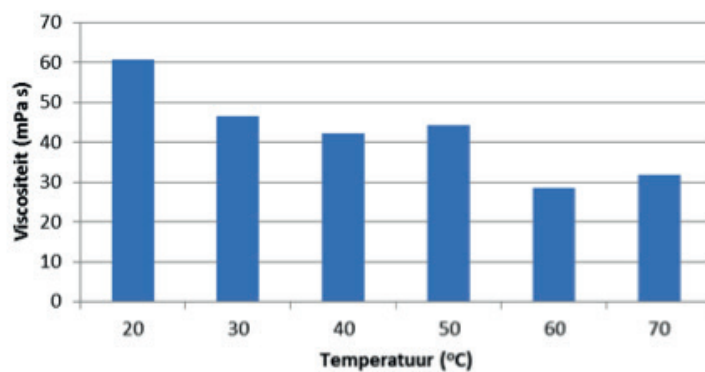


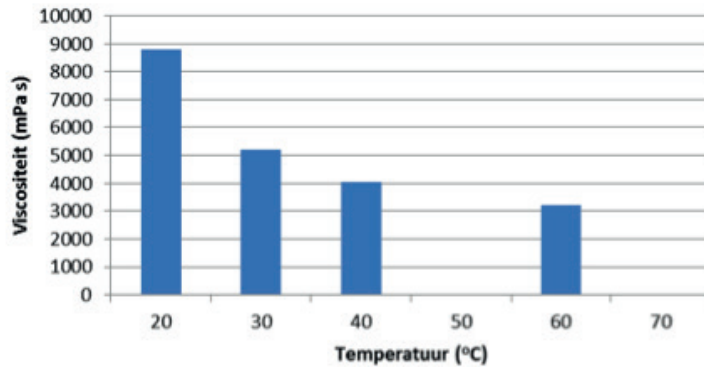
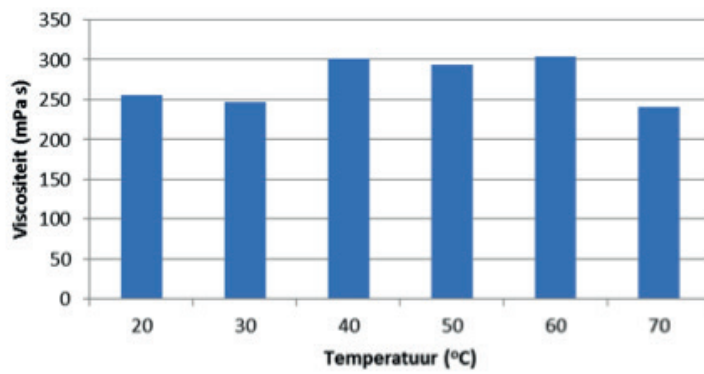
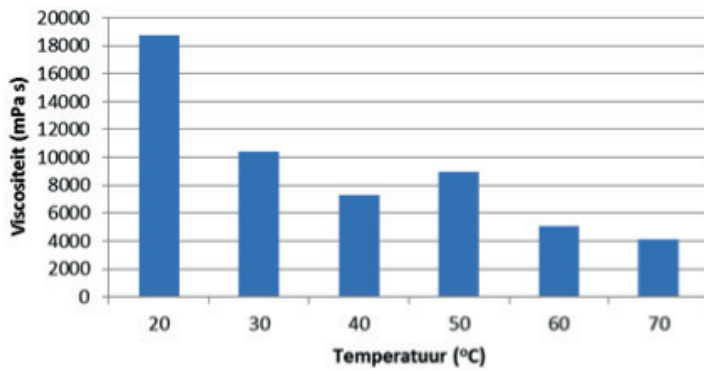
FIGUUR 14.21 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERAATUUR,  $109 \text{ s}^{-1}$ , 4% D.S.

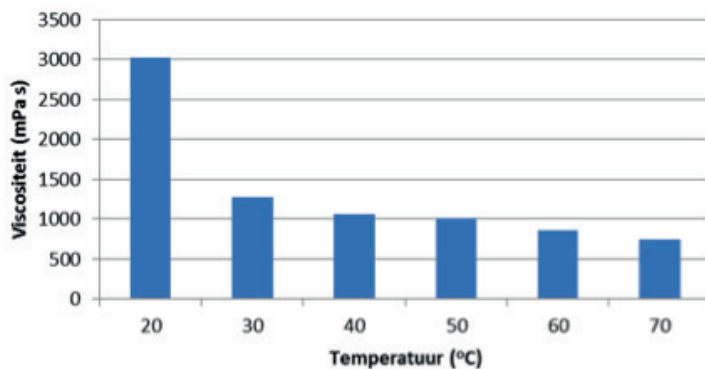


FIGUUR 14.22 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 109 S<sup>-1</sup>, 10% D.S.FIGUUR 14.23 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 109 S<sup>-1</sup>, 5,6% D.S.

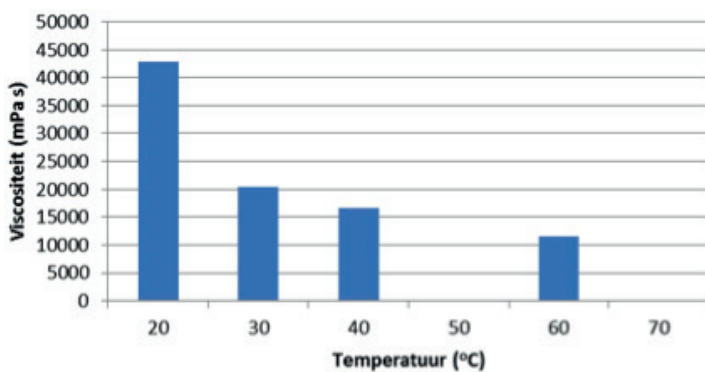
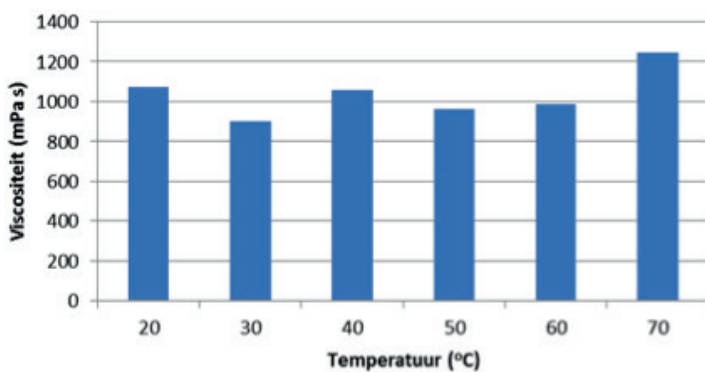
De volgende figuren geven de viscositeit bij een afschuifsnelheid van 9,6 s<sup>-1</sup> weer bij verschillende temperaturen en percentages droge stof.

FIGUUR 14.24 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 9,6 S<sup>-1</sup>, 2% D.S.

FIGUUR 14.25 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR,  $9,6 \text{ S}^{-1}$ , 8% D.S.FIGUUR 14.26 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR,  $9,6 \text{ S}^{-1}$ , 4% D.S.FIGUUR 14.27 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR,  $9,6 \text{ S}^{-1}$ , 10% D.S.

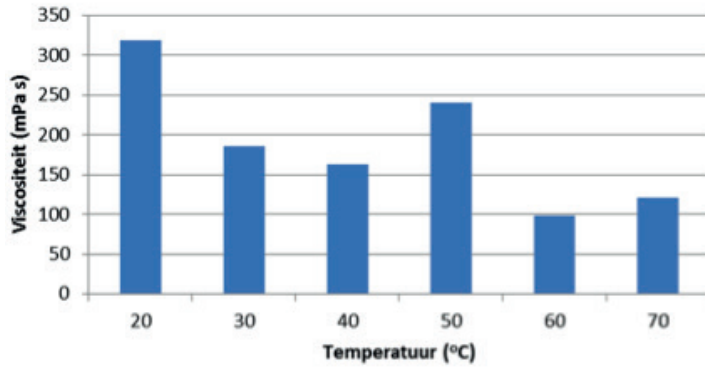
FIGUUR 14.28 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 9,6 S<sup>-1</sup>, 5,6% D.S.

De volgende figuren geven de viscositeit bij een afschuifsnelheid van 109 s<sup>-1</sup> weer bij verschillende temperaturen en percentages droge stof.

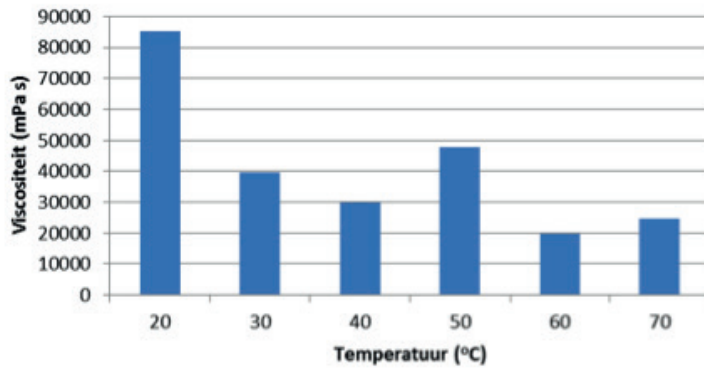
FIGUUR 14.29 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 0,85 S<sup>-1</sup>, 8% D.S.FIGUUR 14.30 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 0,85 S<sup>-1</sup>, 4% D.S.



FIGUUR 14.31 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 0,85 S<sup>-1</sup>, 2% D.S.



FIGUUR 14.32 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 0,85 S<sup>-1</sup>, 10% D.S.



FIGUUR 14.33 VISCOSITEIT SLIB TEGEN TEMPERATUUR, 0,85 S<sup>-1</sup>, 5,6% D.S.

