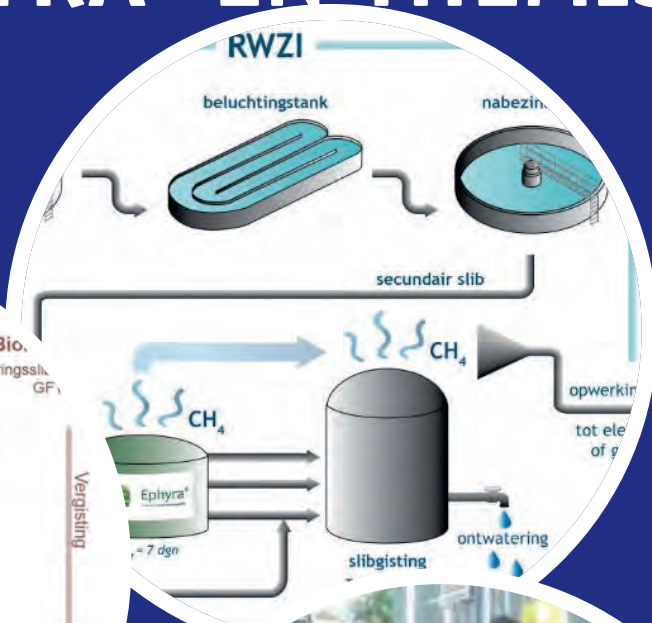
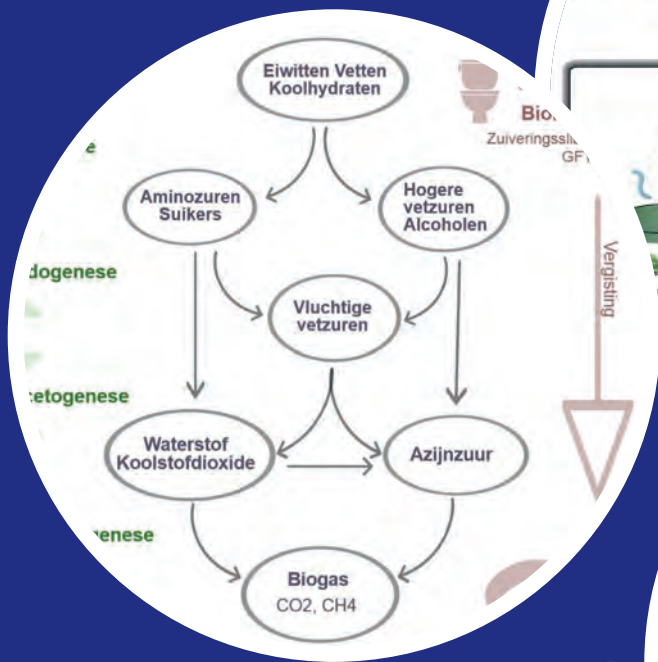


# TOEPASSING VAN NIEUWE GISTINGSCONCEPTEN EPHYRA<sup>®</sup> EN THEMISTA<sup>®</sup>



TOEPASSING VAN NIEUWE GISTINGSCONCEPTEN  
EPHYRA® EN THEMISTA®

RAPPORT

2016

34

ISBN 978.90.5773.737.4



# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

## AUTEURS

André Visser  
Saskia Moll

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Leo van Efferen / Ben Roelfzema – Waterschap Zuiderzeeland  
Alex Sengers – Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpernerwaard  
Coert Petri Waterschap Rijn en IJssel  
Merle de Kreuk - TUDelft  
Sergio Gretna / Sjors Dilven – Logisticon Water Treatment B.V.  
Bart Kupers – Endress+Hauser B.V.  
Cora Uijterlinde – STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau  
STOWA STOWA 2016-34  
ISBN 978.90.5773.737.4

**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. De Nederlandse waterschappen zoeken nog steeds naar alternatieven om efficiëntie en investeringskosten te verbeteren. Twee nieuwe technologieën zijn Ephyra, een geavanceerde propstroomgisting en Themista, een thermisch chemische slibvoorbehandeling.

Deze technologieën zijn uitgebreid getest op labschaal en in de periode 2014-2015 ook op pilotschaal. Hieruit blijkt dat Ephyra ca. 25% extra organische droogstof afbraak realiseert dan een conventionele mesofiele gisting met een vergelijkbare verblijftijd. Tevens neemt de ontwatering toe waardoor er minder slib hoeft te worden afgevoerd. Themista realiseert 15% extra organische droogstof afbraak en ook de ontwatering van het slib verbetert. De business case van beide technologieën is interessant en lijkt op basis van de verkregen kentallen over het algemeen vergelijkbaar of beter dan van bijvoorbeeld TDH. Met name voor kleinschalige toepassingen (< 500.000 ie slib) zijn de technologieën concurrerend.

Waterschap Zuiderzeeland gaat de eerste Ephyra realiseren op de rwzi Tollebeek. Deze wordt in 2017 gebouwd worden en is operationeel vanaf begin 2018. Het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard overweegt om een Themista op de rwzi Kralingseveer te realiseren. Deze zal ook in 2018 operationeel zijn.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

## **INNOVEREN MET SLIBGISTING**

Voor lange tijd heeft het slibgistingproces in de Nederlandse situatie een lage prioriteit gekend aangaande de ontwikkeling en toepassing van innovatieve oplossingen. Vanaf 2010 hebben echter meerdere initiatieven gezorgd voor een nieuwe impuls in de ontwikkeling van het slibgistingproces.

- Vanuit het kader van de Meerjarenaafspraken Energie (MJA3) heeft slibgisting meer aandacht gekregen als procesonderdeel voor het verhogen van de energie-efficiency op een RWZI.
- De waterschappen hebben met elkaar het gedachtegoed van de Energiefabriek ontwikkeld en daarin heeft de slibgisting een prominente positie ingenomen.
- Meerdere waterschappen hebben besloten de slibverwerking te centraliseren met als resultaat een stijging in het aantal projecten voor de optimalisatie en/of uitbreiding van de slibgisting.

Inmiddels zijn er meerdere nieuwe en verder ontwikkelde technologieën op de markt gebracht. Meest opvallende technieken zijn thermische drukhydrolyse en thermofiele gisting. Verder is er veel aandacht voor het toepassen van verschillende reductietechnieken die gericht zijn op de voorbehandeling van het slib.

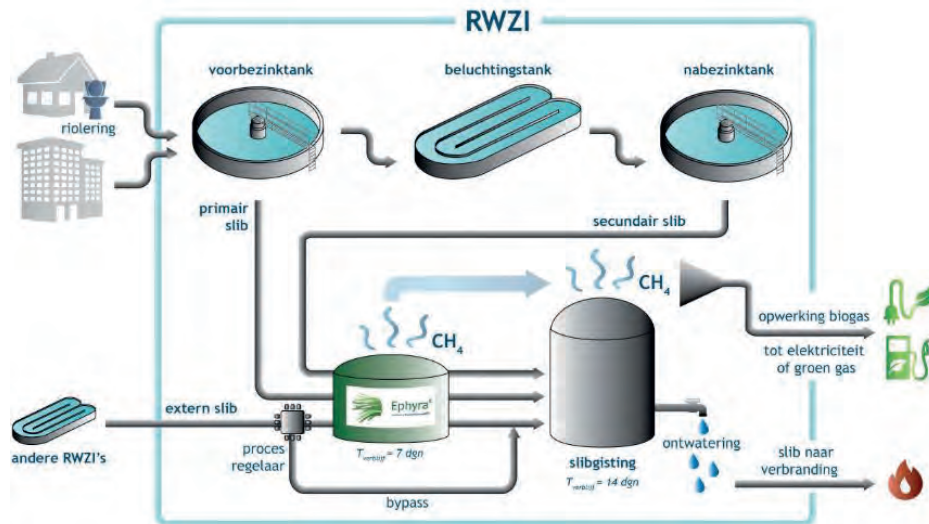
Royal HaskoningDHV is een paar jaar geleden eveneens begonnen met de ontwikkeling van twee nieuwe slibinnovaties, zijnde Ephyra® en Themista®. Hiervoor is een samenwerkingsverband opgezet tussen STOWA, Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard, Waterschap Zuiderzeeland, TU Delft, Logisticon Water Treatment, Endress+Hauser en Royal HaskoningDHV. Beide technologieën beogen meer slibafbraak en meer biogasproductie als opstap naar een meer energie-efficiënte of energieneutrale afvalwaterzuivering. Na eerst een verkennende fase met experimenten op laboratoriumschaal, heeft in de periode 2014 - 2015 pilotonderzoek plaatsgevonden voor Ephyra® op de RWZI Tollebeek en voor Themista® op de RWZI Kralingseveer. In dit rapport wordt verslag gedaan van beide fasen.

## **EPHYRA® TECHNOLOGIE**

Het Ephyra® concept is afgeleid van de verticale propstroomvergister die in Duitsland op praktijkschaal wordt toegepast. Het Duitse concept is technisch en regeltechnisch aangepast en geoptimaliseerd om de technologische prestaties te verbeteren.

FIGUUR 1

POSITIONERING VAN HET EPHYRA® CONCEPT OP DE RWZI



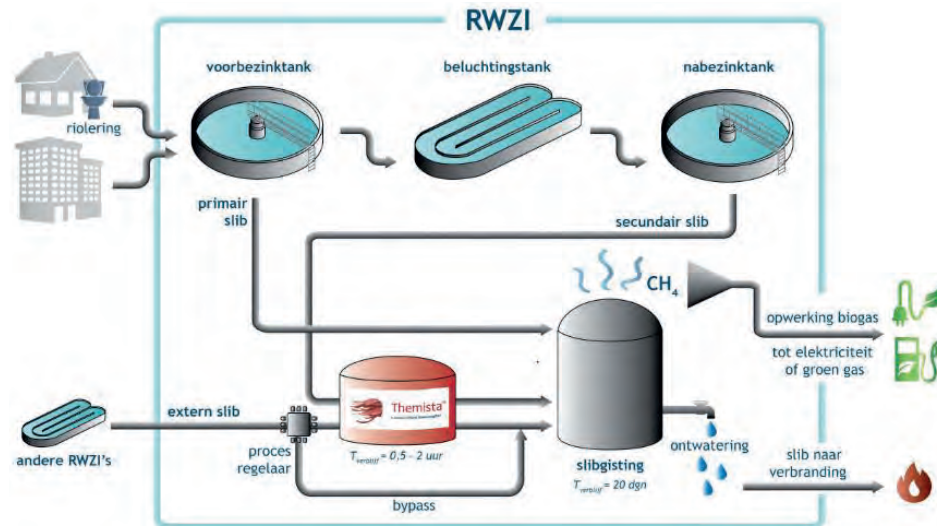
Technologisch principe van het concept bestaat uit een aantal (twee tot vier) in serie geschakelde reactoren met een korte verblijftijd (gezamenlijk zes tot acht dagen), gevolgd door een volledig gemengde gisting met een verblijftijd van circa 14 dagen. Op deze manier is het mogelijk de verschillende stappen van het gistingsproces gescheiden van elkaar te laten plaatsvinden. Bij de traditionele volledig gemengde gisting verlopen de deelprocessen gelijktijdig en is er sprake van suboptimale condities voor elk deelproces. Met de gekozen propstroomconfiguratie bij de Ephyra® treedt de onderlinge beïnvloeding van processen minder op en is het mogelijk de deelprocessen onafhankelijk van elkaar te optimaliseren. Dit resulteert in een hogere slibafbraak en biogasproductie.

#### THEMISTA® TECHNOLOGIE

Bij het Themista® concept wordt het secundaire slib voorbehandeld om de afbreekbaarheid van het slib te verbeteren. De voorbehandeling is een gecombineerde thermische (60 - 80°C) en chemische behandeling ( $O_3$  of  $H_2O_2$ ). Naast een direct effect op de afbreekbaarheid is het Themista® concept tevens gericht op een positieve beïnvloeding van de procesomstandigheden. Viscositeit van zuiverings-slib is bijvoorbeeld een parameter die lang onderschat is bij de procesvoering van slibgistingprocessen. Met Themista® wordt de viscositeit verbeterd met een gunstig effect op onder meer de mengprocessen in de gistingstank. De combinatie aan effecten resulteert in een hogere slibafbraak en biogasproductie.

FIGUUR 2

POSITIONERING VAN HET THEMISTA® CONCEPT OP DE RWZI



### ONDERZOEKSPROGRAMMA

Het onderzoek bestond uit twee fases: (I) labonderzoek en (II) pilotonderzoek. Het labonderzoek behelsde batchtesten en onderzoek in 20 liter continu reactoren. Het pilotonderzoek omvatte vergelijkend onderzoek waarbij de prestaties van Ephyra® en Themista® zijn vergeleken met een referentiereactor. De schaalgrootte van het pilotonderzoek bedroeg circa 20 m<sup>3</sup>.

De pilotreactoren zijn gedurende het onderzoek bedreven met eerst een periode van constante aanvoer en vervolgens een periode met verhoogde aanvoer zoals ook in de praktijk kan worden verwacht (piekbedrijf). Voordeel van het pilotonderzoek was dat vanwege de gehanteerde schaalgrootte het mogelijk is geweest om representatieve ontwateringstesten uit te voeren met een mobiele centrifuge op praktijkschaal.

Bij het pilotonderzoek op de RWZI Tollebeek is er voor gekozen om, ten behoeve van het opstellen van een business case, de referentiereactor af te stemmen op de huidige situatie en de Ephyra® reactor op de toekomstige situatie. Dit heeft er toe geleid dat de samenstelling van de slibaanvoer van beide reactoren niet identiek was. De referentiereactor werd namelijk gevoed met alleen primair en secundair slib van de RWZI Tollebeek en de Ephyra® werd tevens gevoed met secundair slib van de RWZI Lelystad. Daarmee was de afbreekbaarheid van het slibmengsel voor de referentiereactor hoger dan voor de Ephyra® reactor. Voor het opstellen van een transparante business case was dit wenselijk. Nadeel van deze aanpak was dat geen pure vergelijking kon worden gemaakt om vast te stellen in hoeverre de Ephyra® technologie presteert ten opzichte van een traditionele slibgisting onder verder identieke procesomstandigheden. Om dit te kunnen ondervangen is in het labonderzoek een situatie gecreëerd waarbij beide systemen wel met dezelfde slibsamenstelling zijn gevoed.

### RESULTATEN EPHYRA®

Tijdens het labonderzoek is een representatieve vergelijking gemaakt tussen het functioneren van een Ephyra® reactor en de referentiereactor waarbij beide systemen zijn gevoed met slib van Lelystad en Tollebeek. Hieruit bleek dat in de Ephyra® circa 10% drogestof (DS) absoluut meer werd afgebroken. Waar bij de referentiereactor een DS-afbraak van 39 - 40% haalbaar was, presteerde de Ephyra® met 49 - 50% duidelijk beter. Deze afbraakpercentages zijn vergelijkbaar met gerapporteerde prestaties van thermische drukhydrolyse.

Het verschil in werkingsprincipe is dat thermische drukhydrolyse een techniek is gericht op voorbehandeling en Ephyra® een optimalisatie is van het traditionele mesofiele vergistingsproces.

Zoals eerder is aangegeven dient voor de interpretatie van de resultaten van de pilotinstallatie rekening te worden gehouden met het feit dat de referentie en Ephyra® reactor zijn gevoed met een verschillend slibmengsel. Tabel 1 geeft een samenvatting van de condities tijdens het uitgevoerde onderzoek.

TABEL 1 CONDITIES PILOTONDERZOEK EPHYRA®

Parameter		Ephyra®	Referentie
Verblijftijd	dag	7,5 + 13,5 *)	26,5
Belasting	kg DS/m <sup>3</sup> d	2,5	2
Temperatuur	°C	ca 35	ca 35
ingaaand slib			
secundair slib	% van totaal	61	33
primaair slib	% van totaal	39	67

\*) 7,5 dag Ephyra® + 13,5 dag nageschakelde vergister

In de Ephyra® pilotreactor werd circa 3% droge stof absoluut meer afgebroken dan de referentie. Deze extra afbraak is ondanks de kortere verblijftijd, een hogere droge-stofbelasting, en een aanzienlijk lager aandeel primair slib in de voeding van de Ephyra® pilotreactor. In Figuur 3 zijn de resultaten van lab- en pilotonderzoek samengevat. Hieruit blijkt duidelijk de betere slibafbraak in Ephyra® vergeleken met de referentiereactor.

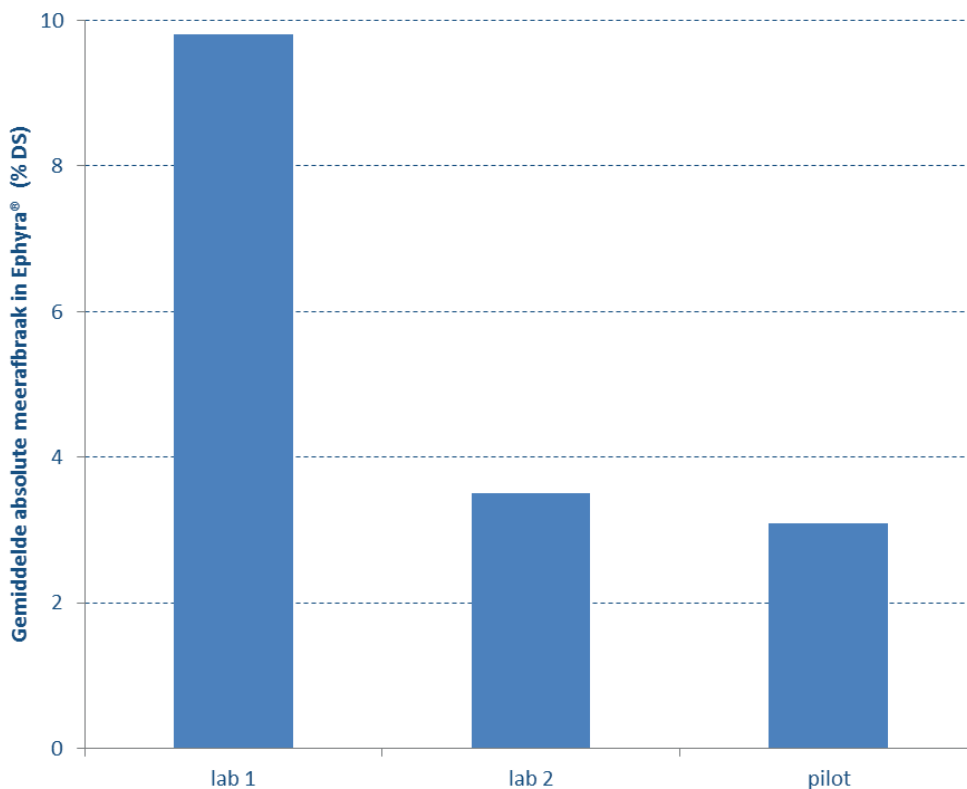
Uit onderzoek naar piekbelastingen bleek dat Ephyra® tijdens en na piekaanvoer stabiel functioneerde. Bij de uitgevoerde testen waarbij de piekbelasting varieerde van één dag tot één week bleef de droge-stofafbraak gelijk. Ook de pH in de verschillende Ephyra® compartimenten bleef stabiel. Tijdens piekaanvoer werd de verblijftijd verlaagd van 21 naar 16 dagen.

FIGUUR 3

GEMETEN ABSOLUTE MEERAFBRAAK IN EPHYRA® IN LAB EN PILOT ONDERZOEK

LAB 1: SLIBSAMENSTELLING VOEDING EPHYRA®/REFERENTIE GELIJK

LAB 2 EN PILOT: SLIBSAMENSTELLING VOEDING EPHYRA®/REFERENTIE CONFORM TABEL 1





Uit het onderzoek is voor de werking en de betere prestatie van Ephyra® de werkhypothese volgens Tabel 2 opgesteld.

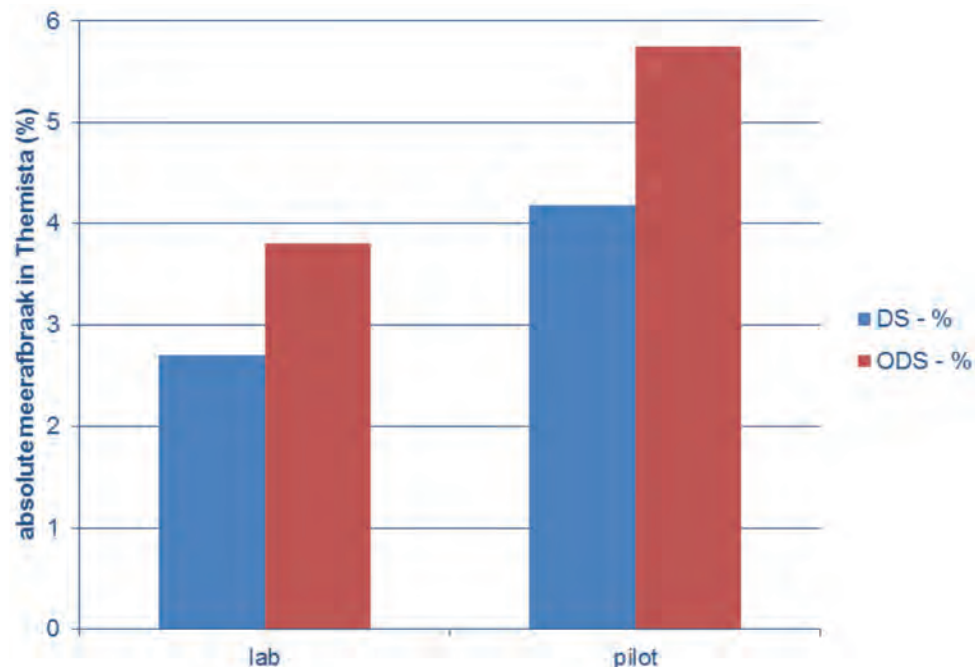
TABEL 2 WERKHYPOTHESE EPHYRA®

Hypothese	Opmerking
Effectievere slibverblijftijdsspreiding	In een volledige menger (conventionele gisting) is de verblijftijd voor een deel van het slib korter dan de hydraulische verblijftijd. Ephyra® is gebaseerd op het propstroom principe; de slibverblijftijd is dan gelijk aan de hydraulische verblijftijd
Snellere omzettingssnelheden	Theoretisch zijn de omzettingssnelheden in een propstroomreactor (Ephyra®) hoger dan in een volledig gemengd systeem. In de pilotplant werd 70 - 80% van de totale slibafbraak gerealiseerd in de vier Ephyra® compartimenten (verblijftijd 7,5 dag). De resterende 20 - 30% werd afgebroken in de nageschakelde volledig gemengde gistingstank.
Fasescheiding	In de pilotplant trad duidelijk fasescheiding op. Hydrolyse en verzuring treden voornamelijk op in de eerste compartimenten terwijl methaanvorming in de latere compartimenten en nageschakelde vergister optreedt.
Betere slibontwatering	Uit de ontwateringstesten bleek dat slib uit de Ephyra® pilotreactor beter ontwaterd dan slib uit de referentiereactor.

### RESULTATEN THEMISTA®

Tijdens de onderzoeksperiode werden de referentie en de Themista® met hetzelfde slib gevoed. Ook de belasting en verblijftijd van beide systemen was nagenoeg gelijk. Figuur 2 geeft de meerafbraak in de Themista®. De gemiddelde meerafbraak in Themista®-behandeld slib bedroeg bijna 6% organische drogestof (absoluut). De gemeten biogasproducties bevestigen de gemeten meerafbraak in de Themista®. De gemeten biogasproductie in de Themista® reactor was gemiddeld 15 á 20% (relatief) hoger. De betere slibafbraak in de Themista® pilot reactor is ook op het lab gemeten (Figuur 4).

FIGUUR 4 GEMETEN ABSOLUTE MEERAFBRAAK IN THEMISTA® IN LAB EN PILOT ONDERZOEK



Uitgevoerde testen met piekaanvoer op Themista® en de referentiereactor lieten geen verschil zien in de prestaties van beide systemen. De meerafbraak van Themista® bleef gelijk aan de waarde gemeten bij een constante slibaanvoer. Viscositeitsmetingen lieten een duidelijk effect van Themista® behandeling zien. De viscositeit na Themista® behandeling was aanzienlijk lager dan voor de behandeling.

De uitgevoerde ontwateringstesten laten een beter ontwateringsresultaat van uitgedist slib na Themista® behandeling van circa 1 tot 1,5% drogestof zien. Ook bleek dat de PE-dosering voor Themista® behandeld slib niet hoger is dan voor de referentiereactor.

Uit het onderzoek is voor de werking en de betere prestatie van Themista® de werkhypothese volgens Tabel 3 opgesteld.

TABEL 3 WERKHYPOTHESE THEMISTA®

Hypothese	Opmerking
Betere en sneller slibafbraak	In lab en pilottesten is een betere slibafbraak van Themista® behandeld slib aangetoond. Batch testen op labschaal toonden duidelijk aan dat de afbraak ook aanzienlijk sneller verliep.
Verlaging viscositeit	Door de lagere viscositeit worden meng- en pompeigenschappen van het behandelde slib gunstiger. Dit vermindert elektrisch energieverbruik en verbetert de stabiliteit.
Betere processtabiliteit	Een stabielere gedrag tijdens piekaanvoeren is in de pilottest niet daadwerkelijk aangetoond. Wel wordt binnen het ontwerp van Themista® uitgegaan van het uitvlakken van pieken in de aanvoer zodat deze minder fluctueert.

### FINANCIËLE VERGELIJKING

Voor een installatie van 300.000 i.e. met een centrale slibverwerking en een verwerkingscapaciteit van 3.100 ton DS per jaar primair slib en 6.200 ton DS/j secundair slib, zijn de bedrijfsvoeringskosten vergeleken (zie Tabel 4). Hieruit bleek dat Themista® leidt tot 279.000 €/j lagere kosten. Voor Ephyra® is deze 596.000 €/j.

TABEL 4 VERGELIJKING BEDRIJFSVOERINGKOSTEN EPHYRA®, THEMISTA®, EN DE REFERENTIE

	referentie	Themista®	Ephyra®	
energieopbrengst	-734.000	-824.000	-901.000	€/j
PE	558.000	526.000	500.000	€/j
FeCl <sub>3</sub>	68.000	73.000	77.000	€/j
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0	46.000	0	€/j
slibafzet	2.181.000	1.973.000	1.801.000	€/j
<b>totaal</b>	<b>2.073.000</b>	<b>1.794.000</b>	<b>1.477.000</b>	<b>€/j</b>
voordeel	0	279.000	596.000	€/j

Beide onderzochte technologieën leiden tot lagere bedrijfsvoeringskosten. De hoogte hiervan is afhankelijk van de schaalgrootte en specifieke kosten voor onder andere slibafzet, energie- en chemicaliëninkoop.

# DE STOWA IN HET KORT

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

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

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

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

# TOEPASSING VAN NIEUWE GISTINGSCONCEPTEN EPHYRA® EN THEMISTA®

## INHOUD

TEN GELEIDE  
SAMENVATTING  
DE STOWA IN HET KORT

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>THEORETISCHE BESCHOUWINGEN</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	Ephyra®	2
2.1.1	Algemeen	2
2.1.2	Functioneren Ephyra®	3
2.1.3	Modelleren Ephyra®	7
<b>2.2</b>	Themista®	7
2.2.1	Algemeen	7
2.2.2	Functioneren Themista®	8
2.2.3	Modelleren Themista®	9
<b>3</b>	<b>OPZET EN UITVOERING VAN HET ONDERZOEK</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	Algemeen	10
<b>3.2</b>	Onderzoeksvragen en doelstellingen	10
<b>3.3</b>	Labonderzoek	11
<b>3.4</b>	Pilotonderzoek	11
<b>4</b>	<b>MATERIAAL EN METHODEN</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	Labonderzoek	12
4.1.1	Algemeen	12
4.1.2	De referentie-installatie	13
4.1.3	Labonderzoek Ephyra®	13
4.1.4	Labonderzoek Themista®	14
<b>4.2</b>	Pilotonderzoek	14
4.2.1	De referentie-installatie	14
4.2.2	Ephyra® onderzoek bij Tollebeek	15
4.2.3	Themista® onderzoek bij Kralingseveer	17
<b>4.3</b>	Berekeningen en statistische dataverwerking	19

<b>5</b>	<b>RESULTATEN EPHYRA®</b>	<b>20</b>
5.1	Initiële modelberekeningen	20
5.2	Resultaten labonderzoek	21
5.3	Resultaten pilotonderzoek	22
5.3.1	Vergelijking Ephyra® en referentie vast debiet	22
5.3.2	Prestatie Ephyra® tijdens piekaanvoer.	27
5.3.3	Ontwateringstesten	28
5.3.4	Fosfaatneerslag en struvietvorming	29
5.3.5	Kenmerken Ephyra® technologie	30
5.4	Evaluatie Ephyra® onderzoek	36
5.5	Conclusies	36
<b>6</b>	<b>RESULTATEN THEMISTA®</b>	<b>38</b>
6.1	Initiële modelberekeningen	38
6.2	Resultaten labonderzoek	38
6.2.1	Batchtesten	38
6.2.2	Continu-proeven	39
6.3	Resultaten pilotonderzoek	41
6.3.1	Vergelijking Themista® en referentie fase 1	41
6.3.2	Vergelijking Themista® en referentie fase 2	42
6.3.3	Prestatie Themista® tijdens piekaanvoer	48
6.3.4	Viscositeit	49
6.3.5	Ontwateringstesten	49
6.4	Evaluatie Themista® onderzoek	50
6.5	Conclusies	51
<b>7</b>	<b>VERGELIJKING EN TOEPASSING OP PRAKTIJKSCHAAL</b>	<b>52</b>
7.1	Technologische uitgangspunten	52
7.2	Technologische vergelijking	53
7.3	Vergelijking bedrijfsvoeringkosten	53
7.4	Toepassing Themista® en Ephyra® technologie	54
<b>8</b>	<b>CONCLUSIES EN VERVOLG</b>	<b>56</b>
8.1	Ephyra®	56
8.2	Themista®	56
8.3	Vervolg	57
BIJLAGE 1	METHODIEK STATISCHE ANALYSE MEETRESULTATEN	58
BIJLAGE 2	RESULTATEN LABONDERZOEK EPHYRA® EN THEMISTA®	61
BIJLAGE 3	BETROUWBAARHEID ASMETINGEN, DROGESTOFMETINGEN EN ORGANISCHE DROGESTOFMETINGEN	76
BIJLAGE 4	RESULTATEN PIEKAANVOEREN EPHYRA®	79

# 1

## INLEIDING

Initiatieven zoals de Energiefabriek en de grondstoffenfabriek hebben geleid tot een hernieuwde aandacht voor slibgisting. Als gevolg hiervan zijn er nieuwe innovatieve slibgistingstechnologieën ontwikkeld waaronder Ephyra® en Themista®. Beide technologieën beogen meer slibafbraak en meer biogasproductie in een robuuste en kosteneffectieve installatie.

Ephyra® is een technologie, gebaseerd op propstroomvergisters, waarbij aanzienlijk meer organische stof afgebroken wordt dan in een conventionele vergister. Themista® is een thermisch-chemische voorbehandeling van secundair slib waardoor de biomassa-afbraak en de biogasopbrengst in de slibgisting toenemen.

Om het innovatieproces van Ephyra® en Themista® te stimuleren hebben de volgende partijen een samenwerkingsverband opgezet:

- STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer)
- Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard
- Waterschap Zuiderzeeland
- Royal HaskoningDHV
- TU Delft
- Logisticon Water Treatment
- Endress + Hauser

Dit rapport schetst een overzicht van de resultaten van het verrichte onderzoek naar Ephyra® en Themista®.

# 2

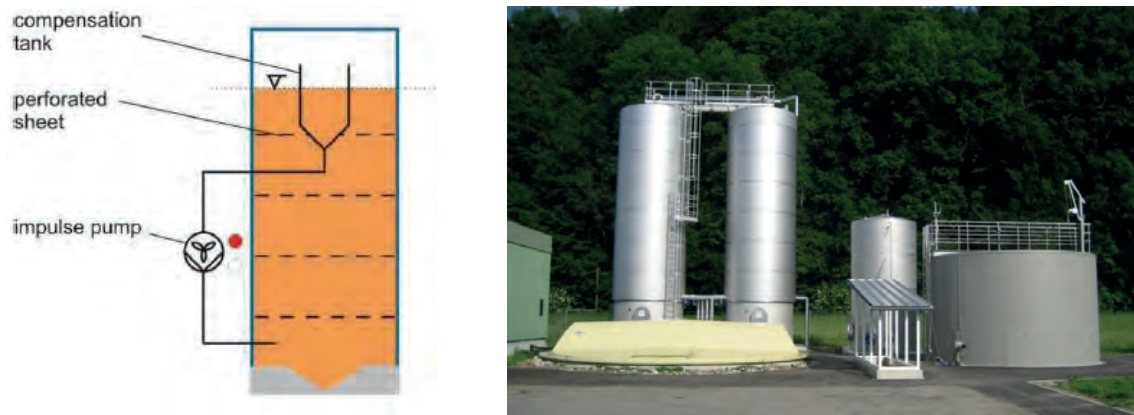
## THEORETISCHE BESCHOUWINGEN

### 2.1 EPHYRA®

#### 2.1.1 ALGEMEEN

Ephyra® is afgeleid van de propstroomreactor die op praktijkschaal wordt toegepast in Duitsland.

FIGUUR 2.1 PROPSTROOMREACTOR ONTWIKKELD DOOR FRAUNHOFER IGB IN DUITSLAND. REACTORPRINCIPE EN COMPARTIMENTERING (LINKS) EN PRAKTIJKINSTALLATIE BESTAANDE UIT 2 PROPSTROOMREACTOREN IN SERIE (RECHTS)



Uit Figuur 2.1 blijkt dat de Duitse propstroomreactor is opgebouwd uit meerdere compartimenten die ieder door een plaat van elkaar zijn gescheiden. Verder wordt er discontinu gerecirculeerd van het vierde naar het eerste compartiment. Deze recirculatie heeft tot doel om verstoppingen te voorkomen en de pH te regelen. In Duitsland zijn een aantal praktijkinstallaties operationeel (Zie Tabel 2.1).

TABEL 2.1 PRAKTIJKINSTALLATIES PROPSTROOMVERGISTERS DUITSLAND

RWZI	Afmetingen Propstroomvergisters
Wutoschingen	2 x 80 m <sup>3</sup> propstroomvergister
Schozachtal	1 x 280 m <sup>3</sup> propstroomvergister
Tauberbischofsgeim, Badem-Württemberg	2 x 360 m <sup>3</sup> propstroomvergister
Mittleres Glemstal, Leonberg	2 x 560 m <sup>3</sup> propstroomvergister
Heidelberg	2 x 680 m <sup>3</sup> propstroomvergister + 2 x 2.500 m <sup>3</sup> conventionele navergister

De Ephyra® pilotinstallatie in Tollebeek bestond uit vier horizontale in serie geschakelde reactoren (zie Figuur 2.2). De lab-opstelling bestond uit vier verticaal gestapelde compartimenten.

FIGUUR 2.2 EPHYRA® PILOTINSTALLATIE TOLLEBEEK (VIER REACTOREN IN SERIE)



Voor toepassing van Ephyra®-technologie in de praktijk zijn er twee opties:

- Uitbreiding bestaande gisting. In dit geval kan een Ephyra®-reactor worden voorgeschakeld aan een bestaande vergister. Typische verblijftijden zijn dan zes tot acht dagen (Ephyra®) en 12 – 14 dagen (bestaande vergister).
- Nieuwbouw slibgisting. In dit geval kan er gekozen worden voor een combinatie van een Ephyra®-reactor en een nageschakelde conventionele gisting of twee Ephyra®-reactoren in serie.

In de pilotplant is de combinatie Ephyra® met een nageschakelde reactor getest. In de verdere beschouwingen wordt hiervan uitgegaan.

### 2.1.2 FUNCTIONEREN EPHYRA®

De hypothese dat een Ephyra® reactor een beter gistingresultaat heeft dan een conventionele volledig gemengde gisting is gebaseerd op:

- hogere omzettingssnelheden;
- betere slibleeftijdsspreiding;
- fasescheiding;
- ongevoeligheid voor piekbelastingen;
- hogere slibleeftijd door ontkoppeling hydraulische en slibverblijftijd.

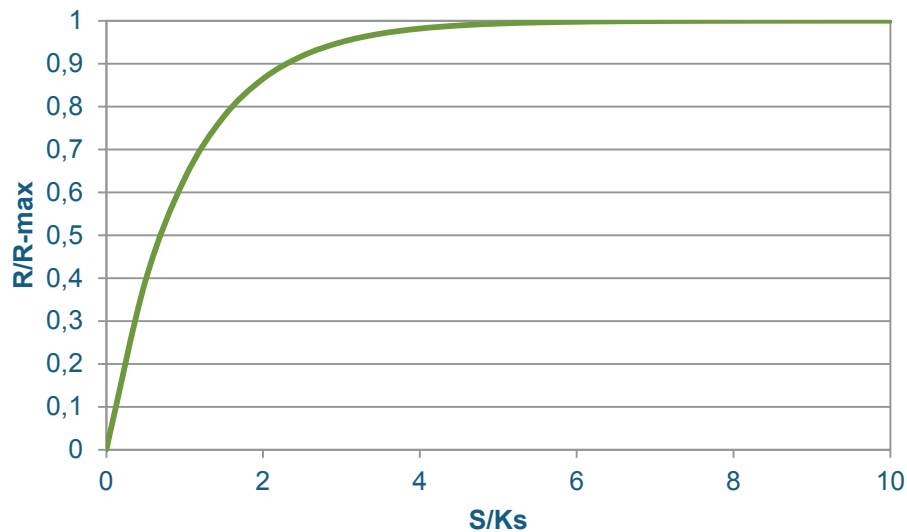
#### SNELLERE OMZETTINGSSNELHEDEN

De omzettingssnelheden in een gisting wordt vaak gemodelleerd met de Monod kinetiek.



FIGUUR 2.3

DE RELATIEVE OMZETTINGSSNELHEID ALS FUNCTIE VAN DE RELATIEVE SUBSTRAATCONCENTRATIE VOLGENS DE MONOD-KINETIEK.  $R =$  OMZETTINGSSNELHEID,  $S =$  SUBSTRAATCONCENTRATIE,  $K_S =$  HALFVERZADIGINGSCONSTANTE



In een volledig gemengde reactor zal de substraatconcentratie gelijk zijn aan de effluentconcentratie. Dit betekent dat de reactor bedreven wordt in het gebied met lagere substraatconcentraties en omzettingssnelheden. In een propstroomreactor is de substraatconcentratie aan het begin (eerste compartiment Ephyra®) hoog. De omzettingssnelheden zijn hier dus ook hoger. Al naar gelang het slib door de verschillende compartimenten van het systeem stroomt, zullen de substraatconcentratie en de omzettingssnelheden afnemen. In de nageschakelde reactor zijn de condities weer vergelijkbaar met een conventionele volledig gemengde gisting.

Hogere omzettingssnelheden kennen twee voordelen:

- hetzelfde gistingresultaat kan worden gehaald bij een kleiner volume;
- meer slibafbraak kan worden gehaald bij eenzelfde volume.

#### GUNSTIGER SPREIDING SLIBVERBLIJFTIJD

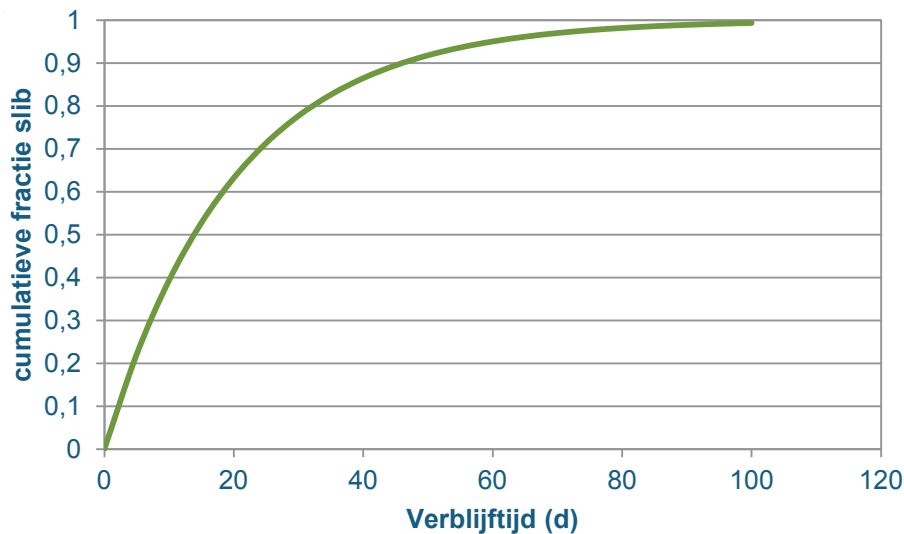
Normaliter wordt de theoretische verblijftijd in een gisting berekend als het volume van de gisting gedeeld door de aanvoer. In een gisting die bedreven wordt als een volledige menger zal een deel van het slib echter korter en een deel weer langer dan de theoretische verblijftijd in de reactor aanwezig zijn. Figuur 2.4 geeft deze spreiding in verblijftijd schematisch weer.

Uit Figuur 2.4 blijkt dat circa 2/3 van het slib een kortere verblijftijd heeft dan 20 dagen. 1/3 van het slib heeft een langere verblijftijd dan 20 dagen. Voor een perfecte propstroomreactor zou de slibverblijftijd voor al het slib 20 dagen zijn.

Aangezien de mate waarin slib in de gisting wordt afgebroken bepaald wordt door de slibverblijftijd, en de afbraak vooral bij kortere verblijftijden beduidend minder is, mag verwacht worden dat in een propstroomreactor met gelijk volume meer slib wordt afgebroken dan in een volledig gemengde reactor.

FIGUUR 2.4

VERBLIJFTIJD VAN HET SLIB IN EEN VOLLEDIG GEMENGDE REACTOR MET EEN HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD



Bovengenoemde berekening blijft natuurlijk een theoretische benadering. Een conventionele gisting is in werkelijkheid niet echt volledig gemengd. Ephyra® bestaat uit meerdere geroerde compartimenten in serie met een interne recirculatie gevolgd door een nageschakelde reactor en is daarmee geen perfecte propstroomreactor.

#### FASESCHIEDING

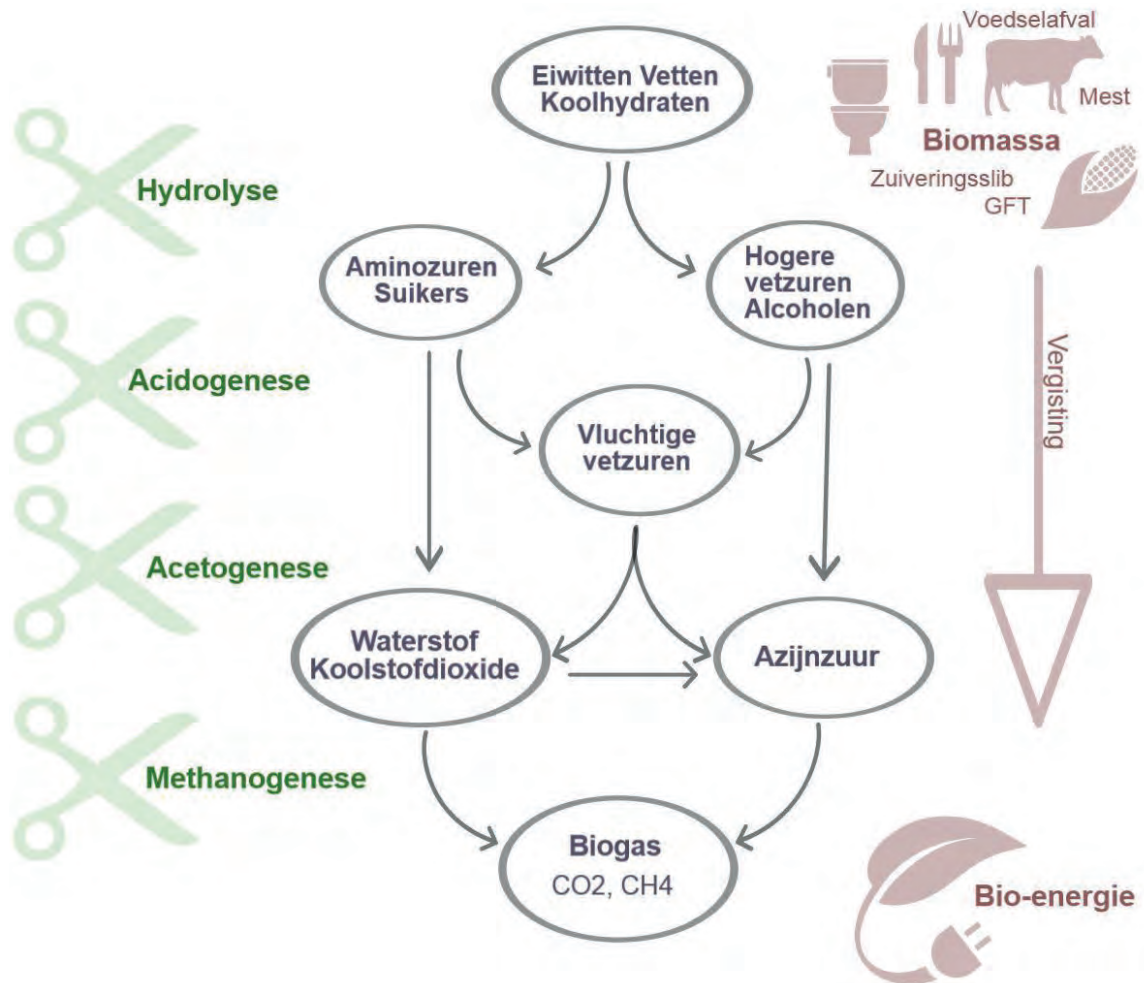
Anaerobe slibgisting is een complex proces opgebouwd uit de volgende stappen (zie Figuur 2.5):

- Hydrolyse, waarbij complexe verbindingen (vetten, eiwitten, koolhydraten) worden omgezet in aminozuren, suikers, hogere vetzuren en alcoholen.
- Acidogenese (of zuurvorming), waarbij vetzuren worden gevormd.
- Acetogenese, (of azijnzuurvorming) waarbij vetzuren worden omgezet in waterstofgas en azijnzuur. Om deze reactie goed te laten verlopen is het belangrijk dat het geproduceerde waterstofgas goed wordt weggevangen zodat de waterstofspanning laag blijft.
- Methanogenese (of methaanvorming), waarbij waterstofgas en azijnzuur worden omgezet in methaan.

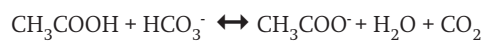
In een volledig gemengde reactor vinden alle bovengenoemde reacties simultaan plaats. Hierbij zal de traagste reactie de snelheid van de slibgisting bepalen. Omdat iedere reactie zijn eigen specifieke optimale condities kent is optimalisatie van het gistingsproces beperkt tot de optimalisatie van de snelheidsbepalende stap, de hydrolyse. Regeling van het proces zal in dit geval zodanig zijn dat de gehele keten van afbraakprocessen in evenwicht is.

In een Ephyra® reactor worden de verschillende processen meer sequentieel uitgevoerd. In het eerste compartiment treedt de hydrolyse en verzuring al grotendeels op terwijl verderop azijnzuurvorming en methaanvorming deels plaatsvinden. Aangenomen wordt dat hydrolyse in conventionele gisters snelheidsbepalend is. De hogere substraatconcentraties vergeleken met een conventionele gister in de eerste Ephyra® tank versnelt daarmee deze fase. In de nageschakelde reactor vindt voornamelijk methaanvorming plaats. In de propstroom-praktijkinstallaties in Duitsland blijkt dat circa 70 - 80% van de methaanvorming in de propstroomreactor optreedt en 20 - 30% in de nageschakelde reactor.

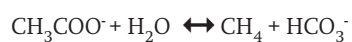
FIGUUR 2.5 SCHEMA VAN DE AFBRAAKROUTES TIJDENS ANAEROBE SLIBGISTING



Bij toepassen van fasescheiding is het belangrijk om de procescondities voor de verschillende fases zo optimaal mogelijk te houden. Dit geldt vooral voor de hydrolyse en verzuring waarbij vetzuren worden gevormd. Een belangrijke parameter hierbij is de pH. Door de productie van vetzuren zal de pH de neiging hebben om te dalen. In een anaerobe gisting wordt een te sterke daling verhinderd door de buffercapaciteit van het aanwezige bicarbonaat. Een voorbeeld is het azijnzuurevenwicht:



In een in evenwicht zijnde slibgisting wordt de bicarbonaatalkaliteit weer gerecirculeerd.



Dit betekent dat in een gisting waarbij de processen in evenwicht zijn er altijd voldoende bicarbonaat alkaliteit aanwezig is die pH schommelingen voorkomt. In het Ephyra® systeem zijn de processen door fasescheiding (deels) ontkoppeld. Dit heeft als voordeel dat de verschillende processen waaronder verzuring sneller kunnen verlopen. Hiertegenover staat dat een goede procesregeling belangrijk is.

Bij een verzuringsstap waarbij onvoldoende bicarbonaat aanwezig is of onvoldoende methaanvorming optreedt, is er een gevaar dat de pH te ver kan dalen (< 5). Een te lage pH is weer giftig

voor het verzuringsproces en de methaanvorming. Om dit tegen te gaan zijn er twee opties:

- Het toepassen van recirculatie zodat bicarbonaat alkaliteit en ook methanogene activiteit wordt ingebracht in de eerste twee compartimenten. Dit is de reden voor de interne recirculatie in het Ephyra® systeem, zoals ook in de Duitse propstroomvergisters gebeurt.
- Het toepassen van loogdosering. Dit laatste heeft niet de voorkeur en dient meer als noodmaatregel om een procesverstoring tegen te gaan.

### **(ON)GEOELIGHEID VOOR PIEKBELASTINGEN**

Door de hogere omzettingssnelheden vindt er al een aanzienlijke omzetting tot 70 - 80% in de Ephyra® reactor plaats. De nageschakelde gisting breekt de overige 20 - 30% van het slib af. Hiermee is echter niet de volledige capaciteit van de nageschakelde stap benut. Bij piekbelastingen wordt mogelijk de omzetting naar methaan in de Ephyra®-reactor minder. Dit wordt gecompenseerd door een verhoogde omzetting in de nageschakelde reactor. Hierdoor blijft de totale afbraak op peil. Deze natuurlijke buffer in het totale Ephyra®-systeem verhoogt de robuustheid.

### **EFFECT OP ONTWATERBAARHEID**

Doordat in het Ephyra®-systeem meer slib wordt afgebroken, is de verwachting dat dit zal leiden tot een betere ontwaterbaarheid van het uitgiste slib. Het pilotonderzoek moet aantonen of deze veronderstelling gerechtvaardigd is.

#### **2.1.3 MODELLEREN EPHYRA®**

Voor het modelleren van Ephyra® wordt uitgegaan van het model van Chen en Hashimoto<sup>1,2,3</sup>. Hierbij zijn voor de modelberekeningen de initiële waarden van de modelparameters vastgesteld. Deze waarden van de parameters worden op basis van de resultaten van de pilottesten opnieuw beoordeeld.

## **2.2 THEMISTA®**

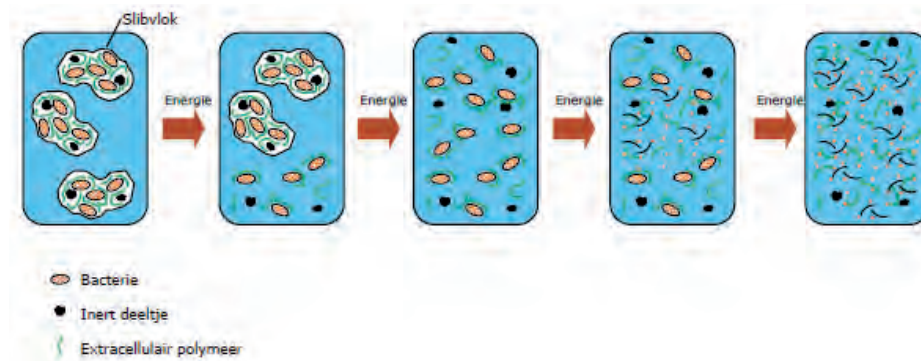
### **2.2.1 ALGEMEEN**

Themista® is een voorbehandeling om de afbreekbaarheid van het slib te verbeteren. Het proces bestaat uit een thermische behandeling gevolgd door een chemische of mechanische behandeling. Het gevolg van deze behandeling is een desintegratie van het slib. Allereerst zullen de slibvlokken uiteenvallen in kleinere delen bestaande uit bacteriën en ander organisch materiaal. Vervolgens zullen deze kleinere delen uit elkaar vallen in losse bacteriën en cellen, waarbij mogelijk ook al intracellulaire enzymen en polymeren vrijkomen (zie Figuur 2.6). Als dit proces wordt doorgezet, zoals bij thermische drukhydrolyse, zullen meer celstructuren stuk gaan en dus meer intracellulair materiaal vrijkomen.

- 1 Chen Y R & A G Hashimoto 1980. Substrate utilization model for biological treatment systems. *Biotechnology & Bioengineering* 22: 2081-2095.
- 2 Wiegant W 2011. Voorspelling van de biogasproductie en de slibafbraak tijdens slibgisting. *Afvalwaterwetenschap* 11 (5): 126-135
- 3 STOWA 2005. Slibketenstudie - Onderzoek naar de energie- en kostenaspecten in de water- en slibketen. STOWA, Utrecht, rapport 2005-26.

FIGUUR 2.6

## SLIBDESINTEGRATIE NA THEMISTA®-BEHANDELING



De effectiviteit van Themista® wordt bepaald door de temperatuur en de tijdsduur van de behandeling, en de intensiteit van de nabehandeling. Door het toepassen van de thermische behandeling kan de nabehandeling “mild” worden uitgevoerd. Belangrijk voor het toepassen van Themista® –evenals andere ontsluitingstechnieken– is de balans tussen energie-input en energiewinst (extra biogas).

In vergelijking met thermische slibontsluiting (Cambi, Sustec, Lysotherm) waarbij het slib wordt gekraakt bij 140 – 165°C, wordt Themista® bij lagere temperaturen (60 – 80°C) uitgevoerd. Dit heeft een aantal voordelen:

- Een gunstiger warmtebalans: het extra geproduceerde biogas komt beschikbaar voor energieproductie en is vrijwel niet nodig voor warmte-inbreng in het proces.
- Een eenvoudiger systeem: voorontwarming, stoom of thermische olie is niet nodig.
- Er treden nagenoeg geen Maillardreacties op. De Maillardreactie is de verzamelnaam voor een reeks complexe chemische reacties die onder invloed van warmte optreden tussen suikers en aminozuren. Tijdens de reactie kunnen verbindingen worden gevormd die inert of toxisch zijn voor microbiële processen.

Themista®-behandeling wordt alleen toegepast op het secundaire slib. De reden is dat de behandeling geen effect heeft op de afbraak van primair slib. In buitenlandse toepassingen waarbij slib wordt afgezet in de landbouw en desinfectie nodig is, is voorbehandeling van primair slib wel zinvol.

### 2.2.2 FUNCTIONEREN THEMISTA®

De hypothese dat Themista® tot een betere gisting leidt is gebaseerd op de volgende aspecten:

- de slibbehandeling leidt tot een verdere slibafbraak;
- de slibbehandeling leidt tot een snellere slibafbraak;
- na de thermische behandeling is de viscositeit van het slib lager;
- de aan de Themista® gekoppelde controller resulteert in een stabiel proces.

#### BETERE EN SNELLERE SLIBAFBRAAK

De hypothese is dat door de gecombineerde voorbehandeling de slibvlokken van het secundaire slib uiteenvallen. Dit heeft twee gevolgen: het beschikbare substraat komt sneller beschikbaar (betere afbraak) en moeilijke afbreekbare verbindingen worden omgezet in eenvoudiger afbreekbare verbindingen (snellere afbraak).

#### LAGERE VISCOSITEIT

Door het uiteenvallen van de slibvlokken zal de viscositeit van het Themista® behandelde en het uiteindelijke uitgeste slib lager zijn dan die van niet behandeld slib. Een soortgelijke

daling in viscositeit wordt ook waargenomen in thermische ontsluitingssystemen zoals Cambi. Door de viscositeitsdaling is het slib makkelijker te verpompen en is het eenvoudiger te mengen waarbij minder mengenergie nodig is.

#### **PROCESSTABILITEIT**

In de praktijk zal de aanvoer van slib naar de gisting variëren. Omdat bij Themista® een belangrijk deel van de investering bestaat uit apparatuur voor het opwarmen van het slib is het wenselijk deze niet al te groot uit te voeren. Dit betekent dat de aanvoer naar de Themista® redelijk constant zal blijven. Hierdoor is er een stabielere aanvoer naar de slibgisting. Dit leidt automatisch tot een stabielere en robuustere proces. De aan de Themista® gekoppelde regelaar verzorgt de procesregeling. Hierbij zijn verschillende strategieën mogelijk.

#### **EFFECT OP ONTWATERBAARHEID**

Themista®-behandeling verhoogt de beschikbaarheid van het substraat; er wordt dus meer slib vergist. Dit zal in combinatie met een viscositeitsverlaging naar verwachting leiden tot een betere ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib. Het pilotonderzoek moet aantonen of deze veronderstelling terecht is.

#### **2.2.3 MODELLEREN THEMISTA®**

Voor het modelleren van Themista® wordt uitgegaan van het model van Chen en Hashimoto. Hierbij zijn voor de modelberekeningen de initiële waarden van de modelparameters vastgesteld. Deze waarden van de parameters worden op basis van de resultaten van de pilottesten opnieuw beoordeeld.

# 3

## OPZET EN UITVOERING VAN HET ONDERZOEK

### 3.1 ALGEMEEN

Het onderzoek dat is uitgevoerd naar de toepassing en haalbaarheid van de slibgistingstechnologieën Ephyra® en Themista® bestond uit een aantal opeenvolgende stappen waarbij steeds een *go – no go* moment is geweest voor volgende stap. Hierbij zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- presentatie technologieconcepten;
- modelberekeningen case Kralingseveer (Themista®) en Tollebeek (Ephyra®);
- opstellen business case voor Kralingseveer en Tollebeek;
- *go – no go* uitvoering labtesten;
- uitvoering labonderzoeken Themista® en Ephyra®;
- evaluatie resultaten labtesten;
- herijking business case Kralingseveer en Tollebeek;
- *go – no go* uitvoering pilotonderzoek;
- uitvoering pilotonderzoek;
- evaluatie resultaten;
- herijking business case Kralingseveer en Tollebeek.

Dit rapport beschrijft het uitgevoerde traject waarbij het accent ligt op de resultaten van het pilotonderzoek.

### 3.2 ONDERZOEKSVRAGEN EN DOELSTELLINGEN

De voornaamste doelstellingen van het pilotonderzoek waren:

- De validatie van de aannames gemaakt bij de oorspronkelijke modelberekeningen en de resultaten van de labonderzoeken. De resultaten van het pilotonderzoek worden onder andere gebruikt om de business case Kralingseveer en Tollebeek te onderbouwen en herijken.
- Het opdoen van ervaring met een systeem van voldoende schaalgrootte zodat een verantwoord ontwerp van een praktijkinstallatie mogelijk is waarbij technologische en technische risico's inzichtelijk en beheersbaar zijn. Hierbij is het uitgangspunt dat de diverse leerpunten die uit het pilotonderzoek naar voren komen worden vertaald in het ontwerp van de praktijkinstallatie.
- Het opdoen van specifieke ervaring voor de volgende aspecten: opschaling, simulatie van praktijkomstandigheden (o.a. piekbedrijf), ontwatering (resultaat, PE-verbruik), en fosfaatneerslag en/of schuimvorming. Specifiek voor Themista®: effect van lagere viscositeit en de voorbehandeling.

### 3.3 LABONDERZOEK

Het labonderzoek had tot doel om de aannames in de business case Kralingseveer en Tollebeek te bevestigen of bij te stellen. Tevens waren de resultaten bedoeld om een *go-no go* voor de pilottesten vast te leggen. Het labonderzoek bestond op hoofdlijn uit:

- batchtesten voor het vaststellen van de maximale afbreekbaarheid van slib en de maximale afbraaksnelheden;
- testen van de anaerobe gisting in continueactoren. Hierbij werden het Ephyra®-principe, een conventionele gisting (referentie), en voorbehandeling van slib (Themista®) in continuesystemen getest.

### 3.4 PILOTONDERZOEK

Het pilotonderzoek met Ephyra® in Tollebeek en met Themista® in Kralingseveer had tot doel de werking en de voordelen van beide technologieën aan te tonen. De business cases voor Tollebeek en Kralingseveer zijn op basis van dit onderzoek onderbouwd en herijkt. Het onderzoek omvatte vergelijking van een referentiereactor met Ephyra® of Themista® bij stabiele en constante aanvoer en de prestaties van de systemen tijdens piekaanvoeren. Hiernaast zijn aan het einde van de pilottesten ontwateringsproeven uitgevoerd en werd gekeken naar fosfaatneerslag. De ervaringen en resultaten van de pilotonderzoeken zijn de basis voor het ontwerp van een praktijkschaal demonstratie-installatie.



# 4

## MATERIAAL EN METHODEN

### 4.1 LABONDERZOEK

#### 4.1.1 ALGEMEEN

##### VOEDING

Wekelijks werd slib van Tollebeek, Lelystad en Kralingseveer naar de onderzoeksruimte van Royal HaskoningDHV gebracht. Primair slib werd gezeefd, primair en/of secundair slib werd verder ingedikt of verdund tot een drogestofgehalte van 4,0 - 4,3% en gekoeld bewaard.

##### BATCHTESTEN

Voor de bepaling van de maximale afbraak en de afbraaksnelheid werden op verschillende momenten van het onderzoek batchgewijze slibgistingstesten uitgevoerd. In de testopzet worden 300 ml flessen gevuld met 100 ml inoculum (uitgelist slib) en 20 ml substraat (vers slib) in een drogestofverhouding  $R_{1/S}$  van tussen 2,5 en 7. De verschillende combinaties inoculum/substraat werden altijd in triplo uitgevoerd, zodat afwijkende waarden kunnen worden uitgesloten. Gedurende de proefperiode (ca. 20 dagen) is dagelijks de gasproductie gemeten (zie Figuur 4.1). Voorafgaand en aan het eind van de proefperiode zijn de drogestof- en organisch-drogestofgehalten gemeten.

FIGUUR 4.1

OPSTELLING BATCH SLIBGISTINGSTESTEN



##### CONTINUE PROEVEN

Het uitvoeren van de continue proeven was onderverdeeld in meerdere fases, namelijk de stabilisatie- of opstartfase (duur circa 2-3 slibleeftijd) en de stabiele fase waarin de prestaties van de systemen werden vergeleken.

##### METINGEN

Gedurende de looptijd van het onderzoek werden de in- en uitgaande stromen (24 uur mengmonster) van de reactoren voor de continue proeven bemonsterd. Door op werkdagen het

drogestof- en het organisch-drogestofgehalte te meten werd de afbraak in de tijd gevolgd. Ook zijn andere parameters bijgehouden. Een opsomming van de alle metingen is gegeven in Tabel 4.1.

Ter controle zijn met enige regelmaat ingaande en uitgaande stromen van de reactoren van de verschillende onderzoeksprojecten bemonsterd en voor externe analyses (bij Aqualysis) verstuurd.

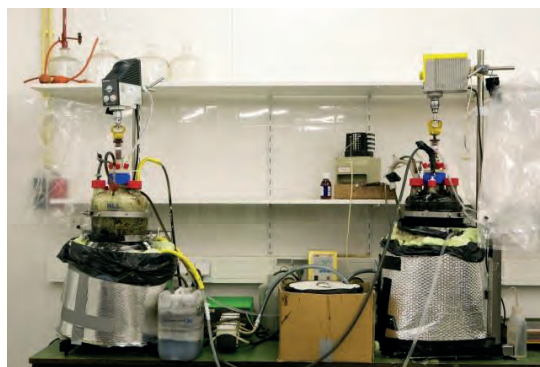
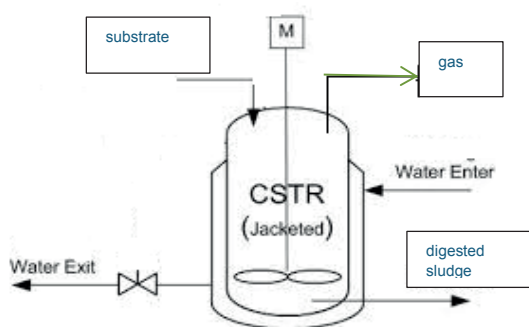
TABEL 4.1 ANALYSES UITGEVOERD TIJDENS CONTINU PROEVEN

Parameter	Eenheid	Frequentie	Doel meting
Drogestofgehalte	%	5/week	rendement verwijdering droge stof
Organische fractie van drogestofgehalte	% van DS	5/week	bepalen verwijderingsrendement ODS
Biogas	l/dag	5/week	valideren organisch drogestofverwijdering
Temperatuur	°C	Constant	controle stabiele bedrijfsvoering
pH	-	1-2/week	controle stabiele bedrijfsvoering

#### 4.1.2 DE REFERENTIE-INSTALLATIE

De continu slibgistingstesten vinden plaats in een Continuous Stirred Tank Reactor van 20 L (CSTR; zie Figuur 4.2). Via slangenpompen wordt het voedingsmengsel toegevoegd en digestaat afgevoerd. In de reactor wordt organisch droge stof (ODS) omgezet in biogas, dat opgevangen wordt in een gaszak.

FIGUUR 4.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE CONTINU GISTINGSREACTOREN EN DE EERSTE GENERATIE PROEFOPSTELLING



#### 4.1.3 LABONDERZOEK EPHYRA®

Vanwege de schaalgrootte is voor het labschaalonderzoek in eerste instantie gekozen voor een verticale opstelling conform het model van de Duitse praktijk reactoren. Voor het Ephyra®-onderzoek is een verticale reactor gebruikt met een totaal volume van 8 of 14 liter. De reactoren werden bedreven op een verblijftijd van zes tot acht dagen. Via de aanwezige geperforeerde metalen schijven werden de vier compartimenten in de Ephyra®-reactor gescheiden. De nieuwe generatie Ephyra®-proefopstelling is een horizontale opstelling (Figuur 4.3) Dit ontwerp is vergelijkbaar met de pilotinstallatie Tollebeek.

FIGUUR 4.3 HORIZONTALE PROEFOPSTELLING EPHYRA®



#### 4.1.4 LABONDERZOEK THEMISTA®

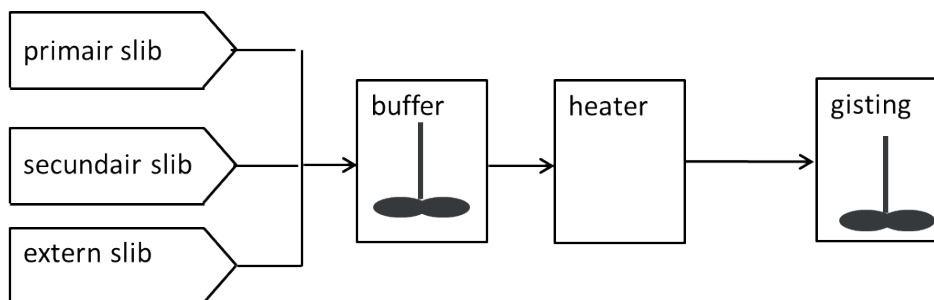
De Themista® voorbehandeling is halverwege het onderzoek veranderd van een batchgewijze (één maal per dag de voeding prepareren) naar een in-line voorbehandeling bestaande uit verwarming en dosering van waterstofperoxide. De uiteindelijke instellingen voor de Themista® voorbehandeling die zijn getest in de continue slibgistingstesten zijn afkomstig van de vergelijking van de resultaten van batch slibgistingstesten met verschillende voorbehandelingen.

## 4.2 PILOTONDERZOEK

### 4.2.1 DE REFERENTIE-INSTALLATIE

Primair, secundair en eventueel extern slib (in het geval van Kralingseveer) werden naar een buffertank gepompt. Vanuit hier werd het slib naar de vergister, type volledige gemengde reactor, gepompt en vergist. De peroxide werd na de verwarmingsstap toegevoegd.

FIGUUR 4.4 PILOTINSTALLATIE REFERENTIE



#### MONSTERNAMEPUNTEN

De volgende slibsoorten werden bemonsterd voor analyse:

- primair slib, secundair slib, en extern slib;
- uitgegiste slibstroom.

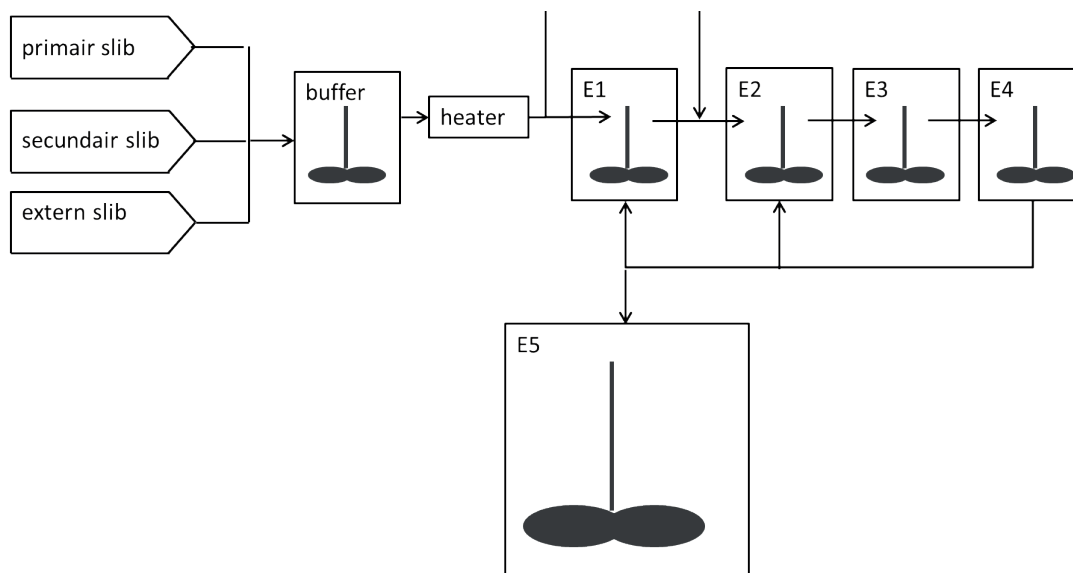
#### ONLINE METINGEN

- slibdebieten;
- biogasdebieten en biogassamenstelling (CH<sub>4</sub> gehalte);
- pH, redox en temperatuur;
- drogestofmetingen (aanvoer en afvoer gisting).

#### 4.2.2 EPHYRA® ONDERZOEK BIJ TOLLEBEEK

Primair, secundair en extern slib werden naar een buffertank gepompt. Vanuit hier werd het slib gevoed aan het eerste compartiment van de Ephyra®. Het slib doorstroomde vervolgens de vier Ephyra®-reactoren E1-E4. Vanuit E-4 werd het slib gerecirculeerd naar het eerste compartiment en verpompt naar de nageschakelde reactor (E5) en verder vergist.

FIGUUR 4.5 PILOTINSTALLATIE EPHYRA®



#### MONSTERNAMEPUNTEN

De volgende slibsoorten werden bemonsterd voor analyse:

- primair slib, secundair slib en extern slib;
- uitgestist slib in de aflat van iedere reactor (E1-E5).

#### ONLINE METINGEN

- slibdebieten;
- biogasdebieten en biogassamenstelling (CH<sub>4</sub> gehalte) van som E1-4 en van E5;
- pH, redox en temperatuur van iedere reactor;
- drogestofmetingen (aanvoer E1, afvoer E4 en afvoer E5).

In het pilotonderzoek zijn de volgende fases te onderscheiden:

- opstart pilot Ephyra® en referentie;
- vergelijking prestatie Ephyra® en referentie bij een vaste verblijftijd;
- ontwateringsproeven;
- verplaatsing referentiereactor naar Kralingseveer;
- bedrijven Ephyra® onder verwachte praktijkomstandigheden waarbij piekaanvoeren kunnen voorkomen. Deze periode werd piekbedrijf genoemd;
- uitvoeren ontwateringstesten;
- aanvullend onderzoek waarbij gekeken werd naar fosfaatneerslag.

#### VERGELIJKING EPHYRA® – REFERENTIE VAST DEBIET.

In deze fase werden beide systemen bij een vast debiet bedreven. Het gekozen debiet kwam overeen met een hydraulische verblijftijd van 22,5 dagen. Dit was de verwachte verblijftijd voor de praktijkinstallatie bij Tollebeek. De prestatie van Ephyra® werd vergeleken met de referentie- en de praktijkinstallatie. Hierbij werd gekeken naar onder andere drogestofaf-

braak en biogasproductie als maat voor prestatie van beide systemen. Na afronding van de eerste serie ontwateringsproeven op Tollebeek werd de referentiereactor verplaatst naar Kralingseveer.

### PRESTATIE EPHYRA® BIJ PIEKBEDRIJF

Voor het testen van Ephyra® op piekbedrijf werd het handhaven van een pilot-referentie op Tollebeek niet nodig geacht. De redenen waren:

- Het primaire doel is het testen van het Ephyra®-concept bij variaties in aanvoer. Hoe robuust is het systeem en zijn aanvullende maatregelen (regelingen) nodig die in een ontwerp moeten worden meegenomen.
- Als Ephyra® niet wordt toegepast blijft de huidige situatie op Tollebeek gehandhaafd. De wijze waarop de slibgisting wordt bedreven en de prestatie van de huidige gisting kan worden afgeleid uit beschikbare data van de praktijkinstallatie. Zo blijkt in de praktijk dat op jaarbasis circa 20% van het secundaire slib om de gisting wordt geleid om te korte verblijftijden in de gistingstank te voorkomen.
- Ephyra® en de referentiereactor worden met verschillende slibmengsels gevoed. Een directe vergelijking voor robuustheid onder piekomstandigheden kan daarom niet goed worden gemaakt. Dit zou alleen kunnen als beide systemen met hetzelfde slibmengsel wordt gevoed. Het vergelijken van Ephyra® met een referentiereactor bij piekomstandigheden valt echter buiten het doel van dit onderzoek.

Voor het vaststellen van het piekbedrijf werd een analyse gemaakt van de variaties in slibaanvoer op Tollebeek en Lelystad. Voor Ephyra® werden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- verblijftijd Ephyra® nominale aanvoer acht dagen;
- verblijftijd Ephyra® piekaanvoer zes dagen.

Voor een demonstratie-installatie op Tollebeek betekent dit dat als de slibaanvoer hoger is dan de maximale capaciteit, niet-verwerkt slib tijdelijk wordt gebufferd en in een later stadium alsnog wordt verwerkt. Op basis van de te verwachten variaties in slibaanvoer op Tollebeek werden de volgende pieken getest:

- korte piek            duur piek één dag            tijd tussen pieken twee dagen;
- typische piek        duur piek drie dagen        tijd tussen pieken zes dagen;
- lange piek            duur piek zeven dagen        tijd tussen pieken tien dagen.

### ONTWATERINGSTESTEN

Op Tollebeek zijn ontwateringstesten uitgevoerd op het slib van de praktijkinstallatie en het slib uit de Ephyra® en referentiereactor op de AWZI Tollebeek. Er werd hierbij gestreefd naar een zo hoog mogelijk drogestofgehalte bij een zo laag mogelijk PE-verbruik.

Voor de ontwateringstesten is een GEA centrifuge gebruikt type UCD 205, de kleinste praktijk-schaal centrifuge van GEA. Voor alle testen is de schroef met Tachscheibe gebruikt, waardoor slib en centraat beter gescheiden kan worden. Het type PE dat gedoseerd wordt kan leiden tot een verschillend ontwateringsresultaat, daarom is ervoor gekozen om met drie soorten PE te testen.

### FOSFAATNEERSLAG

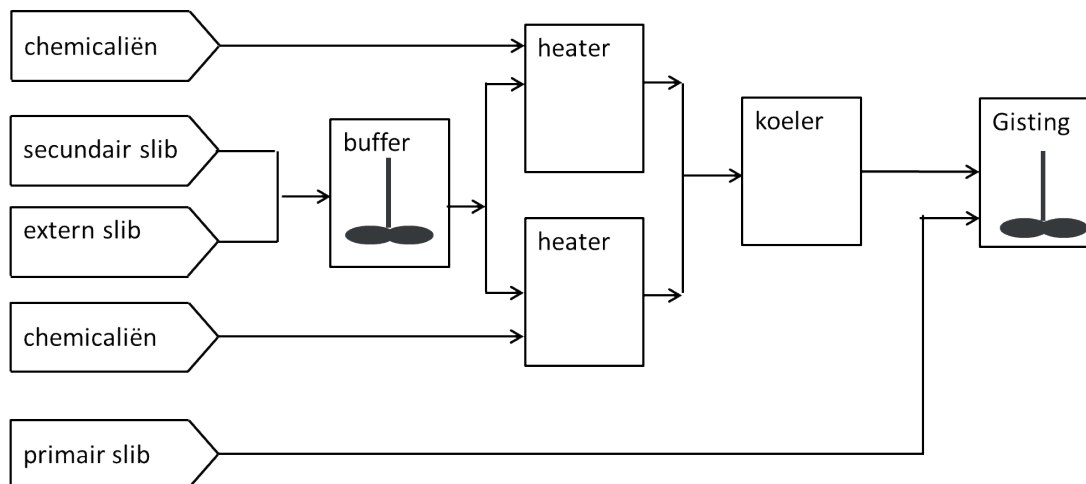
Na afronding van de ontwateringsproeven is gekeken naar fosfaatneerslag, struvietvorming en struvietafzetting. Gedurende de testperiode werd magnesiumchloride in Ephyra®-tank 3 gedoseerd. In Ephyra®-tank 1 t/m 4 werden eveneens stukjes RVS strip gehangen waarop aangroei kan plaatsvinden. Na afloop van de proef zijn de RVS stripjes, de tanks en leidingen

visueel op fosfaatneerslag geïnspecteerd. Verder zijn de gebruikelijke analyses uitgevoerd. Vanwege de relatief korte testperiode is de magnesiumdosering tussentijds niet aangepast.

#### 4.2.3 THEMISTA® ONDERZOEK BIJ KRALINGSEVEER

Secundair en extern slib werden beide naar een buffertank gepompt. Vanuit hier werd het slib gevoed aan twee parallel opgestelde verwarmingseenheden voor de thermische behandelingsstap. Hieraan werd tevens H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gedoseerd voor de aanvullende chemische behandeling. Behandeld secundair slib en primair slib werden samen naar de gistingstank, type volledige gemengde reactor, gepompt en vergist.

FIGUUR 4.6 PILOTINSTALLATIE THEMISTA®



#### MONSTERNAMEPUNTEN

De volgende slibsoorten werden bemonsterd voor analyse:

- primair slib, secundair en extern slib;
- in- en uitgaande slibstroom verwarmingseenheid;
- uitgegist slib;

#### ONLINE METINGEN

- slibdebieten;
- biogasdebieten en biogassamenstelling (CH<sub>4</sub>gehalte);
- pH, redox en temperatuur van de gisting, temperatuur van gisting, heater, koeler);
- drogestofmetingen verschillende slibstromen.

Tijdens de gehele onderzoeksperiode werd de prestatie van de pilotinstallatie vergeleken met de praktijkinstallatie van AWZI Kralingseveer.

In het pilotonderzoek zijn de volgende fases te onderscheiden.

- Opstart pilotreactor en bedrijfsvoering in referentiemodus (geen Themista®-voorbehandeling). Gedurende deze periode kon de referentiereactor worden vergeleken met de praktijkinstallatie.
- Omschakeling pilotreactor naar Themista® bedrijf. De praktijkinstallatie diende als referentie.
- Opstart tweede pilotreactor (afkomstig uit Tollebeek). De tweede pilotreactor was nu ook de referentiereactor.

- Na opstartperiode en stabiel bedrijf van beide pilots, vergelijking van Themista® en referentie bij een constante aanvoer. Voor een representatieve vergelijking werd uitgegaan van een periode van minstens twee maanden.
- Vergelijking Themista® en referentie-pilot voor functioneren onder praktijkomstandigheden waarbij piekaanvoeren konden voorkomen. Deze periode werd piekbedrijf genoemd.
- Uitvoering van ontwateringstesten op slib van beide pilots.

#### VERGELIJKING THEMISTA® – REFERENTIE VAST DEBIET

In deze fase werden beide systemen bij een vast debiet bedreven. Het gekozen debiet kwam overeen met de verwachte verblijftijd voor de praktijkinstallatie bij Kralingseveer. De prestatie van Themista® werd vergeleken met de referentie- en de praktijkinstallatie. Hierbij is gekeken naar onder ander drogestofafbraak en biogasproductie als maat voor prestatie van beide systemen.

#### VERGELIJKING THEMISTA® – REFERENTIE PIEKAANVOER/SIMULATIE PRAKTIJK

In deze fase werd de referentie en Themista® vergeleken met de wijze waarop ze in de praktijk zullen worden bedreven tijdens piekaanvoer. Bij Themista® is het piekbedrijf anders dan voor de referentiesituatie waarbij werd uitgegaan van de huidige wijze van bedrijfsvoering. Voor een installatie met Themista® geldt een nominale en maximale verwerkingscapaciteit. De reden voor een beperkte capaciteitsrange volgt uit te hoge investeringen bij grotere Themista®-capaciteiten.

Voor het vaststellen van het piekbedrijf werd een analyse gemaakt van de variaties in slibaanvoer op Kralingseveer. In 2014 was de gemiddelde verblijftijd in de gisting op Kralingseveer 18,7 dagen. De variatie liep van 12,1 tot 36,7 dagen. 20% van de tijd was de verblijftijd korter dan 15 dagen. Bij Themista® geldt dat als de maximale capaciteit wordt overschreden, niet-behandeld slib tijdelijk wordt opgeslagen in de aanwezige buffertanks. Op basis van de variaties in slibaanvoer op Kralingseveer werd voor Themista® en de referentiereactor het volgende onderzoek naar piekbedrijf uitgevoerd.

TABEL 4.2

OPZET ONDERZOEK PIEKBEDRIJF THEMISTA® EN REFERENTIE KRALINGSEVEER

Datum	HVT (d)Themista®	HVT (d) Referentie
12-10-2015 t/m 15-10-2015	21,8	21,8
16-10-2015 t/m 18-10-2015	32,7	32,7
19-10-2015 t/m 22-10-2015	19,7	19,1
23-10-2015 t/m 27-10-2015	20,6	20,0
29-10-2015 t/m 8-11-2015	17,3	14,3
9-11-2015 t/m 13-11-2015	17,4	17,4

#### ONTWATERINGSTESTEN

Voor de ontwateringstesten is een GEA centrifuge gebruikt type UCD 205, de kleinste praktijk-schaalcentrifuge van GEA. Voor alle testen is de schroef met Tachscheibe gebruikt, waardoor slib en centraat beter gescheiden kan worden.

Het type PE dat gedoseerd wordt kan leiden tot een verschillend ontwateringsresultaat, daarom is ervoor gekozen om met drie soorten PE te testen.

### 4.3 BEREKENINGEN EN STATISTISCHE DATAVERWERKING

De volgende berekeningen zijn uitgevoerd:

- drogestofafbraak en rendement gebaseerd op droge stof en as-metingen;
- organische drogestofafbraak en rendement gebaseerd op organische droge stof en as-metingen;
- verwachte biogasproductie uit droge stof afbraak;
- vergelijking slibafbraak, biogasproductie, ammoniumtoename en CZV afname.

De dataverwerking is deels gebaseerd op een statische analyse van de gegevens om na te gaan of gemeten verschillen relevant waren of niet. Een uitgebreide beschrijving van deze methode is gegeven in bijlage 1.



# 5

## RESULTATEN EPHYRA®

### 5.1 INITIËLE MODELBEREKENINGEN

Voor de uitvoering van de lab- en pilottesten voor de case Tollebeek is via modelberekeningen nagegaan in hoeverre Ephyra® technologie voordelen biedt. Voor de berekening van de gisting met en zonder Ephyra®-technologie is het model van Chen en Hashimoto gebruikt. Hierbij zijn de volgende modelparameters gebruikt:

<b>maximale afbraak</b>	primair slib	% organische droge stof	65	
		secundair slib		
		% organische droge stof	40	referentie
		% organische droge stof	54	Ephyra®
<b>hydrolyse constante</b>	primair slib		1	
		secundair slib	1,5	referentie
			1,1	Ephyra®

Voor de case Tollebeek waren de uitgangspunten voor de modelberekeningen:

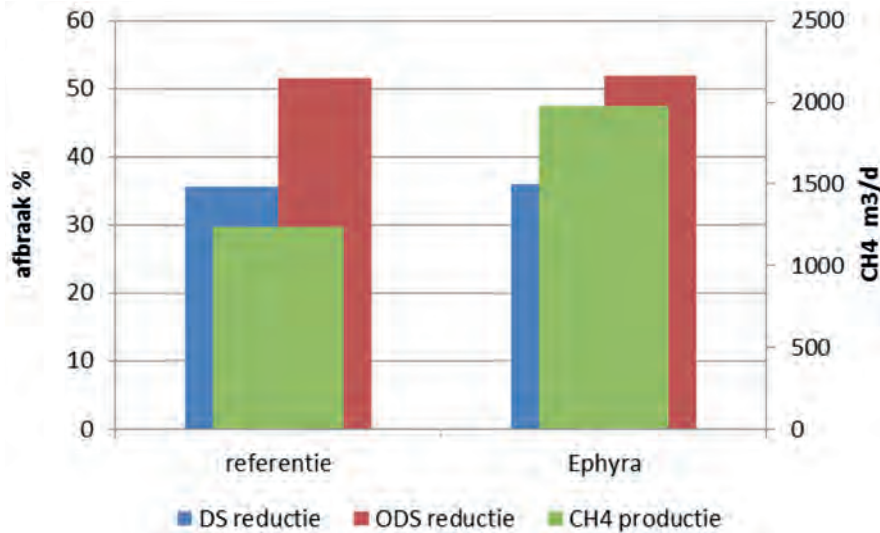
- Referentie  
Handhaven huidige situatie. Op Tollebeek wordt het primaire en secundaire slib van Tollebeek vergist in de bestaande installatie. De gemiddelde verblijftijd in de gisting is 18 à 19 dagen. Slib van Lelystad wordt niet vergist en ontwaterd op Lelystad.
- Ephyra®  
De gisting van Tollebeek wordt uitgebreid door een Ephyra®-reactor voor te schakelen. Naast slib van Tollebeek wordt ook het secundaire spuislib van Lelystad op Tollebeek vergist en ontwaterd. Hierdoor wijzigt de slibsamenvatting in vergelijking met de referentie. Het aandeel primair slib in het te vergisten slibmengsel is voor de Ephyra® optie veel lager dan voor de referentievariant.

De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in Figuur 5.1.

De veel hogere biogasproductie voor de Ephyra® variant is mede een gevolg van het feit dat nu ook slib van RWZI Lelystad wordt vergist. Uit de berekende afbraak van droge stof en organische droge stof blijkt dat voor de Ephyra® variant, ondanks het feit dat nu relatief meer (slechter) afbreekbaar secundair slib wordt vergist, de afbraak voor Ephyra® nagenoeg gelijk is aan de referentievariant.

De resultaten van de modelberekeningen zijn aanleiding geweest om de resultaten en aannames te controleren via labtesten.

FIGUUR 5.1 RESULTATEN MODELBEREKENINGEN TOLLEBEEK REFERENTIE EN EPHYRA® VARIANT

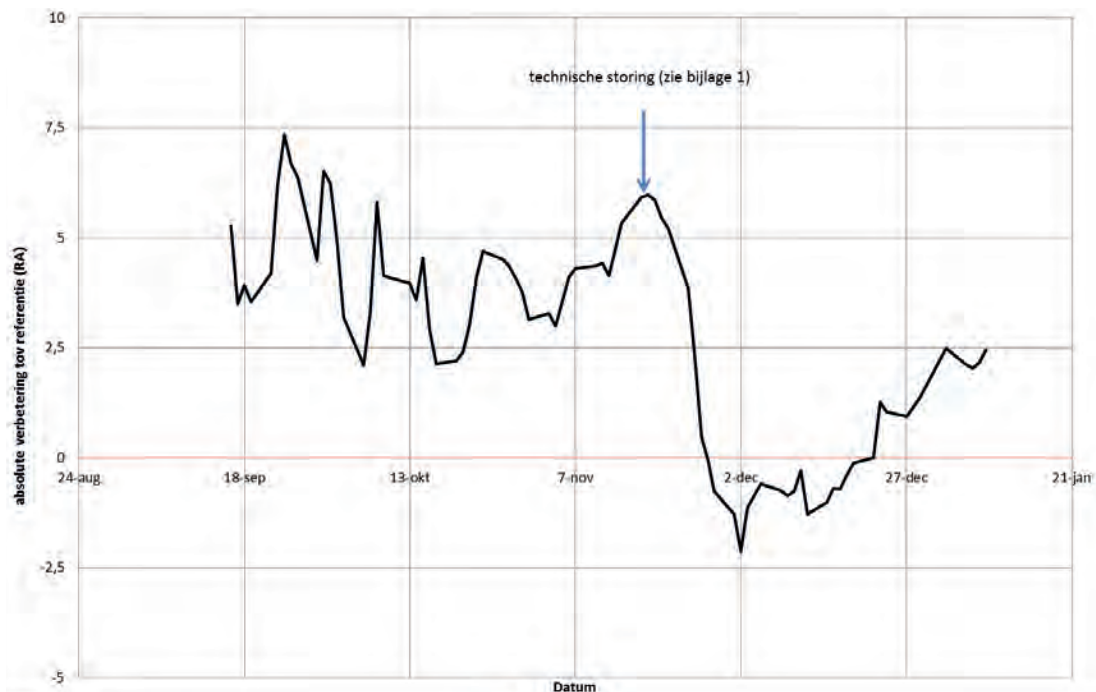


## 5.2 RESULTATEN LABONDERZOEK

In het laboratorium en onderzoeksruimte van Royal HaskoningDHV zijn labtesten met het slib van Tollebeek en Lelystad uitgevoerd. Een uitgebreid overzicht van de resultaten is gegeven in bijlage 2.

Figuur 5.2 geeft de absolute verbetering in drogestofafbraak van de Ephyra®-reactor.

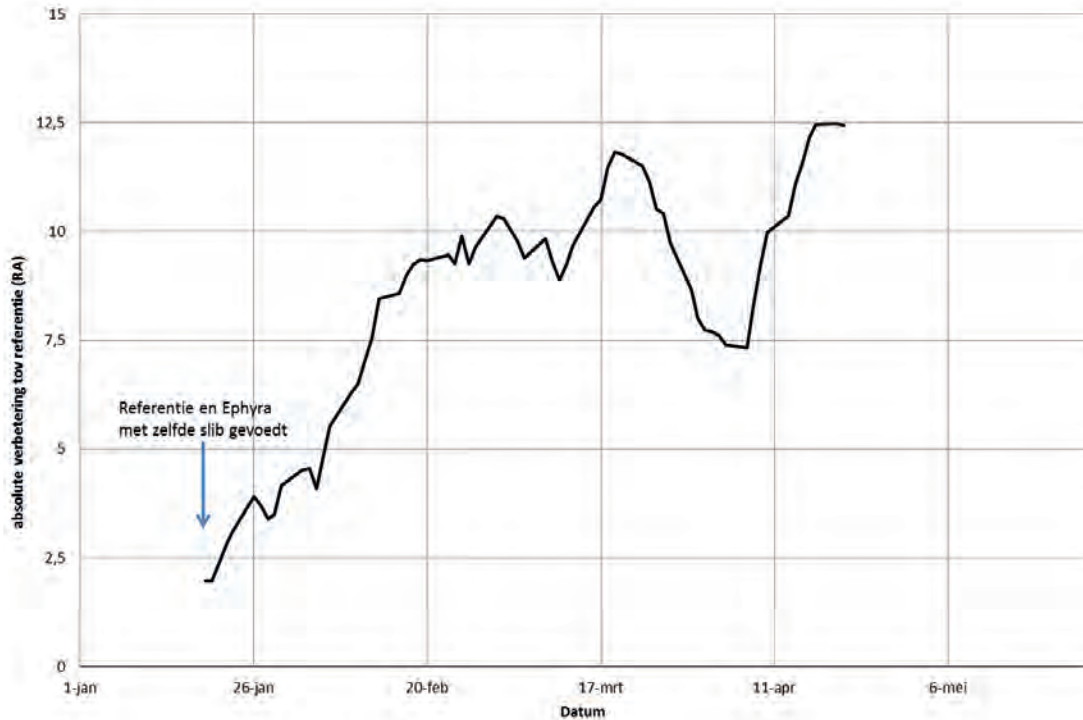
FIGUUR 5.2 ABSOLUTE VERBETERING (VOORTSCHRIDDEND GEMIDDELD VAN ZEVEN WAARNEMINGEN) VAN DE DROGESTOFAFBRAAK IN DE EPHYRA®-REACTOR TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIEREACTOR



Gedurende de labtesten bleek de Ephyra®-reactor beter te presteren dan aangenomen in de initiële modelberekeningen. Bij het model was uitgegaan van een gelijke afbraak. Gedurende het labonderzoek was de afbraak in de Ephyra®-reactor hoger dan de referentiereactor. De

meerafbraak bedroeg 2,5 tot 5% ODS. Bij de interpretatie van de labresultaten moet rekening worden gehouden met de verschillen in slibsamenvorming voor de referentie en de Ephyra®. Voor de referentie is de verhouding primair slib/ secundair slib 0,67. Voor Ephyra® is deze 0,39. In het lab zijn de continu reactoren daarom ook bedreven waarbij beide systemen werden gevoed met slib van Tollebeek en Lelystad. De resultaten zijn gegeven in Figuur 5.3.

FIGUUR 5.3 ABSOLUTE VERBETERING (VOORTSCHRIDDEND GEMIDDELDE VAN ZEVEN WAARNEMINGEN) VAN DE DROGESTOFAFBRAAK IN DE EPHYRA®-REACTOR TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIEREACTOR NADAT BEIDE REACTOREN WERDEN GEVOED MET HETZELFDE SLIB



Uit Figuur 5.3 blijkt dat de meerafbraak in Ephyra® oploopt tot 10 - 12% nadat beide systemen met hetzelfde slib werden gevoed. De resultaten van de labmetingen waren voldoende aanleiding om pilottesten uit te voeren. Immers, de resultaten waren eigenlijk beter dan verwacht voor de uitvoering van de labtesten.

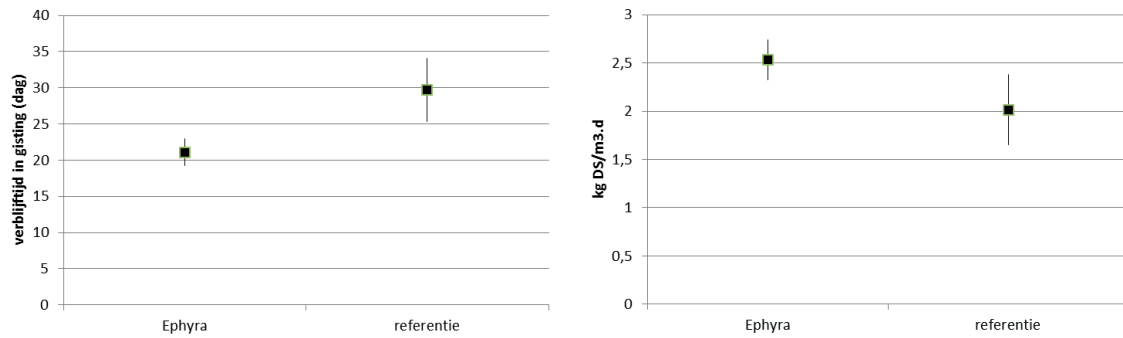
### 5.3 RESULTATEN PILOTONDERZOEK

#### 5.3.1 VERGELIJKING EPHYRA® EN REFERENTIE VAST DEBIET

##### BELASTING EPHYRA® EN REFERENTIE

In de eerste fase van de pilottesten werden de Ephyra®- en referentiereactor na de opstart met een min of meer constant debiet gevoed. Dit was om beide systemen onder nominale condities te testen en te vergelijken. Figuur 5.4 geeft de gemiddelde verblijftijd en drogestofbelasting voor beide systemen inclusief het 90% betrouwbaarheidsinterval.

FIGUUR 5.4 GEMIDDELTE VERBLIJFTIJD EN DROGESTOFBELASTING EPHYRA® EN REFERENTIE. DE LIJN GEEFT HET 90%- BETROUWBAARHEIDINTERVAL

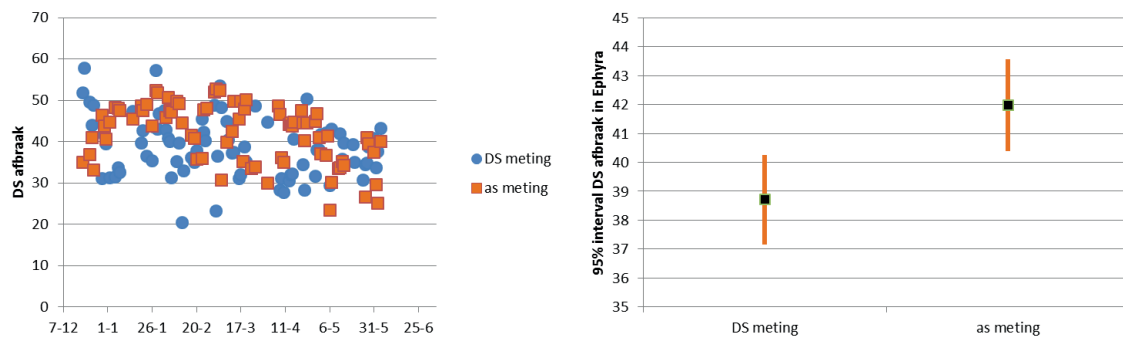


Uit Figuur 5.4 blijkt dat in de praktijk de referentiereactor minder zwaar werd belast en ook een hogere spreiding vertoonde. Dit werd veroorzaakt door technische problemen met de voeding naar de referentiereactor waardoor deze met enig regelmaat niet werd gevoed.

### Drogestofafbraak.

De drogestofafbraak in beide systemen werd gevolgd door het afbraakrendement te berekenen uit de resultaten van drogestof- en asmetingen. Figuur 5.5 geeft de resultaten voor de Ephyra®-reactor.

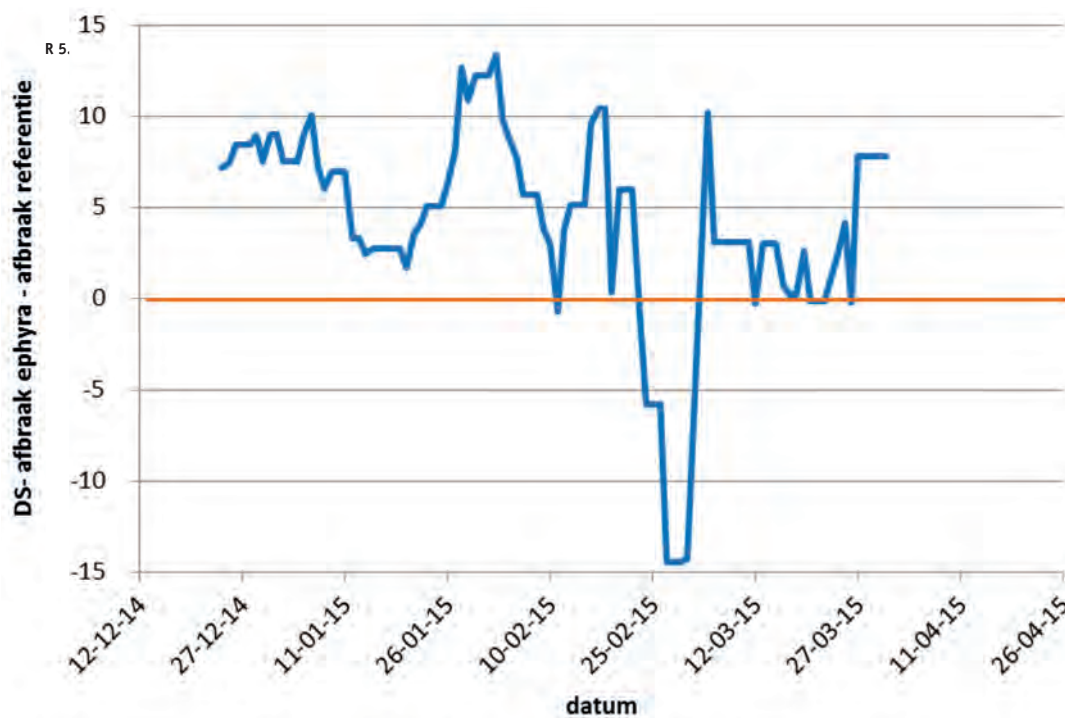
FIGUUR 5.5 DS AFBRAAK IN EPHYRA® IN DE PERIODE 7/12/2014 TOT EN MET 31/5/2015 (LINKS). GEMIDDELTE AFBRAAK EN 95% BETROUWBAARHEIDINTERVAL (RECHTS)



Uit Figuur 5.5 blijkt dat er een sterke fluctuatie was in de meetresultaten. Gemiddeld wordt er op basis van asmetingen een hoger afbraakrendement berekend dan op basis van drogestofmetingen. Het betrouwbaarheidsinterval voor beide berekeningen ligt in dezelfde orde van grootte. Vanwege het verschil in resultaat voor beide metingen en bijbehorende berekeningen is een analyse uitgevoerd om na te gaan welke methode betrouwbaarder wordt geacht. Deze analyse is gegeven in bijlage 3. Hieruit werd geconcludeerd dat de metingen en berekeningen uit drogestof en organische drogestof analyses betrouwbaarder is dan uit asmetingen. In het vervolg van dit rapport worden daarom de resultaten gegeven gebaseerd op drogestof en organische drogestof metingen.

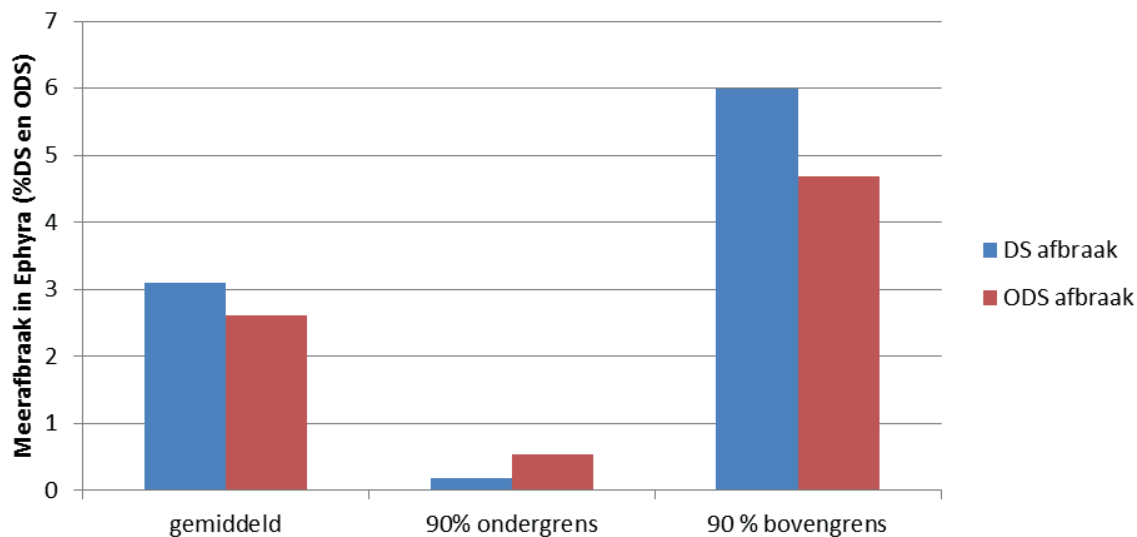
## VERGELIJKING AFBRAAK IN EPHYRA® EN REFERENTIE

Figuur 5.6 geeft het verschil in drogestofafbraak in de Ephyra®- en de referentiereactor.



Uit Figuur 5.6 blijkt op hoofdlijnen, ondanks de fluctuaties, dat de drogestofafbraak in de Ephyra® hoger ligt dan voor de referentiereactor. Om na te gaan of het gemeten verschil relevant is, is een statistische analyse van de meetresultaten gemaakt. Een uitgebreide beschrijving van de methode is gegeven in bijlage 1. Figuur 5.7 geeft het resultaat van de analyse.

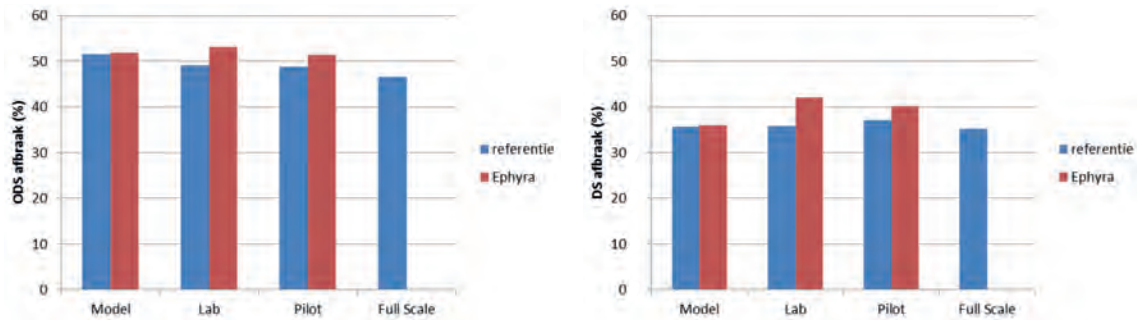
FIGUUR 5.7 MEERAFBRAAK IN EPHYRA® IN VERGELIJKING MET DE REFERENTIE REACTOR. IN DE FIGUUR IS DE GEMIDDELTE MEERAFBRAAK EN DE MET 90%



Uit Figuur 5.7 blijkt dat de drogestofafbraak in Ephyra® hoger ligt dan in de referentie reactor. De gemiddelde meerafbraak bedraagt circa 3% absoluut. De range is 0,2 tot 6% absoluut.

Figuur 5.8 vat de resultaten van de initiële modelberekeningen, de lab- en de pilottestresultaten samen.

FIGUUR 5.8 DROGESTOFAFBRAAK IN EPHYRA® EN REFERENTIE VOLGENS INITIËLE MODELBEREKENINGEN, LABMETINGEN, PILOTPANT RESULTATEN EN DE PRESTATIE VAN DE PRAKTIJKINSTALLATIE (FULL-SCALE) VAN TOLLEBEEK



Uit Figuur 5.8 blijkt dat Ephyra® in het lab en de pilotplant beter presteert dan initieel werd verondersteld. Oorspronkelijk werd een gelijke mate van DS en ODS afbraak verondersteld (zie model in Figuur 5.8) terwijl uit de testen blijkt dat in Ephyra® meer slib wordt afgebroken. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met het feit dat de slibsamenstelling van het ingaande slib voor de referentie en Ephyra® niet gelijk is. Het aandeel primair slib is voor de referentie 67% en voor Ephyra® 39%. Ondanks deze ongunstiger slibsamenstelling wordt in Ephyra® gemiddeld 3% meer drogestof afgebroken. Als de slibsamenstelling in beide systemen gelijk zou zijn (zie ook Figuur 5.4 voor labmetingen), zou een meerafbraak van drogestof in Ephyra® van tenminste 10% absoluut verwacht worden.

### MASSABALANSEN

Om een uitspraak te doen over de nauwkeurigheid van de meetgegevens kunnen massabalansen worden opgesteld. Hoe beter een balans sluit hoe aannemelijker het is dat de bijbehorende meetgegevens kloppen. Om dit na te gaan zijn de volgende balansen opgesteld:

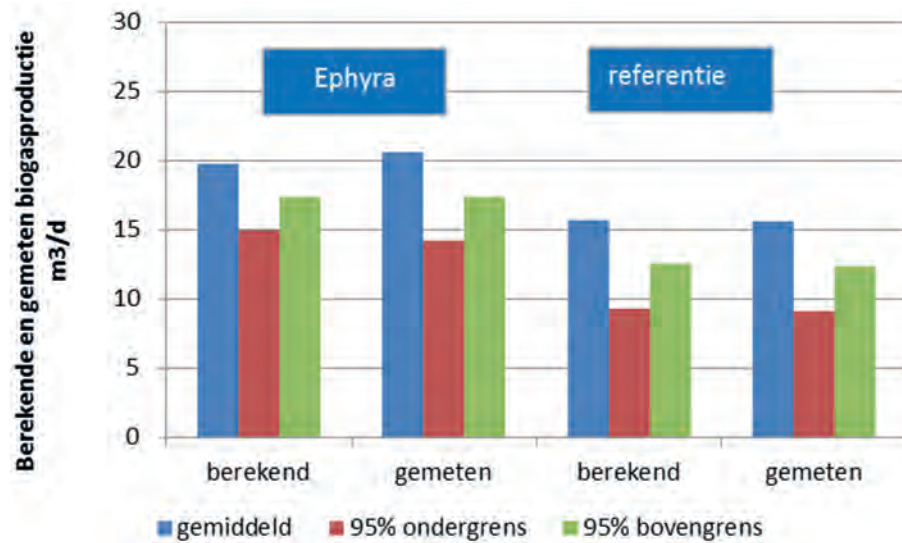
- geproduceerde (gemeten) biogas versus de berekende biogasproductie uit de drogestofafbraak;
- vergelijking drogestof- en CZV-afbraak;
- vergelijking drogestofafbraak en toename ammonium concentratie.

Figuur 5.9 geeft de gemeten en berekende biogasproducties voor de Ephyra®- en referentiereactor.

Uit Figuur 5.9 blijkt dat de gemeten en berekende waarden redelijk overeenstemmen. De lagere biogasproductie voor de referentiereactor wordt naast de gemeten lagere drogestofafbraak ook veroorzaakt door de lagere belasting van de reactor in vergelijking met de Ephyra®.

FIGUUR 5.9

BEREKENDE EN GEMETEN BIOGASPRODUCTIE IN EPHYRA® (LINKS) EN REFERENTIEACTOR (RECHTS). AANGEGEVEN ZIJN DE GEMIDDELDEN EN HET 95% BETROUWBAARHEIDINTERVAL



Tabel 5.1 geeft de resultaten van uitgevoerde aanvullende labanalyses. Hieruit blijkt op hoofdlijnen:

- Voor Ephyra® 1-4 komt de gemeten droge stof afbraak goed overeen met de gemeten CZV afbraak en ammoniumtoename.
- Voor de CSTR is de berekende energiewaarde voor organische drogestof – 3,22 g CZV/g ODS – relatief hoog. De toename in ammonium stemt redelijk overeen met de gemeten afname in drogestof.
- Voor de referentie reactor is de balans minder kloppend. Zowel de gemeten toename in ammonium en de gemeten afname in CZV suggereren een hogere drogestof afbraak dan gemeten.
- Als de CZV afname in de Ephyra® en referentie worden omgezet in drogestof afname waarbij wordt aangenomen dat primair en secundair slib een energiewaarde hebben van 1,8 en 1,4 g CZV/g organische drogestof bedraagt het berekende DS rendement 44% voor Ephyra® en 40,5% voor de referentie. De meerafbraak Ephyra® (3,5%) stemt dan goed overeen met de gemiddelde gemeten meer afbraak in de pilottesten (zie Figuur 5.8).

TABEL 5.1 BEREKENINGEN AANVULLENDE LABANALYSES

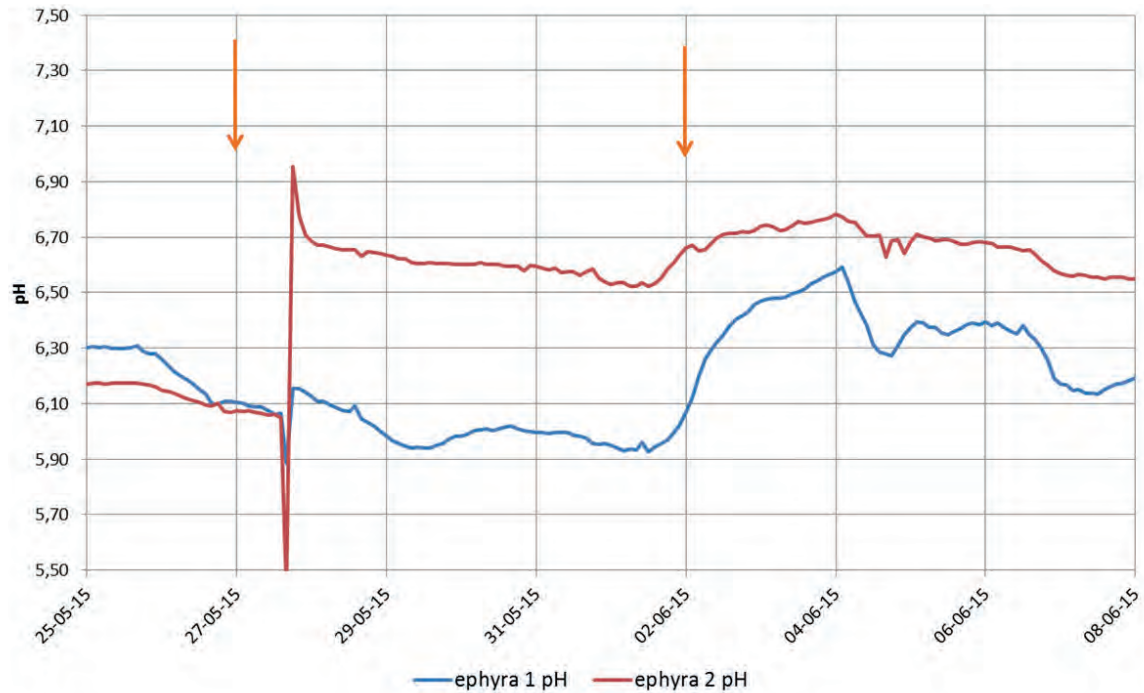
Parameter	Ephyra® 1 – 4		CSTR		referentie		Eenheid
	meting	berekening	meting	berekening	meting	berekening	
afname DS	17,0		3,7		14,7		g/l
toename NH <sub>4</sub> -N	1,0		0,15		1,2		g/l
afname DS		17,4		2,45		20,7	g/l 6% N
		26,1		3,67		31,0	g/l 4% N
afname CZV onopg.	25		11,9		31		
energiewaarde ODS		1,64		3,22		2,21	g CZV/g ODS

Samenvattend kan gesteld worden dat de massabalansen geen aanleiding geven om de bevinding dat in de pilotreactor Ephyra® een hogere slibafbraak was dan in de referentie in twijfel te trekken

### 5.3.2 PRESTATIE EPHYRA® TIJDENS PIEKAANVOER

Tijdens het pilotonderzoek zijn drie pieken getest, te weten korte piek (één dag), typische piek (drie dagen) en lange piek (zeven dagen). Figuur 5.10 geeft het pH verloop in Ephyra® tijdens een lange piek.

FIGUUR 5.10 PH IN EERSTE EN TWEEDE COMPARTIMENT (EPHYRA® 1 EN 2) TIJDENS PIEKAANVOER. HET BEGIN EN EINDE VAN DE PIEK IS GEGEVEN DOOR DE TWEE ORANJE PIJLEN. TIJDENS DE PIEKAANVOER WAS DE VERBLIJFTIJD IN EPHYRA® ZES DAGEN IN PLAATS VAN ACHT ONDER NOMINALE AANVOER



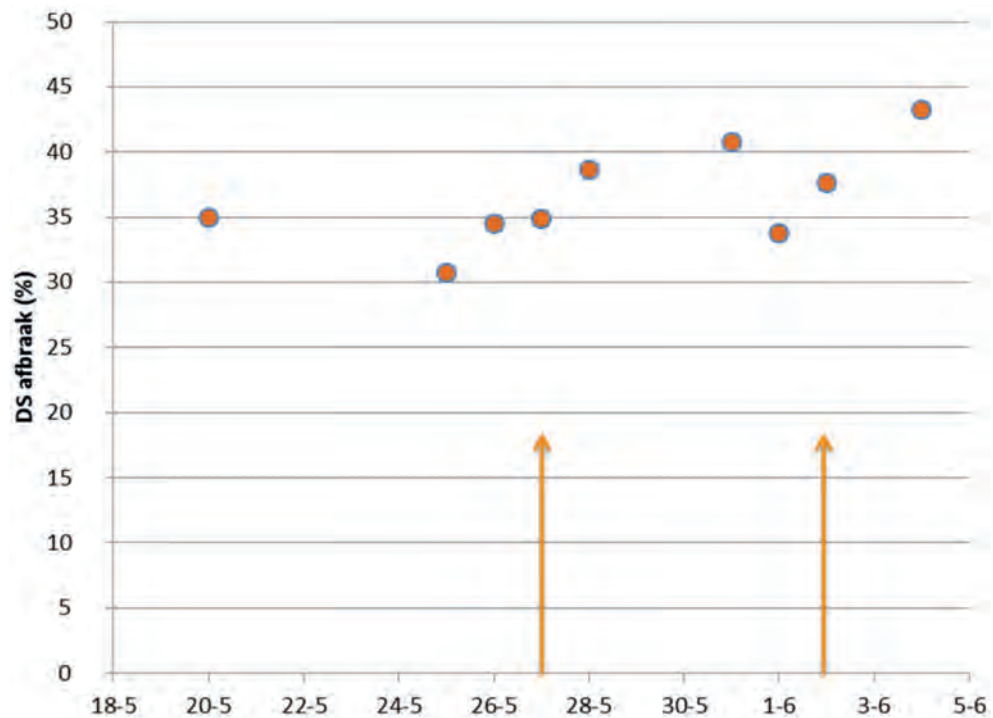
Het is duidelijk dat tijdens piekaanvoer de pH in de gewenste range bleef en er geen sterke pH daling (verzuring) optrad. De reactor functioneerde stabiel. Figuur 5.11 geeft de gemeten drogestofafbraak.

Er is geen sprake van een duidelijke daling van het rendement van de afbraak van droge stof. De geteste pieken van één en drie dagen geven een gelijksoortig beeld. De resultaten van alle geteste pieken zijn gegeven in bijlage 4.



FIGUUR 5.11

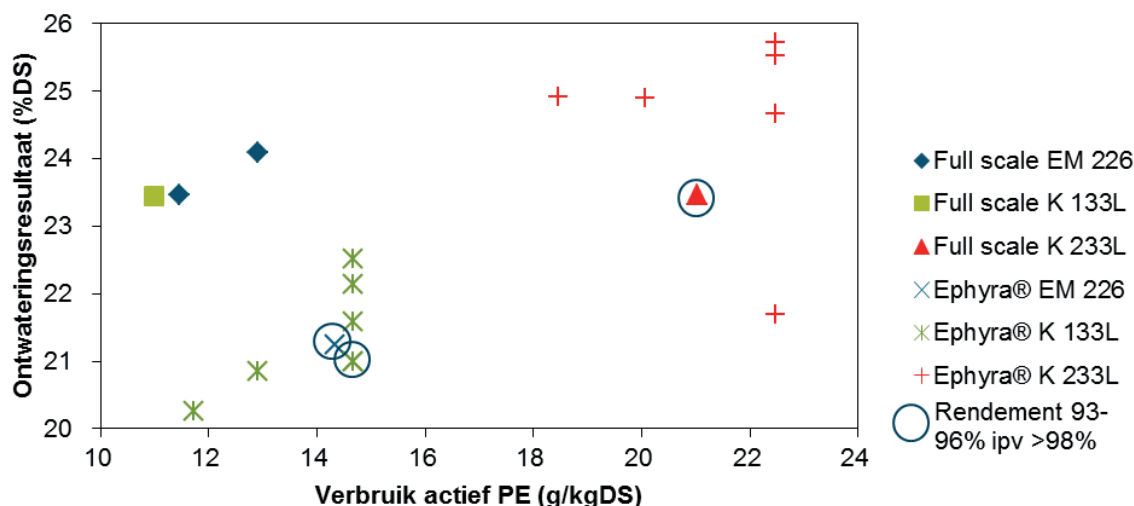
DROGESTOFAFBRAAK IN DE EPHYRA® TIJDENS PIEKAANVOER. HET BEGIN EN EINDE VAN DE PIEK IS GEGEVEN DOOR DE TWEE ORANJE PIJLEN. TIJDENS DE PIEKAANVOER WAS DE VERBLIJFTIJD IN EPHYRA® ZES DAGEN IN PLAATS VAN ACHT ONDER NOMINALE AANVOER



### 5.3.3 ONTWATERINGSTESTEN

Figuur 5.12 geeft de resultaten van de ontwateringstesten. De omcirkelde resultaten hebben een DS-rendement < 98% en worden daarom verder buiten beschouwing gelaten. Het blijkt dat voor Ephyra® de beste resultaten werden verkregen met het product PE K233L. Met de andere twee geteste PE's waren de ontwateringsresultaten minder. Het slib van de praktijkgisting op Tollebeek is minder gevoelig voor het type PE. Het ontwateringsresultaat met dit slib bedroeg 23,5 tot 24,5% DS. Voor Ephyra® slib werd met de juiste PE (K233L) een ontwateringsresultaat van 25 tot 25,5% DS gerealiseerd. Wel waren de PE geteste doseringen hierbij iets hoger. Wat het resultaat bij lagere PE doseringen zou zijn blijft helaas onbekend. Een samenvatting van de ontwateringsresultaten is gegeven in Tabel 5.2. Hieruit blijkt dat de Ephyra® resultaten voor de verschillende PE soorten sterk verschillen en dat de PE keuze daarmee een invloed heeft op de ontwatering van Ephyra®-slib. PE K 233L leidt voor Ephyra®-slib tot het beste resultaat, terwijl dit voor het full-scale slib niet tot verbetering leidt. Daar lijkt het resultaat niet afhankelijk van het type PE.

FIGUUR 5.12 RESULTATEN ONTWATERINGSTESTEN



TABEL 5.2 SAMENVATTING ONTWATERINGSRESULTATEN

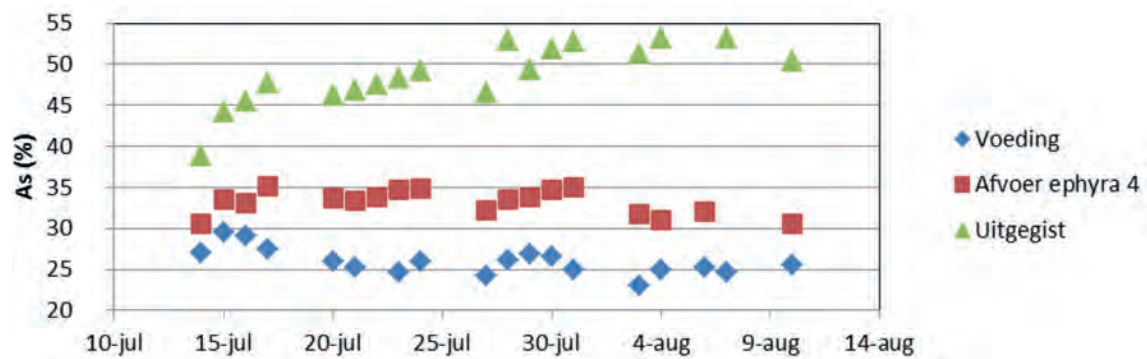
	Full scale			Ephyra®		
	EM 226	K 133L	K 233L	EM 226	K 133L	K 233L
Aantal testen	2	1	1	1	7	6
aantal testen met ontwateringsresultaat >98%	2	1	0	0	6	6
Slibtoevoer (m <sup>3</sup> /h)	1,20	1,60	1,20	1,20	1,20	1,20
PE dosering (g actief PE/kg DS)	Min	11,46			11,73	18,46
	Max	12,90	11,00	21,03	14,33	22,47
	Gem	12,18			13,99	21,40
DS ontwaterd slib	Min	23,47			20,25	21,69
	Max	24,08	23,44	23,47	21,24	22,52
	Gem	23,78			21,33	24,57

#### 5.3.4 FOSFAATNEERSLAG EN STRUVIETVORMING

Gedurende het pilotonderzoek is regelmatig slib afgetapt uit de onderaflaat. Met uitzondering van het eerste compartiment in de Ephyra® zijn er in dit slib, dat van de bodem van de reactor kwam, fosfaathoudende mineralen waargenomen. De kristallen bezinken en accumuleren dus (deels) op de bodem van de reactor. De observaties van fosfaatneerslag was de aanleiding tot een testperiode waarin magnesiumchloride is gedoseerd om struvietvorming nader te onderzoeken.

Gedurende één maand is daarom aan de Ephyra®-reactor MgCl<sub>2</sub> gedoseerd om na te gaan in welke mate fosfaatneerslag optreedt. Figuur 5.13 geeft het asgehalte in het slib gedurende deze periode. Duidelijk is de toename in het asgehalte van het uitgegiste Ephyra® slib van circa 40 tot 50 - 55%. Dit duidt op de vorming van fosfaatkristallen.

FIGUUR 5.13 ASGEHALTE IN SLIB VOOR DE GISTING (VOEDING) NA DE EPHYRA® REACTOR (AFVOER EPHYRA® 4) EN NA DE NAGESCHAKELDE CSTR (UITGEGIST SLIB) GEDURENDE DE PERIODE MET  $MgCl_2$  DOSERING



Fosfaatkristallen werden zowel in de Ephyra® reactor en de nageschakelde CSTR gevormd. Het grootste gedeelte wordt echter in de CSTR gevormd. Op basis van modelberekeningen wordt geschat dat van de totale slibafvoer bij dosering van  $MgCl_2$  circa 15% uit fosfaatneerslag (struviet) bestaat. Ook als er geen  $MgCl_2$  wordt gedoseerd worden in de Ephyra®-reactor fosfaatkristallen gevormd; dit wordt onder ander op basis van visuele waarnemingen geschat op circa 1/3 van de gevormde fosfaatneerslag bij  $MgCl_2$  dosering.

### 5.3.5 KENMERKEN EPHYRA® TECHNOLOGIE

In hoofdstuk 2 is al ingegaan op de hypothese waarom een Ephyra® gisting beter zou presteren dan een conventionele gisting. De genoemde parameters zijn:

- snellere omzettingssnelheden;
- betere slibleeftijdsspreiding;
- fasescheiding;
- ongevoeliger voor piekbelastingen;
- hogere slibleeftijd door ont koppeling hydraulische en slibverblijftijd.

#### SNELLERE OMZETTINGSSNELHEDEN

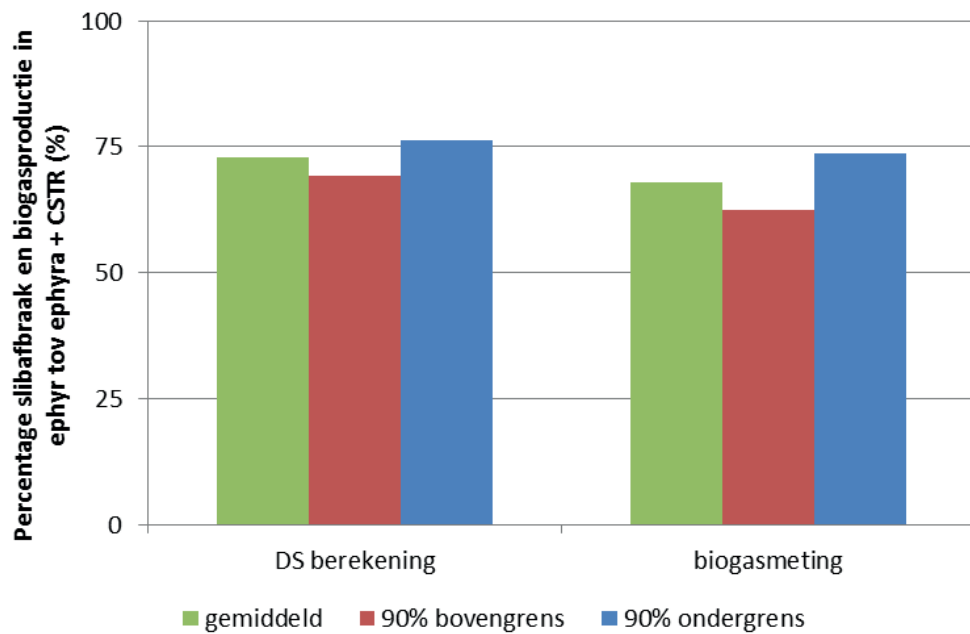
Figuur 5.14 geeft het percentage van de drogestofafbraak in de Ephyra®. Hieruit blijkt dat 70 à 80% van de slibafbraak al optreedt in de Ephyra®. Dit is dus binnen een verblijftijd van zes à acht dagen. De overige 20 - 30% wordt in de nageschakelde CSTR-afgebroken. Dit is een aanwijzing dat in de Ephyra®-reactor de omzettingssnelheden (kg DS/d) sneller zijn dan in de nageschakelde volledige gemengde tank en in de referentiereactor.

#### BETERE SLIBLEEFTIJDSPREIDING

Deze veronderstelling is gebaseerd op hydraulische kenmerken van de Ephyra® en de referentie. In de pilotplant is dit moeilijk aan te tonen. Er kunnen tracerexperimenten worden uitgevoerd maar hiermee wordt alleen de verblijftijdsspreiding van vloeistof en niet die van slibdeeltjes gemeten. Het blijft dus vooralsnog een theoretische benadering.

FIGUUR 5.14

PERCENTAGE VAN DE TOTALE DROGESTOFABBRAAK DAT PLAATSVINDT IN EPHYRA® EN PERCENTAGE VAN DE BIOGASPRODUCTIE IN EPHYRA®, DE OVERIGE AFBRAAK EN BIOGASPRODUCTIE VINDT PLAATS IN DE NAGESCHAKELDE CSTR



### FASENSCHEIDING

Dit betekent dat in een Ephyra®-systeem de verschillende processen die tijdens slibgisting optreden (deels) gescheiden worden en niet allemaal tegelijkertijd plaatsvinden zoals in de referentiereactor.

Figuur 5.15 geeft de gemeten pH's in de Ephyra®-reactor. Het is duidelijk dat de pH vanaf het eerste compartiment (pH=5,9) door de verschillende compartimenten toeneemt. Figuur 5.16 geeft de redoxpotentialen in de verschillende compartimenten.

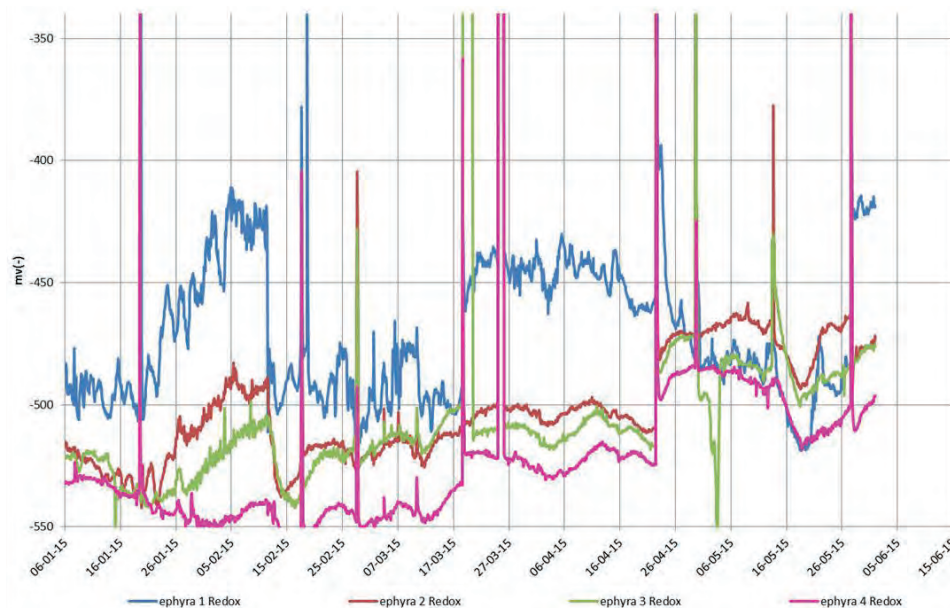
FIGUUR 5.15

PH IN DE VERSCHILLENDE COMPARTIMENTEN VAN DE EPHYRA®-REACTOR. EPHYRA® 5 IS DE NAGESCHAKELDE CSTR



FIGUUR 5.16

REDOXPOTENTIALAAL IN DE VERSCHILLENDE COMPARTIMENTEN VAN DE EPHYRA® REACTOR

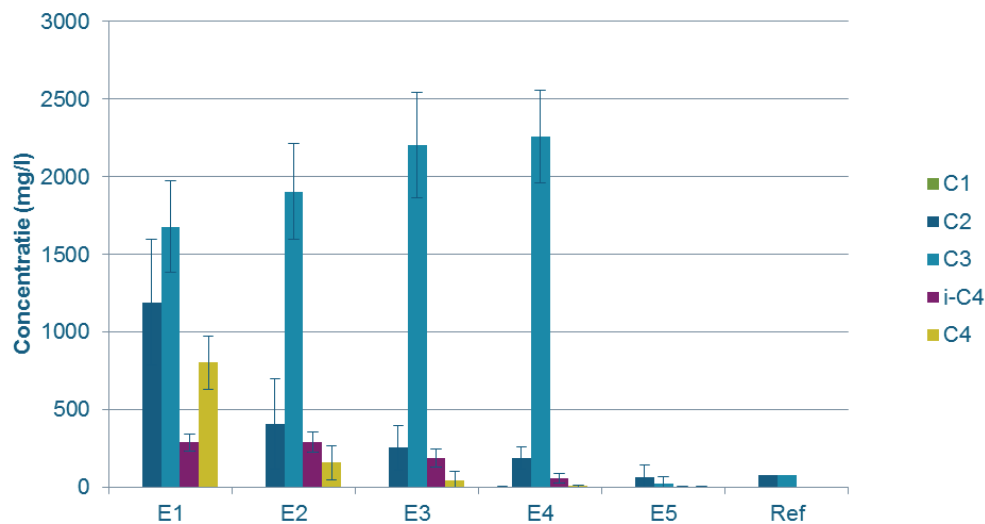


Het is duidelijk dat redox potentiaal vanaf het eerste compartiment steeds verder daalt naar meer negatieve waarden. De gemeten waarden, zijnde kleiner dan -400 mV, zijn zeer laag en onwaarschijnlijk te noemen. Dit hing samen met vervuiling en de gevoeligheid van de redox sensor.

Figuur 5.17 geeft het verloop van de vetzuurconcentratie door de Ephyra®.

FIGUUR 5.17

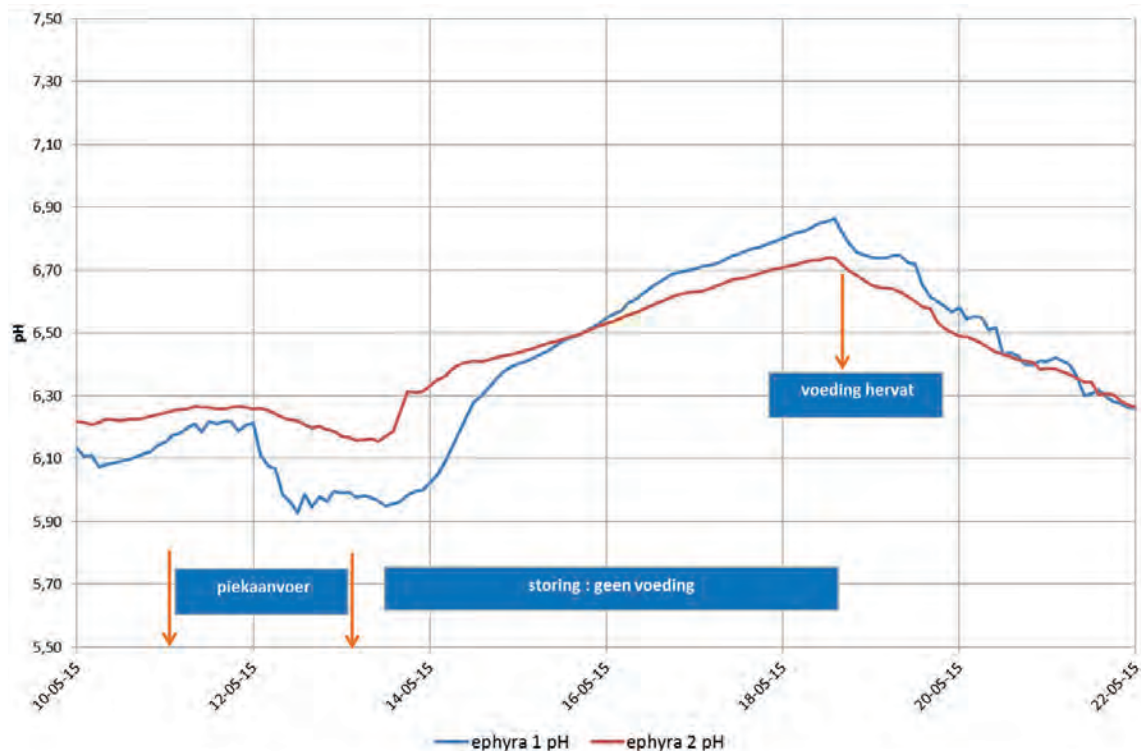
GEMIDDELDDE VETZUURCONCENTRATIES IN DE VERSCHILLENDE COMPARTIMENTEN VAN DE EPHYRA®-REACTOR EN HET 95%-BETROUWBAARHEIDSINTERVAL. E5 IS DE NAGESCHAKELDE CSTR. REF IS DE REFERENTIEREACTOR



Uit de figuren blijkt dat in het eerste compartiment voornamelijk hydrolyse en verzuring optreedt. In Ephyra® 2, 3 en 4 zien we ook dat acetogenese en methaanvorming al optreden waarbij azijnzuur en boterzuur al nagenoeg volledig worden omgezet naar methaan. De concentraties propionzuur nemen niet af in de Ephyra®-reactor. De afbraak van propionzuur vindt voornamelijk plaats in de nageschakelde reactor (E5). Uit Figuur 5.17 kan ook worden opgemaakt dat er relatief weinig verschil is tussen compartiment 3 en 4 in de Ephyra®.

Om fasescheiding te borgen, is het belangrijk teveel ingroei van methanogene biomassa in het eerste compartiment te verhinderen. Op zich zijn de condities in de het eerste compartiment (lage pH en korte verblijftijd) van de Ephyra® ongunstig voor de groei van methanogenen. Wel wordt er met de recirculatiestroom van het vierde naar het eerste compartiment van de Ephyra® methanogene biomassa ingebracht. Dit betekent ook dat er een maximum zit aan de hoeveelheid die gerecirculeerd kan worden om een goede fasescheiding te kunnen handhaven. In de pilotplant wordt de recirculatie gebruikt om de pH in het eerste compartiment te controleren. De recirculatiefactor die nodig is om de pH te controleren hangt af van de gewenste pH, de alkaliniteit van de slibstromen, de vetzuurproductie in het eerste compartiment en de belasting van het systeem. Naast de recirculatiefactor is het ook belangrijk om de verblijftijd in de Ephyra® voldoende kort te houden. Dit betekent dat er naast een minimale verblijftijd (piekaanvoer) ook een maximale waarde is. Het effect van verblijftijd op fasescheiding wordt enigszins geïllustreerd in Figuur 5.18. Tijdens het testen van een piekaanvoer viel de installatie in storing en was er gedurende circa vijf dagen geen voeding en geen recirculatie van het vierde naar het eerste compartiment van de Ephyra®. Uit Figuur 5.18 blijkt duidelijk dat in deze periode de pH in het eerste compartiment steeg. Dit is een aanwijzing dat in dit compartiment methaanvorming optreedt. Na de herstart van de voeding duurt het ongeveer weer vijf dagen voordat de oorspronkelijke toestand is hersteld.

FIGUUR 5.18 VERLOOP PH EPHYRA® TIJDENS PIEK AANVOER EN NA UITVAL VOEDING



### EFFECT PIEKBELASTINGEN

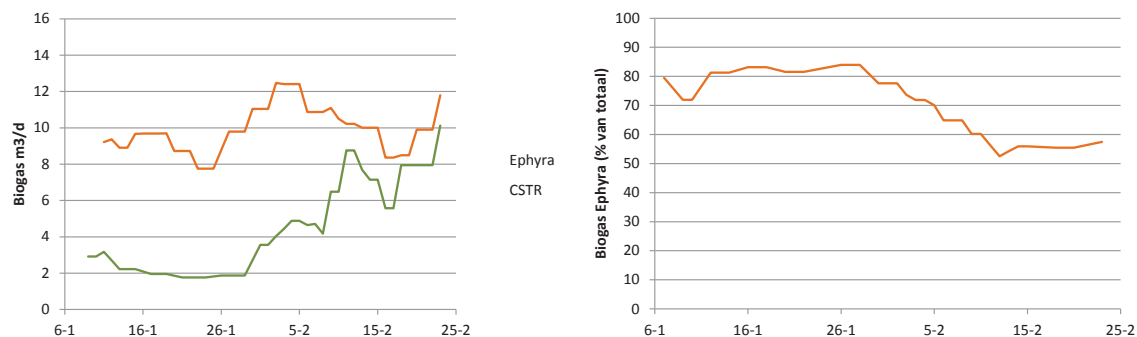
Eerder is aangegeven dat Ephyra® tijdens piekbedrijf goed bleef functioneren. Een ander kenmerk van Ephyra® is dat een groot deel van de afbraak (70 - 80%) al in de Ephyra® reactor plaatsvindt. 20 - 30% van de afbraak gebeurt in de nageschakelde CSTR. Gelet op de verblijftijd in de CSTR wordt niet de volledige potentiële afbraakcapaciteit benut. De verwachting is daarom dat tijdens hogere belastingen waarbij mogelijk het verwijderingsrendement in de eerste vier compartimenten van de Ephyra® iets minder wordt, dit wordt gecompenseerd door

een hogere afbraak in de nageschakelde reactor. Dit is dus een soort “biologische” buffer die piekaanvoeren mede opvangt en hierbij een goede en continue slibafbraak borgt.

Figuur 5.19 geeft het verloop van de DS afbraak en de biogasproductie in de Ephyra® en de nageschakelde reactor na de belastingverhoging van 16 januari 2015. Uit de figuur blijkt dat na de belastingverhoging op 16 januari 2015, de afbraak van droge stof in de eerste vier compartimenten in de Ephyra®-reactor bij benadering gelijk bleef. Dit vertaalde zich echter niet in een hogere biogasproductie. Dit betekent dat de extra afgebroken droge stof werd omgezet in opgeloste CZV die nog niet werd omgezet in methaan. Deze extra omzetting naar methaan vond vervolgens plaats in de nageschakelde reactor waarin voldoende overcapaciteit aanwezig was om de extra gevormde CZV om te zetten in methaan.

De mate waarin de nageschakelde CSTR hogere belastingen en tot welke belastingen kan opvangen kan uit het pilotonderzoek niet worden afgeleid.

FIGUUR 5.19 BIOGASPRODUCTIE NA VERHOOGING VAN DE BELASTING OP 16 JANUARI 2015. DE DS AFBRAAK BLEEF IN DEZE PERIODE GELIJK

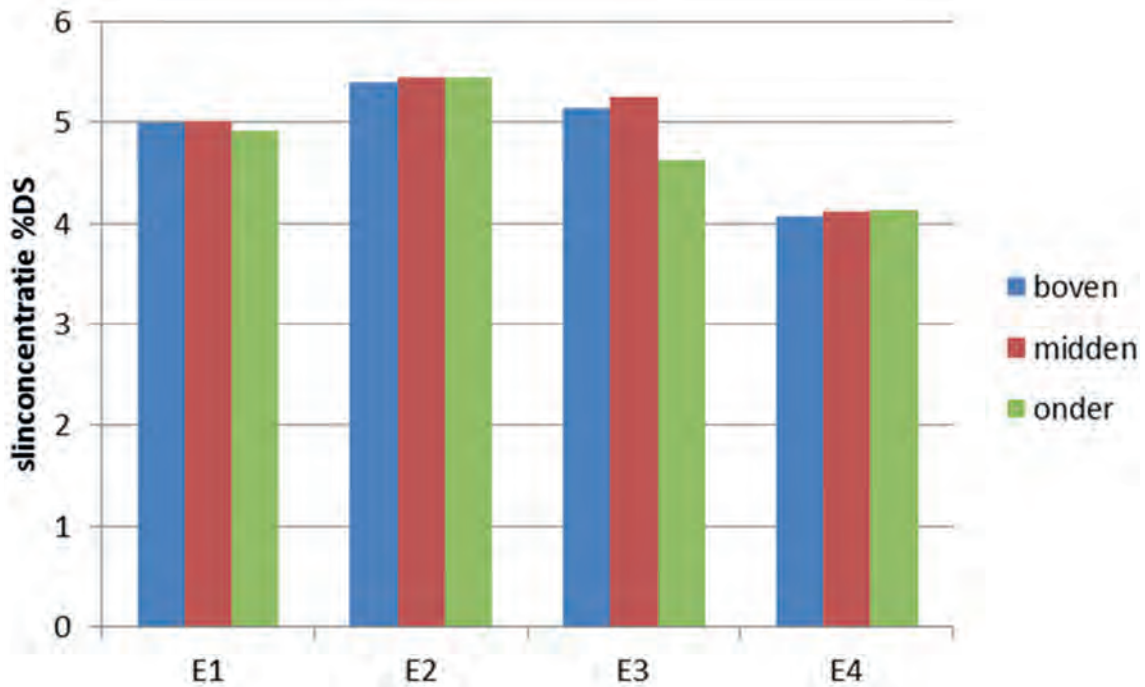


#### Hogere slijbleeftijd door ontkoppeling van hydraulische en slibverbleeftijd

Deze hypothese gaat ervan uit dat door discontinue menging en slibbezinking in de Ephyra®-compartimenten de slibverbleeftijd langer is dan de hydraulische verbleeftijd. Figuur 5.20 laat de resultaten zien van bezinkproeven met het slib uit de verschillende compartimenten van de Ephyra®-reactor.

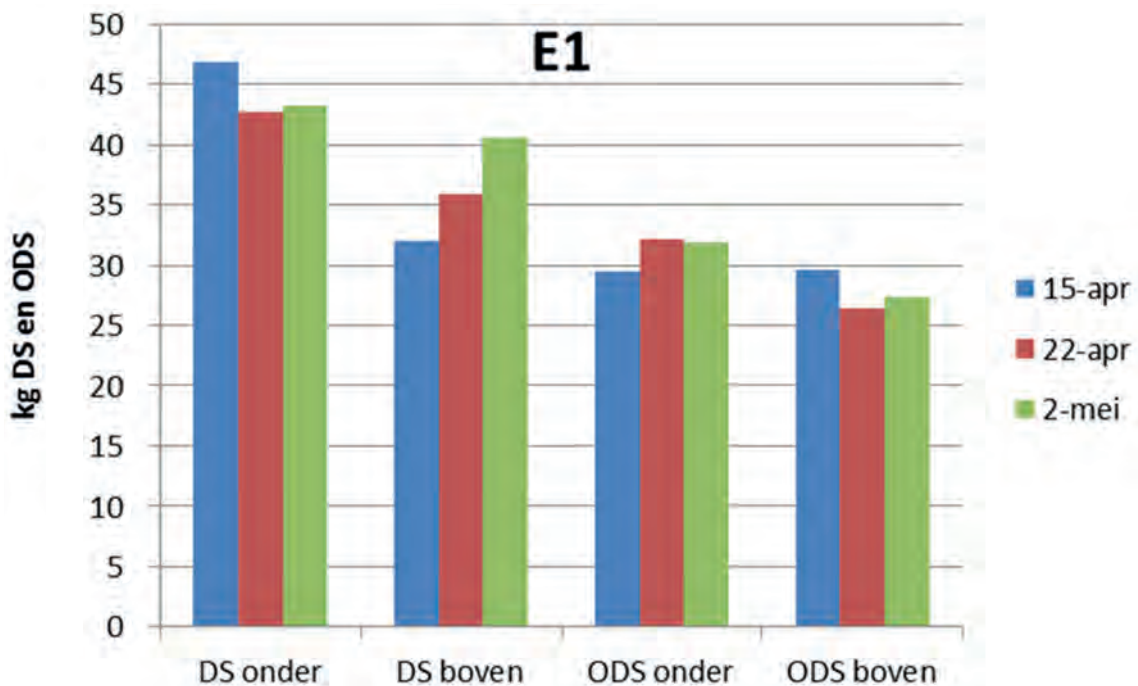
Hieruit blijkt er niet werkelijk bezinking optreedt. Dit zou betekenen dat er geen ont koppeling is en de slibverbleeftijd nagenoeg gelijk is aan de hydraulische verbleeftijd.

FIGUUR 5.20 SLIBCONCENTRATIES BOVEN, MIDDEN EN OP DE BODEM VAN EEN MAATCYLINDER NA 2 UUR BEZINKING VOOR SLIB UIT DE VIER COMPARTIMENTEN VAN EPHYRA®



Het feit dat er geen ont koppeling is van de slib- en hydraulische verblijftijd is ook geïllustreerd in Figuur 5.21.

FIGUUR 5.21 TYPISCHE VERDELING SLIBCONCENTRATIES BOVEN EN ONDER IN EERSTE EPHYRA®-COMPARTIMENT



Uit Figuur 5.21 blijkt dat de concentraties organische stof onder en boven in de reactor nagenoeg gelijk zijn. Het maximale gemeten verschil bedraagt circa 5 g/l. Als met dit verschil wordt gerekend zou de slibverblijftijd, bij een hydraulische verblijftijd van twee dagen, circa 2,1 - 2,2 dag worden. Er is dus niet echt een duidelijke veel hogere slibverblijftijd dan de hydraulische verblijftijd. Dit is ook enigszins logisch gelet op de fasescheiding die optreedt. Als er inderdaad



een lange slibverblijftijd in het eerste compartiment zou zijn, mag verwacht worden dat zich hierin ook een actieve methanogene biomassa ontwikkeld. Dit is echter niet het geval.

#### 5.4 EVALUATIE EPHYRA® ONDERZOEK

De resultaten van de pilotplant bevestigen het beeld van de eerder uitgevoerde labtesten dat de Ephyra®-gisting beter presteert dan oorspronkelijk in de business case aangenomen. De oorspronkelijke aanname was een gelijke afbraak in de Ephyra® en de referentie (huidige situatie). Hierbij moet in ogenschouw worden genomen dat bij de Ephyra® variant secundair slib van RWZI Lelystad wordt meevergist, terwijl in de huidige situatie (referentie) alleen primair en secundair slib van RWZI Tollebeek wordt vergist. Het aandeel (slechter afbreekbaar) secundair slib is in de Ephyra® variant dus hoger. De absolute meerafbraak in Ephyra® was, ondanks een hoger aandeel secundair slib in de slibaanvoer, circa 3% drogestof. Als de referentie en Ephyra® beide met Tollebeek en Lelystad slib worden gevoed – zoals getest is op het lab – bedraagt de meerafbraak 10% drogestof.

Voor de werking van de Ephyra®-reactor lijkt fasescheiding een belangrijke parameter. In het eerste Ephyra®-compartiment ligt het accent op verzuring en hydrolyse. In de volgende compartimenten gaan ook de overige processen (acetogenese en methanogenese) steeds meer een rol spelen. In hoeverre fasescheiding de oorzaak zou zijn voor een betere afbraak van droge stof in de Ephyra® dan in de referentiereactor is niet eenduidig aan te geven. Om de fasescheiding te handhaven mag de verblijftijd in de Ephyra® niet te lang worden en is er een maximum gebonden aan de recirculatie van het vierde naar het eerste compartiment.

Ontkoppeling van de slib- en hydraulische verblijftijd is niet aangetoond.

Bij de in de pilotplant geteste piekaanvoeren bleef de Ephyra® reactor goed functioneren. Met de ingestelde recirculatieregeling was de pH goed te regelen. Loogdosering was niet nodig. Uit het onderzoek is ook gebleken dat de nageschakelde CSTR eveneens als “biologische buffer” kan optreden om bij hogere belastingen een eventueel iets minder functioneren van de Ephyra® op te vangen. De grens van het systeem is echter nog onbekend. Wat is de daadwerkelijke minimale verblijftijd en/of maximale belasting? Voor de case Tollebeek is deze vraag niet relevant omdat de condities waaronder de demonstratieplant wordt bedreven in de pilot getest zijn.

Uit de ontwateringstesten is gebleken dat Ephyra® uitgegist slib beter wordt ontwaterd (+/- 1%) dan slib uit de referentiereactor en de full-scale installatie. Wel was het PE verbruik tijdens de testen hoger en is de PE keuze voor Ephyra®-slib belangrijker dan het full scale slib.

#### 5.5 CONCLUSIES

De belangrijkste conclusies zijn:

- Bij een constante aanvoer is de afbraak in de Ephyra® beter dan de referentiereactor. De meerafbraak, ondanks het hogere aandeel secundair slib en de hogere belasting bij Ephyra®, bedroeg gemiddeld 3% droge stof. Bij een gelijke samenstelling van het ingaande slib blijkt uit de labexperimenten een meerafbraak van 10%.
- Ephyra® functioneert goed en robuust tijdens piekbelasting waarbij de pH goed regelbaar is met alleen recirculatie en de afbraak van droge stof gelijk blijft.
- Voor de werkhypothese wordt uitgegaan van Tabel 5.3.

TABEL 5.3 WERKHYPOTHESE EPHYRA®

Hypothese	Waar?	Consequentie
Effectievere slibverblijftijdspreiding dan in CSTR	Ja *)	Geen
Betere omzettingskinetiek door meer propstroomkarakter	Ja *)	Geen
Snellere omzetting	Ja	Geen
Ontkoppeling slib en hydraulische verblijftijd	Nee	Mengregime en type menging niet kritisch
Fase scheiding	Ja	Ontwerp recirculatie regeling Hydraulische verblijftijd niet te hoog en niet te laag
Betere ontwatering	Ja	Geen

\*) Theoretische beschouwingen. Niet in pilotplant als zodanig gemeten.

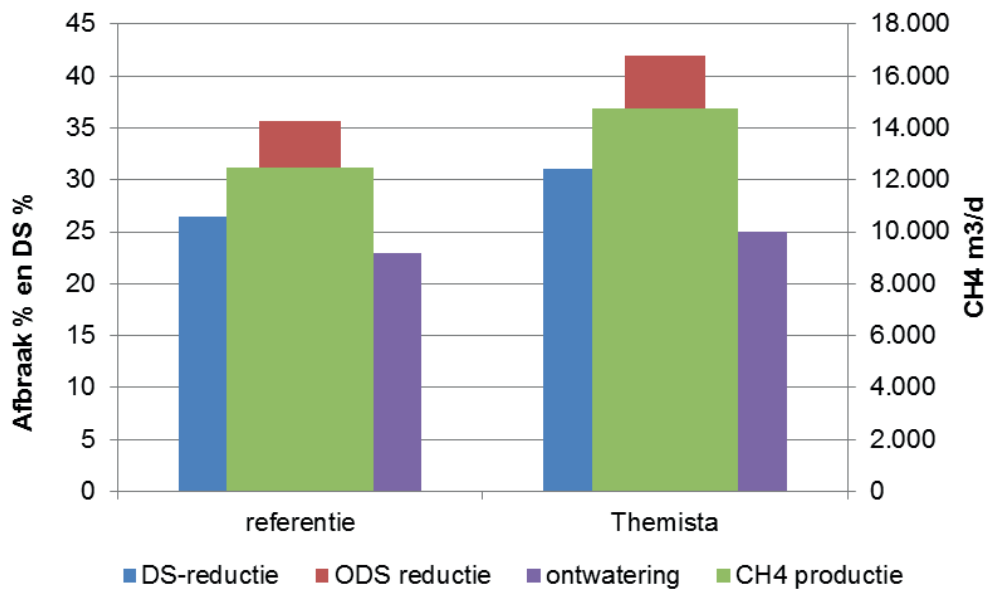
# 6

## RESULTATEN THEMISTA®

### 6.1 INITIËLE MODELBEREKENINGEN

Voor de uitvoering van de lab- en pilottesten voor de case Kralingseveer is via modelberekeningen met het model van Chen en Hashimoto nagegaan in hoeverre Themista® technologie voordelen biedt. De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in Figuur 6.1.

FIGUUR 6.1 MODELBEREKENINGEN KRALINGSEVEER. GEGEVEN ZIJN DE DROGESTOF EN ORGANISCHE DROGESTOF AFBRAAK, DE METHAANPRODUCTIE, EN DE DROGESTOFGEHALTE NA SLIBONTWATERING



In het initiële model was uitgegaan van een verbetering van de drogestofafbraak na Themista®-voorbehandeling van 5% absoluut. De resultaten van de modelberekeningen zijn aanleiding geweest om de resultaten en aannames te controleren via labtesten.

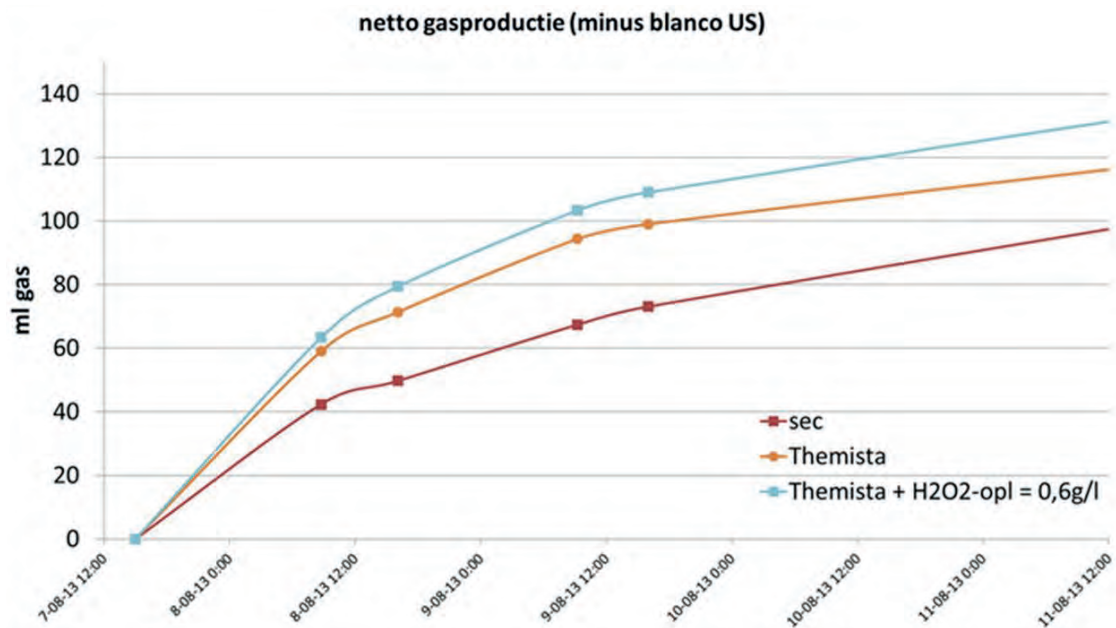
### 6.2 RESULTATEN LABONDERZOEK

#### 6.2.1 BATCHTESTEN

Met batchtesten zijn de effecten van verschillende behandelmethodes getest: tijd, temperatuur, toevoeging van natriumbicarbonaat, natronloog en waterstofperoxide en ultrasoon behandelen. Uiteindelijk is de gekozen Themista® voorbehandeling die is toegepast binnen dit onderzoek een temperatuurbehandeling (30 min, 60-70°C) plus een dosering van een waterstofperoxide-oplossing. De meerafbraak tijdens de batchtesten bedroeg circa 5% organische droge stof absoluut.

Figuur 6.2 illustreert het effect van Themista® behandeling op secundair slib. Er wordt sneller en meer biogas in de batchtest geproduceerd, en dus ook sneller en meer biomassa afgebroken.

FIGUUR 6.2 BIOGASPRODUCTIE TIJDENS BATCHTESTEN VAN ONBEHANDELD SECUNDAIR SLIB (SEC), THERMISCHE BEHANDELD SLIB (THEMISTA®) EN THERMISCH/CHEMISCH BEHANDELD SLIB (THEMISTA® + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)



### 6.2.2 CONTINU-PROEVEN

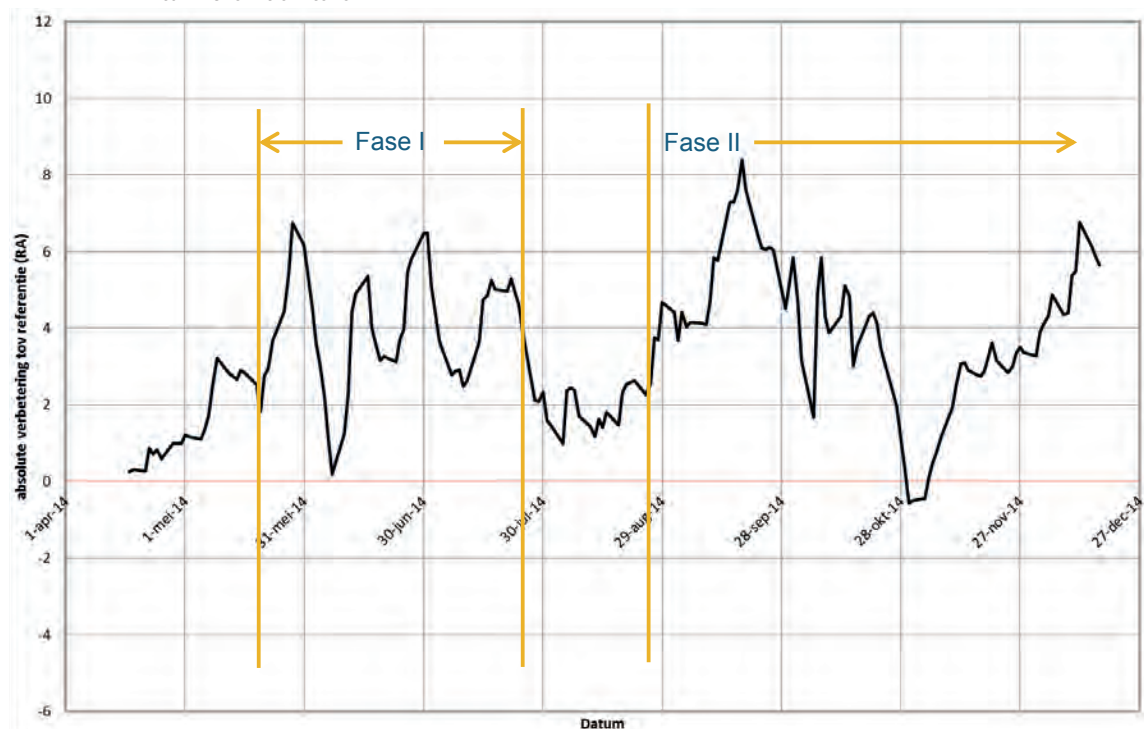
In het laboratorium en onderzoeksruimte van Royal HaskoningDHV zijn labtesten met het slib van Kralingseveer uitgevoerd. Een uitgebreid overzicht van de resultaten is gegeven in bijlage 2.

Figuur 6.3 geeft de absolute verbetering in ODS afbraak weer voor de Themista® reactor gedurende het twee jaar durende onderzoek. De volgende periodes worden onderscheiden in de onderzoeksfase:

- Stabilisatiefase I: na technische aanpassingen slibverwarming 10 april t/m 14 mei.
- Stabiele fase I: 15 mei t/m 23 juli.
- Stabilisatiefase II: na verkorten verblijftijd (20 dagen -> 16 dagen) 24 jul t/m 22 augustus.
- Stabiele fase II: 25 augustus t/m 18 december.

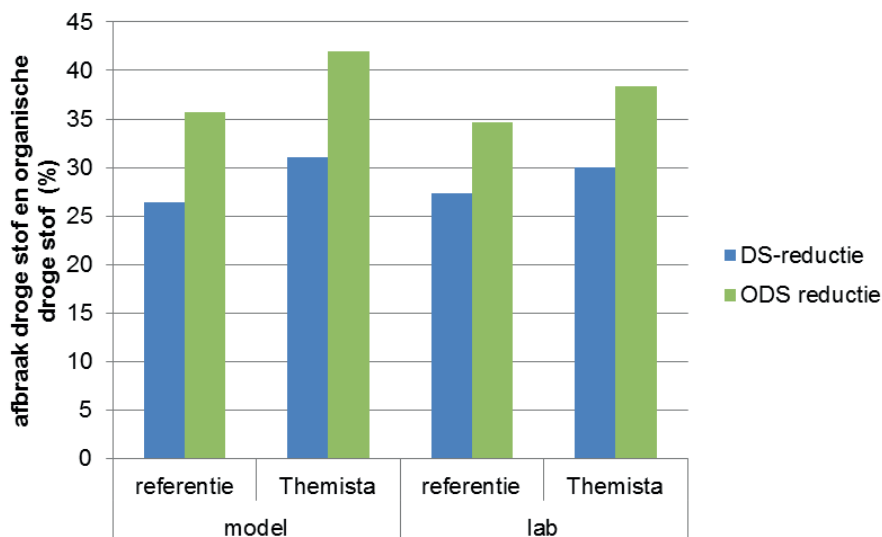
Figuur 6.3 laat zien dat in de stabiele fases Themista® een hogere ODS afbraak heeft ten opzichte van de referentie.

FIGUUR 6.3 ABSOLUTE VERBETERING VAN HET ODS-VERWIJDERINGSRENDEMENT (%) VOOR THEMISTA® TEN OPZICHT VAN DE REFERENTIE TIJDENS DE CONTINUE SLIBGISTINGSTESTEN



De gemiddelde verbetering van de drogestofafbraak in de labtesten na behandeling met Themista® is gegeven in Figuur 6.4. Hieruit blijkt dat de gemeten absolute verbetering in afbraak van droge stof na Themista® (ca. 3%) lager was dan aangenomen in de initiële modelberekeningen. De verbetering was echter nog steeds zodanig dat een positieve business case voor Kralingseveer mogelijk was. Dit was genoeg reden om het systeem op pilotschaal te testen.

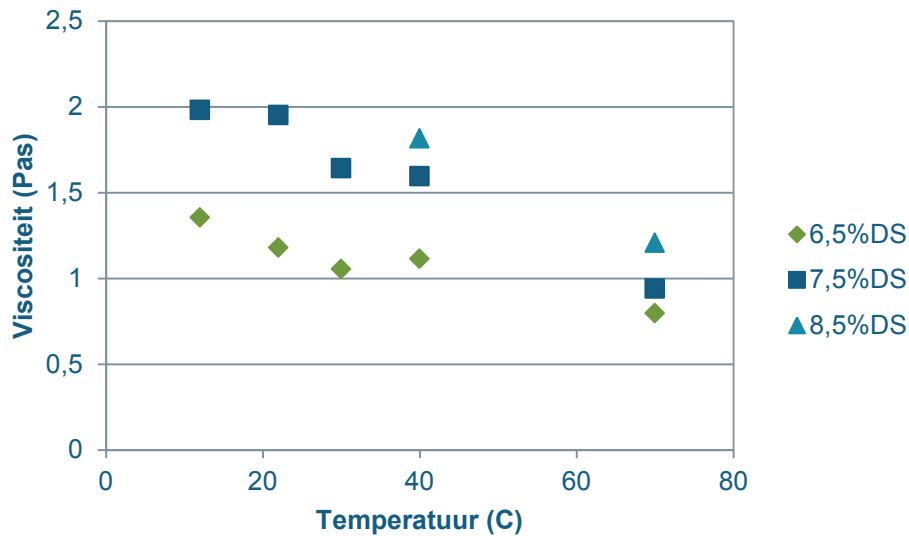
FIGUUR 6.4 GEMIDDELDE AFBRAAK TIJDENS LAB TESTEN EN DE RESULTATEN VAN DE MODELBEREKENINGEN



Tijdens de labtesten is ook het effect van verhitting op de slibviscositeit getest. Hierbij is de viscositeit van secundair slib, dat met een bandindikker tot 6,5, 7,5 en 8,5% DS is ingedikt, bij verschillende temperaturen bepaald. In Figuur 6.5 zijn de resultaten weergegeven. Door te hoge viscositeit is het niet mogelijk geweest om bij temperaturen lager dan 40 °C de viscositeit goed te bepalen met slib van 8,5%.

FIGUUR 6.5

EFFECT VAN TEMPERAATUUT OP DE VISCOSITEIT (STABIELE WAARDE, HELFT VAN MINIMALE VISCOSITEIT) VAN SECUNDAIR SLIB NA DE BANDINDIKKER BIJ VERSCHILLENDE PERCENTAGES DROGE STOF



In Figuur 6.5 is te zien dat de viscositeit van het secundaire slib afneemt naarmate de temperatuur toeneemt. Daarnaast heeft slib met het laagste gehalte droge stof ook de laagste stabiele viscositeit.

Zoals verwacht is de viscositeit voor slibstromen met een hogere concentratie droge stof hoger en neemt de viscositeit door verwarming af.

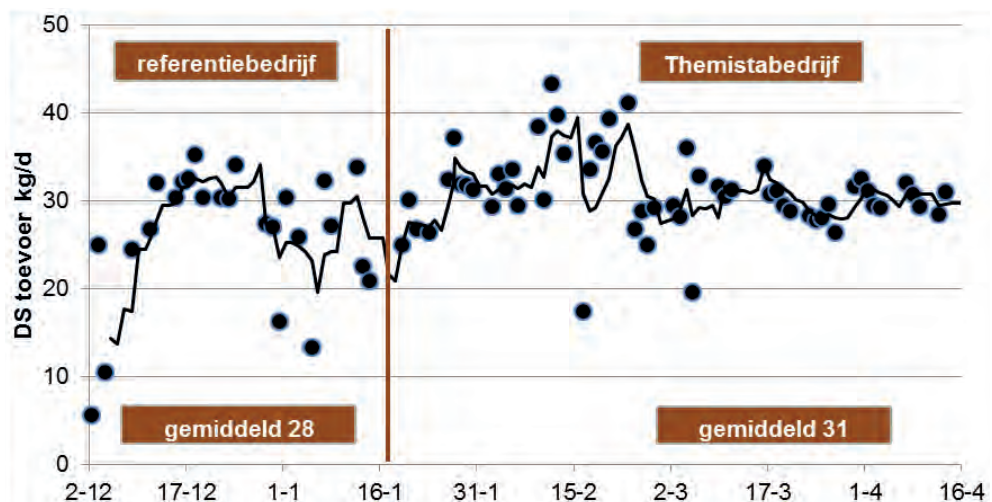
## 6.3 RESULTATEN PILOTONDERZOEK

### 6.3.1 VERGELIJKING THEMISTA® EN REFERENTIE FASE 1

In de eerste fase van het pilotonderzoek (december 2014 – april 2015) was slechts één pilotreactor op Kralingseveer aanwezig. De reactor werd na opstart als referentiereactor bedreven; er werd geen slibvoorbehandeling toegepast. Het referentiebedrijf duurde van 1 december 2014 tot en met 15 januari 2015. Vanaf 15 januari 2015 werd de reactor omgezet naar Themista®-bedrijf en werd het slib voorbehandeld alvorens het werd vergist. Figuur 6.6 geeft de belasting van de pilotreactor tijdens referentie- en Themista®-bedrijf.

FIGUUR 6.6

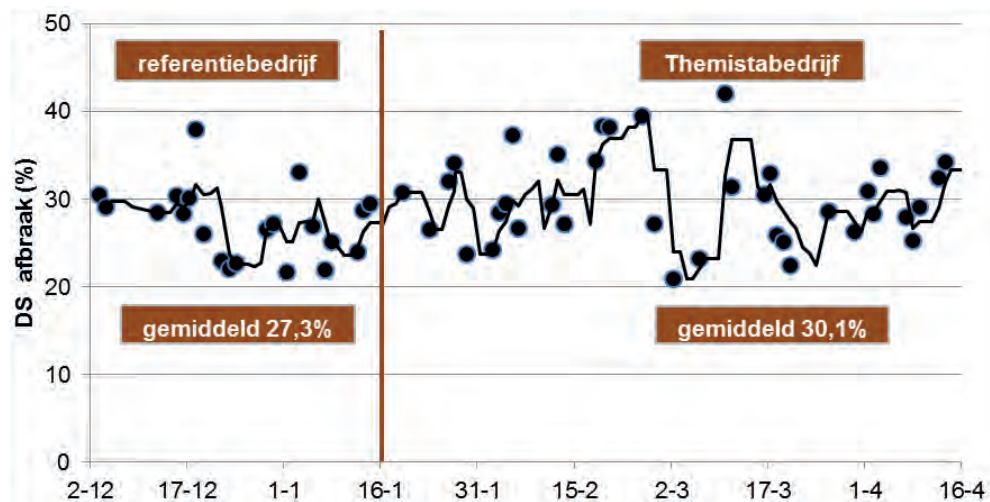
BELASTING PILOT REACTOR (KG DS/D) TIJDENS REFERENTIE- EN THEMISTA® BEDRIJF



De gemeten afbraak van droge stof is gegeven in Figuur 6.7.

FIGUUR 6.7

DROGESTOFABBRAAK (%) TIJDENS REFERENTIE- EN THEMISTA®-BEDRIJF



Figuur 6.7 suggereert een hoger afbraakpercentage voor droge stof bij toepassen van Themista® van gemiddeld 2,8% absoluut. Echter, er is geen directe vergelijking tussen beide systemen te maken, omdat ze niet gelijktijdig operationeel waren. Slibeigenschappen waaronder de slibafbreekbaarheid kunnen tijdens de periode van referentie- en Themista®-bedrijf wezenlijk verschillen. Er kunnen daarom geen echte conclusies worden getrokken over een eventuele verbetering van de slibafbraak na een Themista®-voorbehandeling.

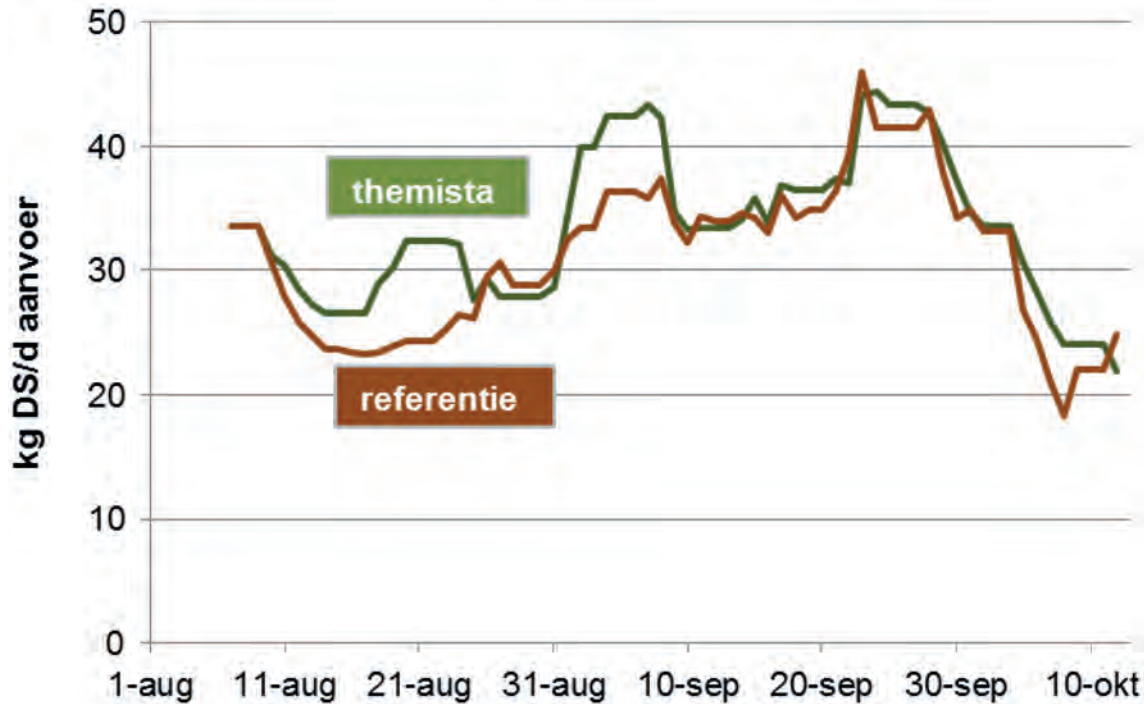
### 6.3.2 VERGELIJKING THEMISTA® EN REFERENTIE FASE 2

#### BELASTING EN SLIBSAMENSTELLING

In de tweede fase van het pilotonderzoek waren twee pilotreactoren in bedrijf waarbij één reactor als referentie en één als Themista® werd bedreven. De tweede reactor werd omstreeks mei 2015 op de RWZI Kralingseveer geplaatst en in bedrijf genomen. Vanwege verscheidene technische storingen en aanpassingen die doorgevoerd zijn, duurde de opstartperiode langer dan verwacht. Omstreeks half/eind juli was er een stabiel bedrijf en konden beide pilotreactoren worden vergeleken.

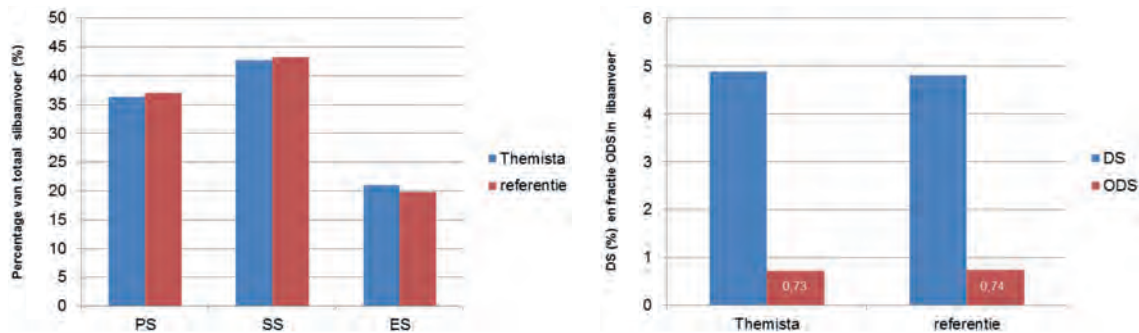
Figuur 6.8 geeft de drogestofbelasting van beide reactoren. Uit Figuur 6.8 blijkt dat de belasting van beide systemen vergelijkbaar was. Gemiddeld over de periode 1 augustus /14 oktober 2015 was de belasting in de Themista®-reactor circa 6% hoger dan in de referentiereactor. De daling in de belasting in beide reactoren medio 30 september werd veroorzaakt door een verlaagd aanvoerdebiet. De gemiddelde verblijftijd bedroeg 21,4 dagen (Themista®) en 22,7 dagen (referentie).

FIGUUR 6.8 DROGESTOFBELASTING REFERENTIE- EN THEMISTA®-REACTOR, ZEVENDAAGS VOORTSCHRIJDEND GEMIDDELDE



Figuur 6.9 geeft de gemiddelde slibsaamenstelling van de slibaanvoer naar de pilotreactoren. Hieruit blijkt dat de samenstelling van de slibaanvoer naar de pilot reactoren voor de referentie- en Themista®-reactor vergelijkbaar zijn.

FIGUUR 6.9 AANDEEL PRIMAIR SLIB (PS), SECUNDAIR SLIB (SS) EN EXTERN SLIB (ES) (LINKS), EN CONCENTRATIE DROGE STOF (DS) EN RELATIEVE GEHALTE ORGANISCHE DROGE STOF (ODS) (RECHTS) IN DE SLIBAANVOER NAAR DE REFERENTIE EN THEMISTA® PILOTRACTOR



#### DROGESTOFAFBRAAK:

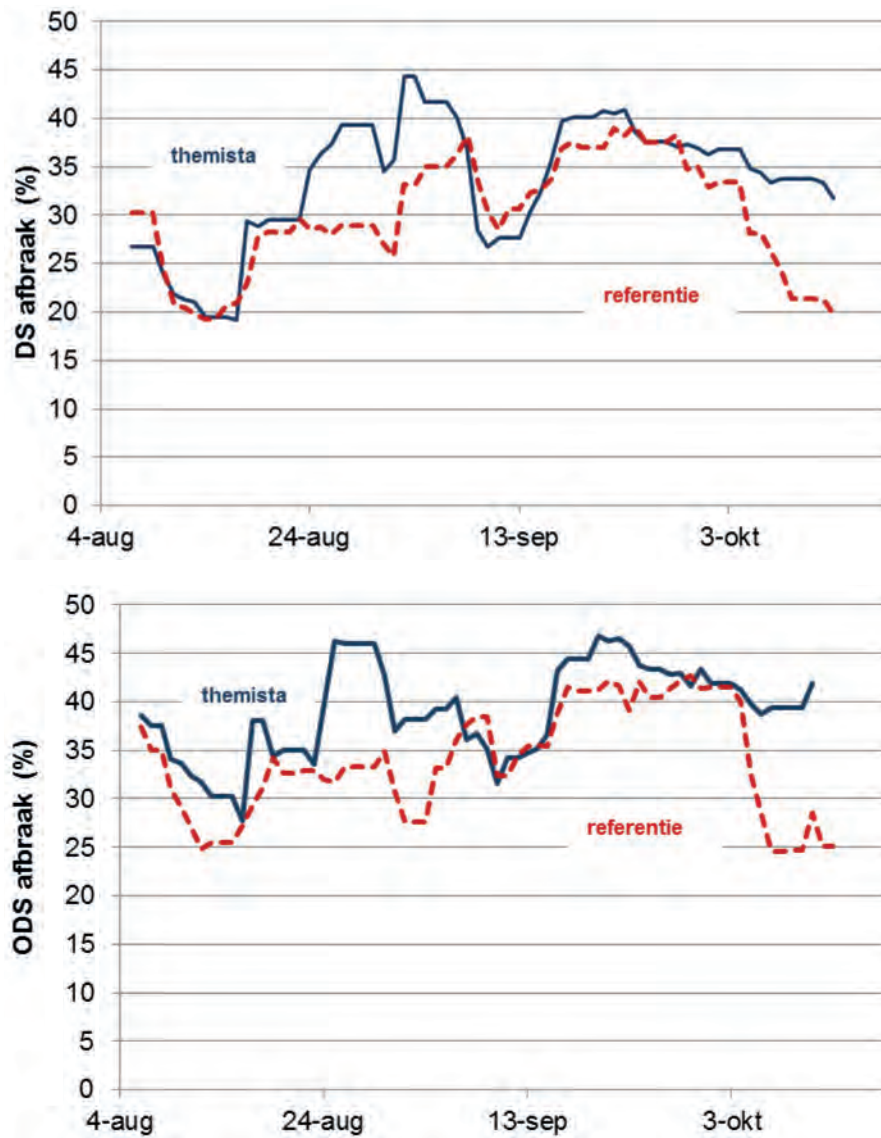
De (organische) drogestofafbraak in beide systemen werd gevolgd door het afbraakrendement te berekenen uit de resultaten van de (organische) drogestofmetingen<sup>4</sup>. Figuur 6.10 geeft de berekende rendementen gedurende de periode augustus – oktober. Hieruit blijkt dat de gemiddelde slibafbraak in de Themista®-reactor hoger is dan in de referentiereactor. De mate van meerafbraak fluctueert wel.

<sup>4</sup> In hoofdstuk 5 is al aangegeven dat de resultaten uit de asmetingen minder betrouwbaar zijn dan uit de droge stofmetingen (zie ook bijlage 1 voor de analyse). Daarom zijn alleen de resultaten voor de (organische) droge stofmetingen gegeven.



FIGUUR 6.10

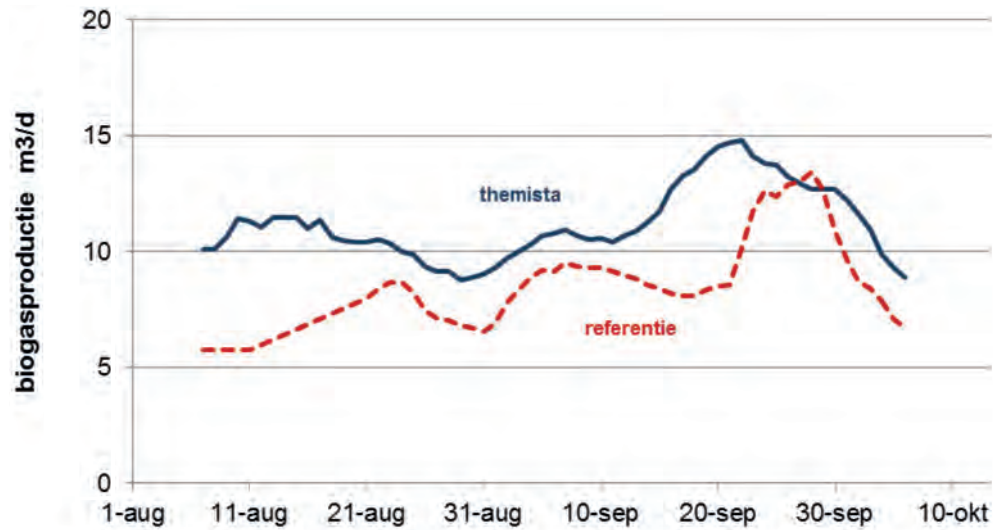
AFBRAAKPERCENTAGE VAN DROGESTOF EN ORGANISCHE DROGESTOF, BEREKEND UIT DROGESTOF- EN ORGANISCHE DROGESTOF CONCENTRATIE VAN SLIBTOEVOER- EN -AFVOER. DE LIJNEN GEVEN HET VOORTSCHRIJDEND ZEVENDAAGS GEMIDDELDE



Figuur 6.11 geeft de gemeten biogasproducties in beide systemen. Figuur 6.12 geeft de gemiddelde samenstelling van het uitgegiste slib. Met uitzondering van een korte periode rondom 30 september is de biogasproductie in Themista® hoger dan in de referentiereactor; dit bevestigt de meerafbraak van slib in de Themista®.

FIGUUR 6.11

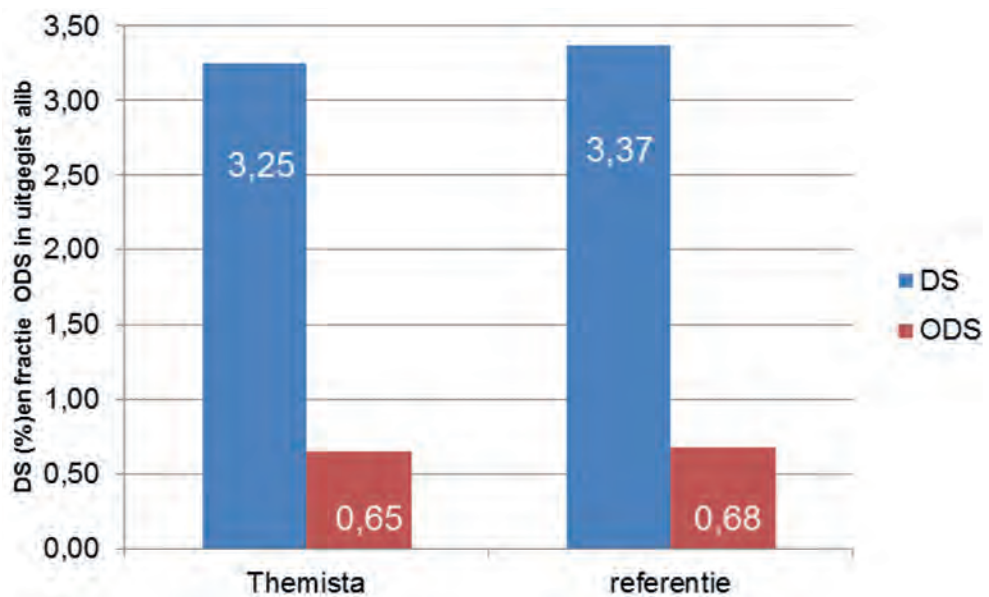
GEMETEN BIOGASPRODUCTIE IN THEMISTA®- EN REFERENTIEREACTOR. DE LIJNEN GEVEN HET VOORTSCHRIJDEND ZEVENDAAGS GEMIDDELDE.



Figuur 6.12 laat de samenstelling van het uitgegiste slib zien.

FIGUUR 6.12

GEMIDDELDE DROGESTOF CONCENTRATIE (DS) EN RELATIEVE GEHALTE ORGANISCHE STOF (ODS) IN HET UITGEGISTE SLIB VAN DE REFERENTIE EN THEMISTA®-PILOTREACTOR

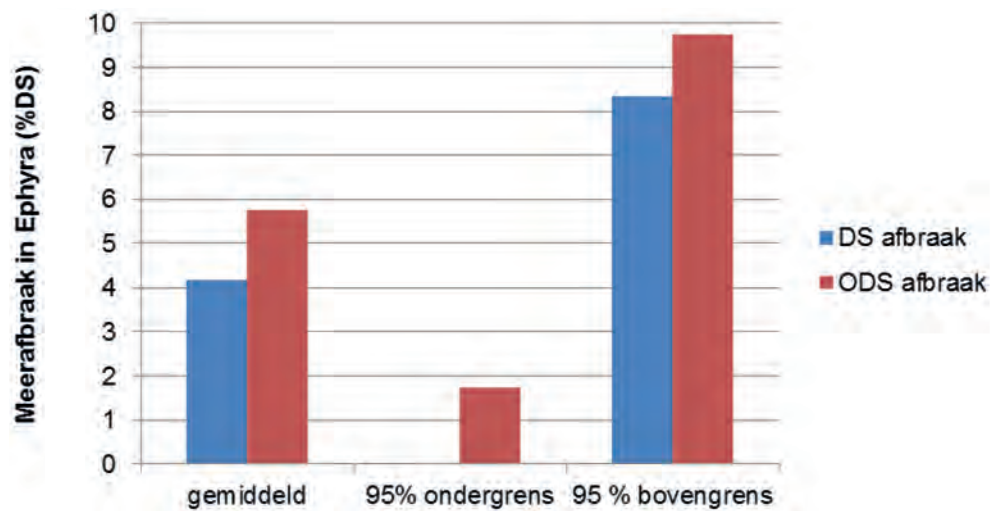


Figuur 6.11 en Figuur 6.12 bevestigen het beeld van een hogere slibafbraak in de Themista®-reactor. In de Themista®-reactor wordt een hogere biogasproductie, een lagere drogestof concentratie na de slibgisting en een lager gehalte organische stof van het uitgegiste slib gemeten.

Figuur 6.13 geeft de berekende gemiddelde meerafbraak in de Themista®-reactor berekend uit resultaten van de (organische) drogestof metingen.

FIGUUR 6.13

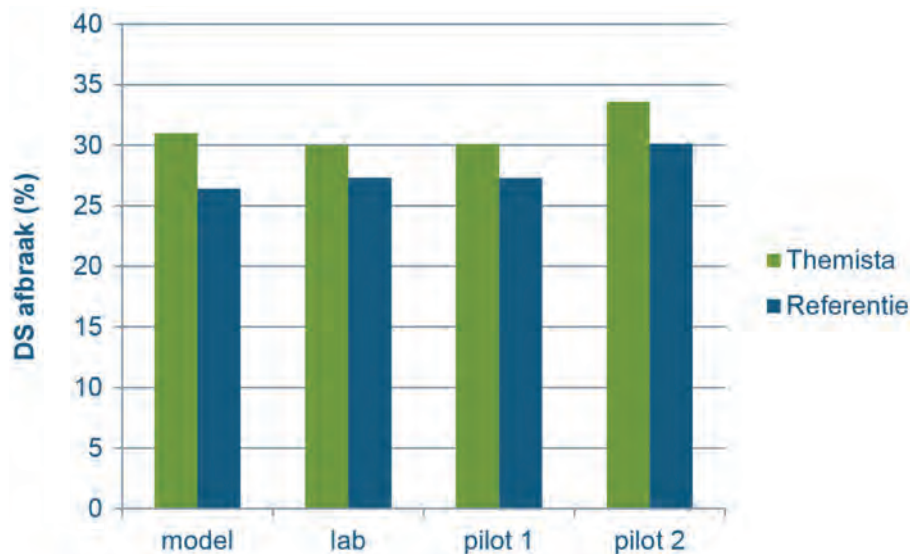
MEERAFBRAAK IN THEMISTA®. IN DE FIGUUR IS DE GEMIDDELDE MEERAFBRAAK EN DE MET 95% BETROUWBAARHEID GEGEVEN ONDER- EN BOVENGRENS



Figuur 6.14 geeft een samenvatting van de initiële modelberekeningen, de labtesten en de pilot testen in fase 1 en 2. De resultaten van de metingen blijken redelijk consistent. De meer-afbraak in het Themista®-systeem bedroeg circa 4% absoluut op droge stofbasis. Voor organische droge stof is dit 5 tot 6%.

FIGUUR 6.14

DROGE STOFABBRAAK THEMISTA® EN REFERENTIE VOLGENS INITIËLE MODELBEREKENINGEN, LABMETINGEN EN DE PILOTPLANT RESULTATEN  
BEREKEND UIT DE DROGESTOFMETINGEN



Oorspronkelijk was de opzet van de pilottesten om de praktijkinstallatie op Kralingseveer te vergelijken met de pilotreferentie en Themista®. Echter, door diverse operationele problemen met de praktijkinstallatie functioneerde deze tijdens het pilotonderzoek niet goed waardoor een vergelijking niet mogelijk is.

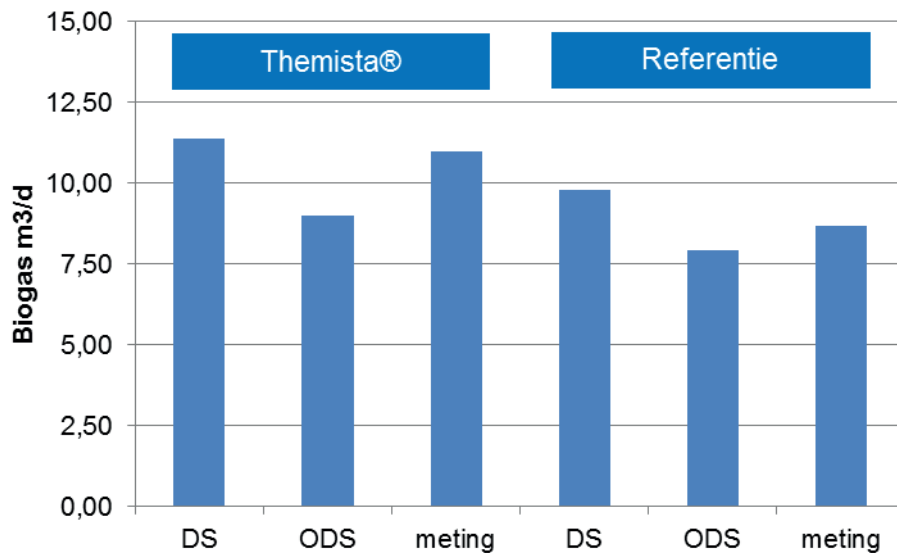
#### MASSABALANSEN

Om de nauwkeurigheid van de meetgegevens te controleren kunnen massabalansen worden opgesteld. Hoe beter een balans sluit hoe aannemelijker het is dat de bijbehorende meetgegevens kloppen. Om dit na te gaan zijn de volgende balansen opgesteld:

- geproduceerde (gemeten) biogas versus de berekende biogasproductie uit de drogestofafbraak;
- vergelijking drogestof en CZV afbraak;
- vergelijking drogestofafbraak en toename ammonium concentratie.

Figuur 6.15 geeft de gemeten en berekende biogasproducties.

FIGUUR 6.15 BEREKENDE EN GEMETEN BIOGASPRODUCTIES IN THEMISTA® EN REFERENTIEREACTOR. DE BEREKENDE GASPRODUCTIES ZIJN GEBASEERD OP DROGESTOFAFBRAAK UIT DROGESTOF (DS) EN ORGANISCHE DROGESTOF (ODS) METINGEN



Uit de figuur kan worden opgemaakt dat de berekende gasproducties uit organische drogestofmetingen lager zijn dan de gemeten biogasproducties. De berekende producties stemmen wel redelijk overeen met de gemeten biogasproducties.

Naast de dagelijkse analyses zijn een aantal keren uitgebreide aanvullende labanalyses gedaan. Tabel 6.1 geeft een vergelijking tussen CZV-afname, toename in ammonium en drogestofafname

Uit tabel 6.1b blijkt dat de gemeten drogestofafbraak hoger is dan de berekend uit de ammoniumtoename. Tijdens fase 1 (tabel 6.1a) was hier een beter correlatie. De gemeten CZV en droge stof afname stemmen redelijk overeen voor vergisting van een mengsel van primair en secundair slib. Voor primair slib wordt vaak uitgegaan van 1,8 g CZV/g ODS. Voor secundair slib is dit 1,4 g CZV/g ODS.

Uit de massabalansen kan worden afgeleid dat er geen reden is om de gemeten meerafbraak van drogestof in Themista® in twijfel te trekken.

TABEL 6.1 BEREKENINGEN AANVULLENDE LABANALYSES PILOT FASE 1 EN PILOT FASE 2

## A FASE 1: 1 REACTOR BEDRIJF (ZIE OOK § 6.3.1)

	referentiebedrijf		Themista® bedrijf		eenheid
	meting	berekening	meting	berekening	
afname DS	15,6		15,3		g/l
afname CZV	24,9		24,5		g/l
relatie		1,6		1,61	g CZV/g ODS
Toename NH4	0,7		0,76		g/l
afname DS		11,7		12,6	g/l bij 4% N
		17,6		18,9	g/l bij 6 % N

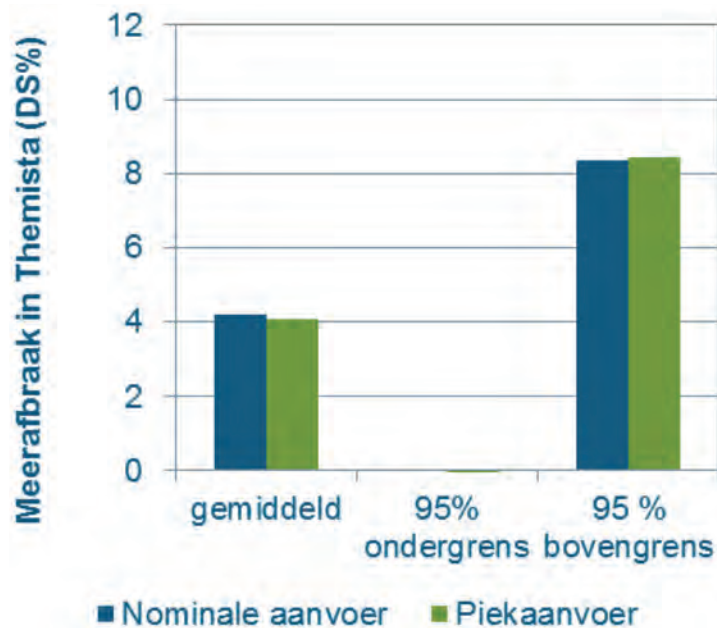
## B FASE 2: 2 REACTOREN IN BEDRIJF

	referentiereactor		Themista® reactor		eenheid
	meting	berekening	meting	berekening	
afname DS	15		18,5		g/l
afname CZV	26,3		29,1		g/l
relatie		1,75		1,57	g CZV/g ODS
Toename NH4	0,51		0,68		g/l
afname DS		12,6		17,0	g/l bij 4% N
		8,4		11,3	g/l bij 6 % N

## 6.3.3 PRESTATIE THEMISTA® TIJDENS PIEKAANVOER

Om een piekaanvoer te simuleren is in de laatste fase van het pilotonderzoek (vanaf 13 oktober) de verblijftijd twee keer een korte tijd en één keer een langere periode verkort. Dit simuleert periodes van hogere slibaanvoer voor de praktijkinstallatie op Kralingseveer. Figuur 6.17 geeft de gemeten meerafbraak in Themista® onder nominale aanvoer en piekaanvoer condities weer. Er is nagenoeg geen verschil waarneembaar in de meerafbraak onder nominale aanvoer- en piekaanvoer condities.

FIGUUR 6.16 MEERAFBRAAK IN THEMISTA® TIJDENS NOMINALE AANVOER (3 AUGUSTUS 2015 T/M 12 OKTOBER 2015) EN PIEKAANVOER (13 OKTOBER 2015 T/M 13 NOVEMBER 2015)

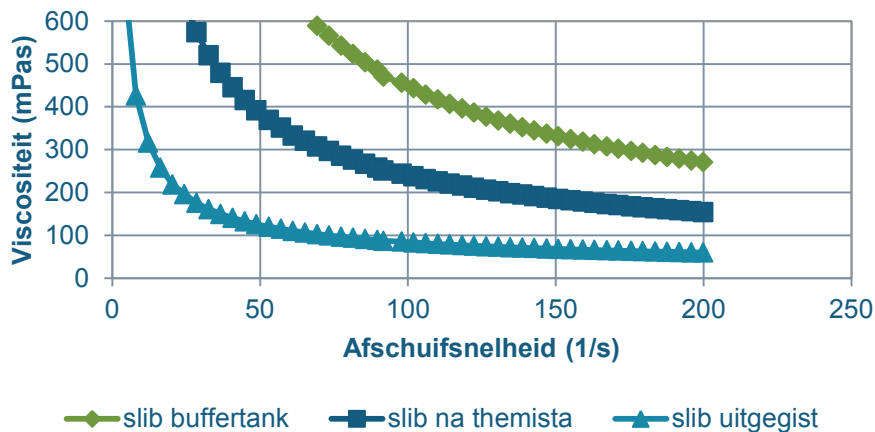


### 6.3.4 VISCOSITEIT

Om te testen of Themista® de viscositeit verlaagt zijn er monsters van het pilotslib in het lab getest: slib uit de buffertank, na Themista® en na de gisting. De verschillende testen gedurende het pilotonderzoek volgen hetzelfde patroon: uitgegist slib heeft de laagste viscositeit en Themista®-slib heeft een lagere viscositeit dan onbehandeld slib.

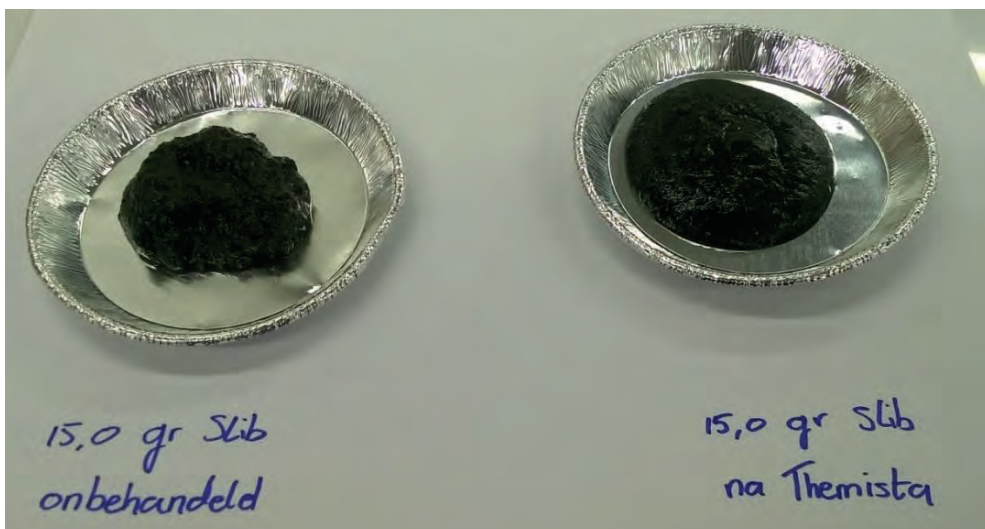
Figuur 6.17 is een voorbeeld waarin het effect van Themista® voorbehandeling op de slibviscositeit te zien is. Na Themista® heeft het slib al een significant lagere viscositeit. De samenstelling van het slib verandert door Themista® niet, de structuur wel. Het uitgegiste slib, met een lager gehalte aan droge stof, heeft logischerwijs de laagste viscositeit.

FIGUUR 6.17 EFFECT THEMISTA® OP SLIBVISCOSITEIT, MONSTERS VAN DE THEMISTA®-PILOTINSTALLATIE KRALINGSEVEER 19-2-2015



Ook visueel is er een groot verschil tussen Themista®-slib en onbehandeld slib (zie Figuur 6.19).

FIGUUR 6.18 FOTO 15.0 GR SLIB, VOOR EN NA THEMISTA®-BEHANDELING

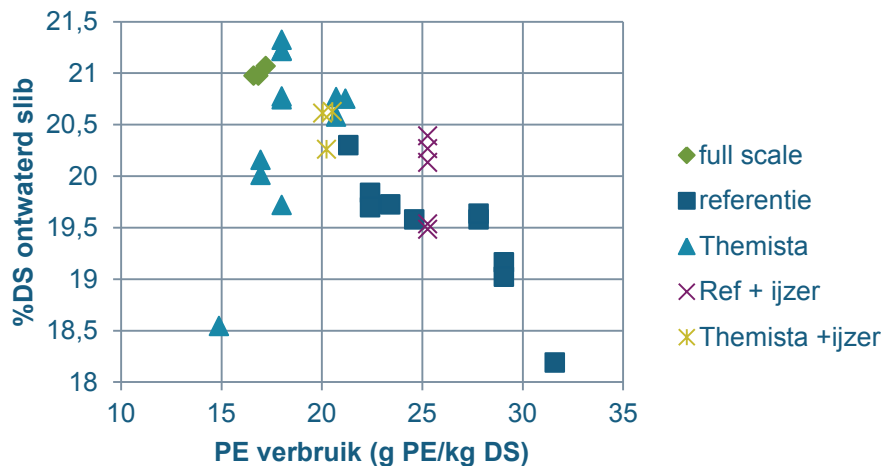


### 6.3.5 ONTWATERINGSTESTEN

Na afloop van het pilotonderzoek zijn de ontwateringstesten uitgevoerd. Hierbij is het ontwateringsresultaat (ofwel het afscheidingsrendement), het percentage droge stof in het ontwaterde slib en het PE verbruik gemeten. De resultaten zijn samengevat in Figuur 6.19 en Tabel 6.2.

FIGUUR 6.19

RESULTATEN ONTWATERINGSTESTEN



TABEL 6.2

SAMENVATTING ONTWATERINGSRESULTATEN

		Full scale	Referentie	Themista®
Aantal testen		10	16	19
Aantal metingen met ontwateringsresultaat >98%		2	15	15
PE verbruik (g/kg DS)	Gem	15,7	26,4	18,6
	Min	13,3	21,3	14,9
	Max	18,8	32,5	21,2
DS ontwaterd slib	Gem	19,7	19,6	20,5
	Min	17,7	17,9	18,6
	Max	21,1	20,4	21,3

Zoals te zien in Figuur 6.19 en Tabel 6.2 is zijn er maar twee ontwateringstesten met het full-scale slib met een ontwateringsrendement hoger was dan 98%. Tijdens de ontwateringstesten waren er een aantal technische problemen met de full-scale installatie: de buffer voor extern slib was buiten bedrijf en extern slib werd ongelijk verdeeld over de gistingstanks. Daarom is het niet mogelijk de resultaten van de full-scale te vergelijken met Themista®-en referentieslib omdat de slibeigenschappen mogelijk anders waren. Het aantal geslaagde testen met referentieslib en Themista®-slib is voldoende hoog. Bij gelijke PE dosering (ca. 21 g PE/kg DS) is het ontwateringsresultaat van Themista® slib ongeveer 0,5% DS hoger.

Bij hogere PE-dosering tot ca 27 g PE/kg DS zien we voor het slib van de referentiereactor een stabiel ontwateringsresultaat van circa 19,5 à 20% DS. Bij hogere PE-dosering neemt het ontwateringsresultaat af. Bij Themista® slib wordt bij PE doseringen van 18 tot 22 g PE/kg DS een ontwateringsresultaat verkregen van 20,5 à 21 % DS. Bij lagere PE doseringen neemt het ontwateringsresultaat af. De resultaten suggereren een beter ontwateringsresultaat van Themista® slib van circa 1% DS. Echter, de toegepaste PE doseringen voor Themista® en de referentie liggen niet helemaal gelijk. De conclusies dat Themista® beter ontwaterd is op basis van de uitgevoerde testen niet hard.

Wel kan worden geconcludeerd dat na Themista® behandeling er geen hogere PE-dosering nodig zijn, zoals bij thermische drukhydrolyse wel het geval is.

#### 6.4 EVALUATIE THEMISTA® ONDERZOEK

In hoofdstuk 3 is al ingegaan op de hypothese waarom Themista®-voorbehandeling leidt tot een betere slibafbraak en slibgisting dan een conventionele gisting. De genoemde parameters dat een Themista®-behandeling tot een betere slibgisting leidt zijn:

- betere en snellere slib afbraak;
- lagere viscositeit;
- verbetering processtabiliteit;
- betere slibontwatering.

#### BETERE EN SNELLERE AFBRAAK

De lab- en de pilottesten geven allen aan dat na Themista®-voorbehandeling meer slib wordt afgebroken dan de referentiereactor (conventionele gisting). De meerafbraak bedroeg circa 5% organische drogestof absoluut. Een snellere afbraak na Themista®-voorbehandeling is in een eerdere fase vastgesteld tijdens het labonderzoek.

#### LAGERE VISCOSITEIT

Door toepassen van de voorbehandeling daalt de viscositeit van het behandelde slib. Ook visueel bleek het behandelde slib vloeibaarder dan niet behandeld slib.

#### VERBETERING PROCESSTABILITEIT

De betere processtabiliteit hangt samen met de prestatie van het systeem bij variaties in aanvoer en vooral piekaanvoer. Tijdens de korte pieken in slibaanvoer is niet aangetoond dat Themista® stabiel is vergeleken met de referentie-installatie. Wel zal in de praktijk de aanvoer naar Themista® meer afgevlakt worden dan een conventionele gisting, waardoor de aanvoer stabiel is.

#### VERBETERING ONTWATERINGSEIGENSCHAPPEN

Uit de ontwateringstesten blijkt dat Themista®-slib geen hoger PE-verbruik per kg DS heeft dan niet behandeld slib. Het ontwaterde slib van Themista® heeft een 0,5-1 % hoger drogestof percentage dan slib uit de referentie-installatie.

## 6.5 CONCLUSIES

Op hoofdlijnen blijkt uit de pilot- en labonderzoeken dat:

- De resultaten in de pilot plant, zeker daar waar Themista® en de referentiereactor direct werden vergeleken (pilot fase 2) een hogere meerafbraak in Themista® laat zien dan het eerdere uitgevoerde labonderzoek.
- De meerafbraak van slib in de Themista® globaal kan worden gesteld op 3,5% drogestof en 5% organische drogestof.
- Voor de werkhypothese wordt uitgegaan van Tabel 6.3.

TABEL 6.3 WERKHYPOTHESE THEMISTA®

Hypothese	Waar	Consequentie
De slibbehandeling leidt tot een verdere slibafbraak	Ja	Geen
De slibbehandeling leidt tot een snellere slibafbraak	Ja	Met eenzelfde volume kan er meer slib verwerkt worden.
Na de thermische behandeling is de viscositeit van het slib lager	Ja	Betere menging door lagere viscositeit.
De aan de Themista® gekoppelde controller resulteert in een stabiel proces	Ja*	Pieken opvangen in buffer zodat aanvoer constant is leidt tot hogere rendementen.
Door de Themista® behandeling verbetert de ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib	Ja**	iets hoger ontwateringsresultaat (1%) bij gelijke PE-dosering

\*) Theoretische beschouwingen. Niet in pilotplant als zodanig gemeten.

\*\*\*) Voorlopige conclusie omdat tijdens de testen de PE dosering Themista® en referentie slib niet helemaal gelijk waren.



# 7

## VERGELIJKING EN TOEPASSING OP PRAKTIJKSCHAAL

De pilotresultaten van Ephyra® op Tollebeek en Themista® op Kralingseveer zijn gebruikt voor het uitwerken van een ontwerp op praktijkschaal. Hierbij is uitgegaan van een zuivering van 300.000 i.e. met voorbezinking en verwerking van extern slib.

### 7.1 TECHNOLOGISCHE UITGANGSPUNTEN

De drie scenario's (referentie, Ephyra® en Themista®) zijn doorgerekend op basis van een zuivering van 300.000 i.e. Daarnaast is aangenomen dat er slib centraal verwerkt wordt waarbij extern slib wordt aangevoerd, met een volume gelijk aan 1,5 maal het secundaire slib van de zuivering. Dit leidt tot de volgende uitgangspunten.

- Aanvoer slibgisting:
  - Primair slib: 187 m<sup>3</sup>/d, 4.5 %DS
  - Secundair slib: 125 m<sup>3</sup>/d, 6%DS
  - Extern slib: 156 m<sup>3</sup>/d, 6%DS
- P gehalte
  - Primair slib: 15 g/kg ODS
  - Secundair slib: 34 g/kg ODS
  - Extern slib: 34 g/kg ODS
- N gehalte:
  - Primair slib: 40 g/kg ODS
  - Secundair slib: 60 g/kg ODS
  - Secundair slib: 60 g/kg ODS
- CZV/ODS verhouding:
  - Primair slib 1.8 kg CZV/kg ODS
  - Secundair slib 1.4 kg CZV/kg ODS
  - Extern slib 1.4 kg CZV/kg ODS
- Ontwateringsresultaat:
  - Referentie: 24%DS
  - Themista®: 25%DS
  - Ephyra®: 26%DS
- Methaangehalte biogas: 65%
- Verblijftijd slibgisting totaal: 20 d
- Temperatuur gisting: 35°C

In de berekeningen is verder aangenomen dat de stikstof die in de gisting vrijkomt wordt verwerkt in de waterlijn. Fosfaat dat vrijkomt wordt neergeslagen met ijzerzout.

## 7.2 TECHNOLOGISCHE VERGELIJKING

De resultaten van de technologische berekeningen staan samengevat in Tabel 7.1. In vergelijking met een conventionele gisting (referentie) leidt Themista® en Ephyra® tot minder slibafzet, meer biogasproductie, en minder PE verbruik. Daarnaast is het ijzerzoutverbruik voor Themista® en Ephyra® iets hoger.

De resultaten kunnen ook worden omgerekend naar ton CO<sub>2</sub> uitstoot. De reductie in CO<sub>2</sub> uitstoot bedraagt 470 ton CO<sub>2</sub>/j voor Themista® en 960 ton CO<sub>2</sub>/j voor Ephyra®.

TABEL 7.1 UITKOMSTEN TECHNOLOGISCHE BEREKENING EN VERGELIJKING

A SLIBBALANS EN BIOGAS					
		referentie	Themista®	Ephyra®	
Gisting	slibtoevoer	27.118	27.118	27.118	kg DS/d
		19.316	19.316	19.316	kg ODS/d
	slibafvoer	19.125	18.016	17.106	kg DS/d
		11.323	10.214	9.305	kg ODS/d
	biogas	6.807	7.643	8.353	m <sup>3</sup> /d
Ontwatering	slibafvoer	29.085	26.303	24.015	ton koek/j
	koek DS	24	25	26	% DS
B ENERGIE BALANS					
		referentie	Themista®	Ephyra®	
E-verbruik					
	gisting	263	338	288	MWh/j
	ontwatering	524	493	468	MWh/j
	N-verwijdering centraat	195	229	256	MWh/j
	totaal	981	1.060	1013	MWh/j
	E-productie	6.117	6.868	7505	MWh/j uit biogas
	netto	5.136	5.807	6493	MWh/j netto
C CHEMICALIËN					
		referentie	Themista	Ephyra	
	PE ontwatering actief	140	132	125	ton/j
	FE-zout 40% FeCl <sub>3</sub>	488	521	548	ton/j
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 36% oplossing	0	474	0	ton/j

## 7.3 VERGELIJKING BEDRIJFSVOERINGKOSTEN

Tabel 7.2 geeft een vergelijking van de bedrijfsvoeringkosten. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

- Elektriciteit € 0,12 per kWh
- PE € 4,- per kg actief
- FeCl<sub>3</sub> € 140,- per ton
- Kosten eindverwerking € 75,- per ton

TABEL 7.2

## UITKOMSTEN FINANCIËLE BEREKENING EN VERGELIJKING

	referentie	Themista®	Ephyra®	
energieopbrengst	-734.000	-824.000	-901.000	€/j
PE	558.000	526.000	500.000	€/j
FeCl <sub>3</sub>	68.000	73.000	77.000	€/j
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0	46.000	0	€/j
slibafzet	2.181.000	1.973.000	1.801.000	€/j
totaal	2.073.000	1.794.000	1.477.000	€/j
voordeel	0	279.000	596.000	€/j

Het berekende voordeel in operationele kosten is ongeveer 280.000 €/j voor de Themista® variant en 600.000 €/j voor de Ephyra®.

Het voordeel in operationele kosten wordt ook bepaald door de gehanteerde eenheidsprijzen. Figuur 7.1 geeft de relatie tussen het financiële voordeel voor Ephyra® en Themista® en variaties in eenheidsprijzen voor energie, chemicaliën en slibafzet. Uit Figuur 7.1 blijkt dat vooral de kosten voor slibeindverwerking het meeste effect hebben op het voordeel in bedrijfsvoeringkosten voor Themista® en Ephyra®. De bandbreedte van het voordeel in bedrijfsvoering varieert voor Themista® tussen 260.000 en 300.000 €/j. Voor Ephyra® is dit 560.000 en 635.000 €/j.

Een vergelijking van investeringen voor een conventionele gisting in vergelijking met Themista® en Ephyra® is afhankelijk van een specifieke locatie en daarom niet eenduidig aan te geven. Groene weide situaties komen in Nederland nagenoeg niet meer voor.

#### 7.4 TOEPASSING THEMISTA® EN EPHYRA® TECHNOLOGIE

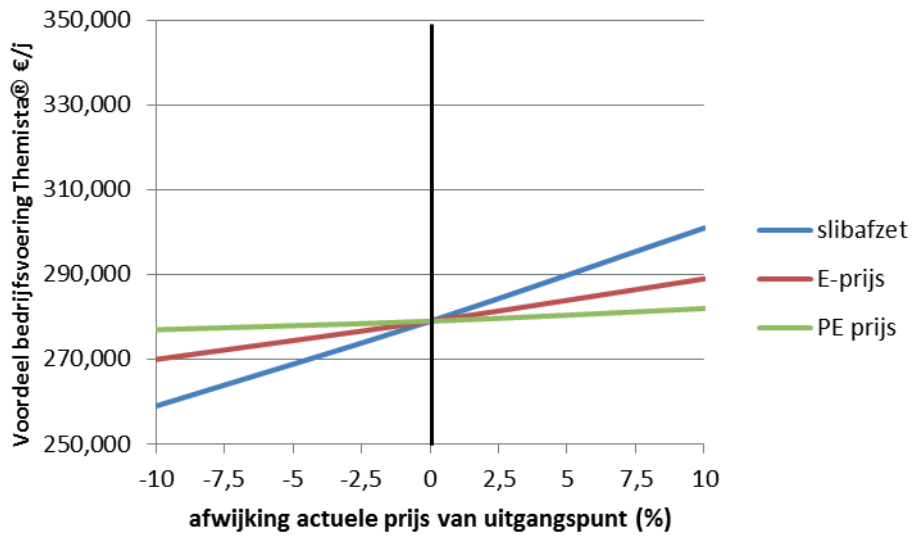
Ephyra® en Themista® zijn in eerste instantie ontwikkeld voor het vergisten van slib. Welke techniek voor een specifieke locatie het meest in aanmerking komt is locatie afhankelijk. Ephyra® wordt vooral toegepast als bestaande gistingcapaciteit wordt uitgebreid en gistingvolume moet worden bijgebouwd. Een voorbeeld is de beoogde Ephyra® installatie op de RWZI Tollebeek waar het plan is om in de toekomst ook slib van Lelystad op Tollebeek te vergisten. Om dit scenario mogelijk te maken moet extra gistingvolume ( Ephyra® reactor) worden bijgebouwd.

Themista® kan op bestaande gistinginstallaties worden geplaatst om de prestatie van de gisting te verbeteren of bij een centralisatie van een slibgisting waarbij het bestaande gistingvolume (on)voldoende groot is. De beoogde Themista® installatie op de RWZI Kralingseveer is hiervan een voorbeeld. Ook bij (gecentraliseerde) slibgistingen waarbij de verblijftijd krap is, is toepassen van Themista® een optie. Dit laatste is mogelijk omdat na een Themista® voorbehandeling een slibgisting bij kortere verblijftijden (tot circa 16 - 17 dagen) kan worden bedreven.

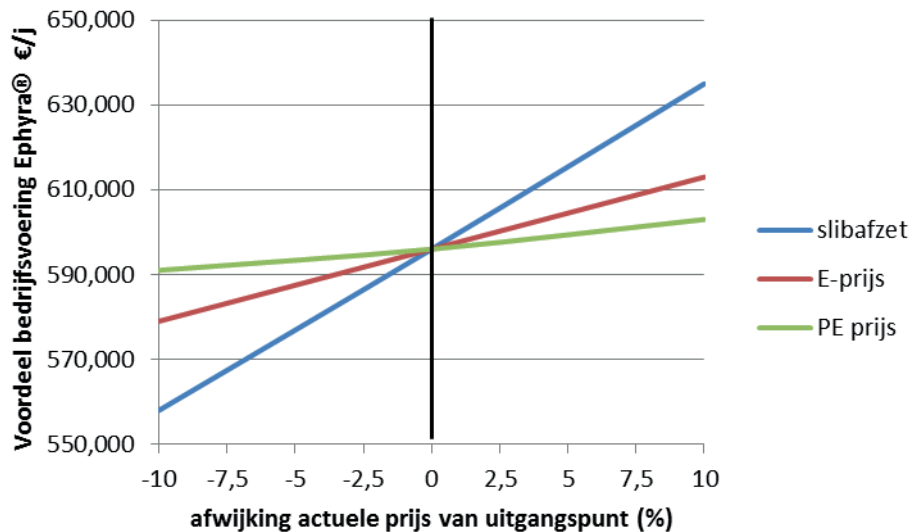
FIGUUR 7.1

EFFECT VARIATIES IN PRIJZEN VOOR SLIBAFZET, ENERGIE EN PE OP VOORDEEL IN BEDRIJFSVOERINGKOSTEN VOOR THEMISTA® EN EPHYRA®

A THEMISTA®



B EPHYRA®



Naast het vergisten van slib kan Ephyra® technologie ook worden toegepast voor de vergisting van mest of andere biomassastromen. Voor Themista® ligt dit minder voor de hand omdat het onzeker is of Themista® voorbehandeling leidt tot een betere afbraak van mest en/of andere biomassa stromen dan slib.

Naast Nederland is toepassen van beide gistingconcepten in het buitenland een reële optie. Daar waar slib in de landbouw wordt afgezet zal Themista® naast een beter afbraak ook het slib gepasteuriseerd worden, zodat afzet in de landbouw mogelijk is.

# 8

## CONCLUSIES EN VERVOLG

### 8.1 EPHYRA®

Uit het lab en pilot onderzoek blijkt:

- Toepassen van Ephyra® technologie leidt tot meer slibafbraak en meer biogasproductie. Op de pilot plant was de gemeten meerafbraak gemiddeld 3,5% drogestof absoluut. Hierbij moet worden aangetekend dat het aandeel secundair slib in de Ephyra® reactor (63%) veel hoger was dan in de referentiereactor (37%). Labonderzoek toonde aan dat bij een gelijke samenstelling van het ingaande slib de meerafbraak in Ephyra® 10% absoluut bedroeg.
- Slib vergist met Ephyra® technologie ontwaterd beter dan slib vergist in een conventionele gisting. Het extra ontwateringsresultaat is circa 2% DS.
- Ephyra® functioneert goed en robuust tijdens piekbelastingen. De gemeten slibafbraak blijft gelijk en het proces is eenvoudig en goed te beheersen.
- Voor de werking van het Ephyra® systeem zijn de volgende parameters belangrijk:
  - effectievere verblijftijdspreiding dan in een conventionele volledig gemengde gisting;
  - snellere omzettingen door het propstroomkarakter van Ephyra®;
  - optreden van fasescheiding waarbij de verschillende deelprocessen van de anaërobe slibgisting ontkoppeld zijn.
- Het financiële voordeel van Ephyra® is afhankelijk van de schaalgrootte. Voor een installatie van 300.000 i.e. inclusief vergisting van extern spuislib met een capaciteit 3.100 ton DS per jaar primair slib en 6.200 ton DS/j secundair slib bedragen de besparingen in de bedrijfsvoeringkosten 560.000 tot 635.000 €/j.

### 8.2 THEMISTA®

Uit het lab en pilot onderzoek blijkt:

- Toepassen van Themista® voorbehandeling van secundair slib resulteert in meer slibafbraak en een hogere biogasproductie. De meerafbraak van slib bedraagt gemiddeld 3% droge stof en 5% organische droge stof absoluut.
- Na Themista® voorbehandeling is in de eindontwatering geen hogere PE dosering (g PE/kg DS) vereist dan na een conventionele gisting. Het drogestof resultaat na ontwatering is voor Themista® behandeld slib circa 1% hoger.
- Voor de werking van Themista® zijn de volgende parameters belangrijk:
  - Themista® voorbehandeling leidt tot snellere en meer slibafbraak;
  - De voorbehandeling resulteert in een lagere slibviscositeit.
- Het financiële voordeel van Ephyra® is afhankelijk van de schaalgrootte. Voor een installatie van 300.000 i.e. inclusief vergisting van extern spuislib met een capaciteit 3.100 ton DS per jaar primair slib en 6.200 ton DS/j secundair slib, bedragen de besparingen in de bedrijfsvoeringkosten 260.000 tot 300.000 €/j.

### 8.3 VERVOLG

De resultaten van het pilot onderzoek, het eerder uitgevoerde labonderzoek en de opgestelde business cases voor Tollebeek (Ephyra®) en Kralingseveer (Themista®) zijn voldoende aanleiding om een demonstratie installatie op praktijkschaal op beide locaties te realiseren. Om deze ambities in te vullen zijn de ontwerpen voor beide installaties gestart en is het de ambitie om in 2017 de installaties in bedrijf te nemen.

## BIJLAGE 1

# METHODIEK STATISCHE ANALYSE

## MEETRESULTATEN

### 1.1 STATISTISCHE ANALYSE PILOT ONDERZOEK EPHYRA® EN THEMISTA®

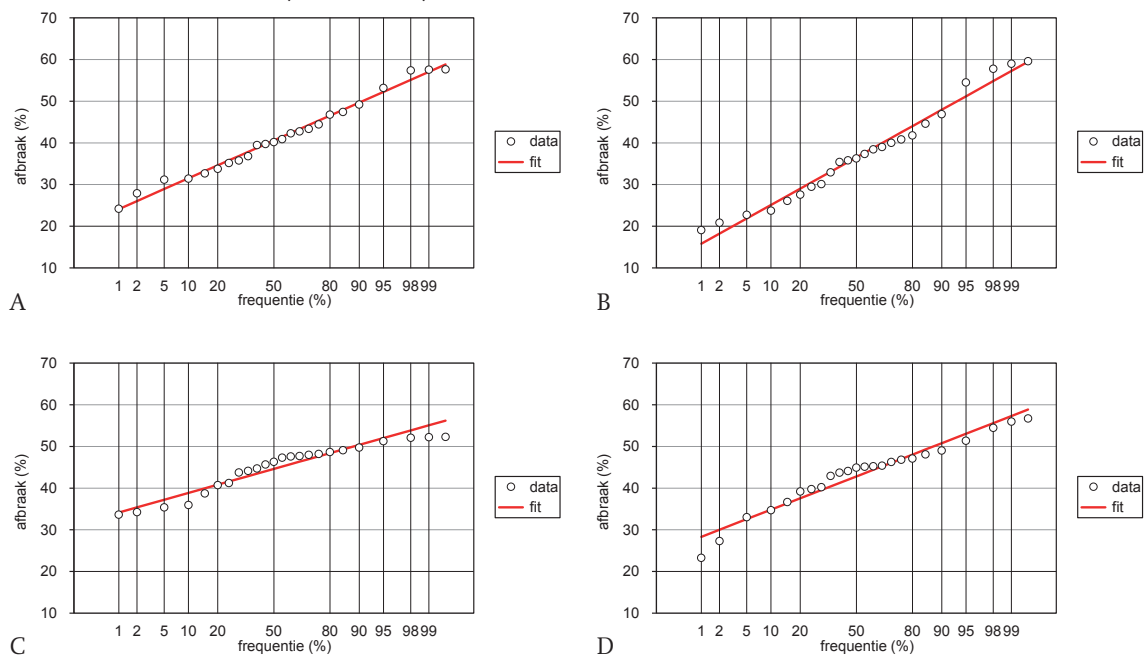
#### DROGESTOF AFBRAAK EPHYRA® EN REFERENTIE

Proeven zijn uitgevoerd om vast te stellen wat de afbraak van droge stof is tijdens vergisting in een Ephyra® systeem, ten opzichte van een volledig gemengde reactor die gold als referentie. In deze notitie wordt ingegaan op de betrouwbaarheidsintervallen van de gemeten afbraak.

Allereerst werd bekeken of ervan kan worden uitgegaan dat de metingen normaal verdeeld zijn. De toets van Kolmogorov-Smirnoff<sup>5</sup> kan hierbij op eenvoudige wijze informatie verschaffen. In figuur 1.1 zijn de frequentieverdeling gegeven (weergegeven als een zogeheten normaal-kwantiel-diagram; hierin valt een normale verdeling op een lijn (de rode lijn in de figuurtjes).

Aan de figuurtjes is al te zien dat het naar alle waarschijnlijkheid allemaal om normaal verdeelde metingen gaat (de punten liggen in alle gevallen dicht bij de lijn), en de toets wijst inderdaad uit dat alle vier reeksen als normaal verdeeld kunnen worden opgevat ( $p < 0,01$ ).

**FIGUUR 1.1** DE FREQUENTIEVERDELINGEN VAN DE VIER MEETREEKSEN VAN DE AFBRAAK VAN DE DROGE STOF (A, EPHYRA®, OP BASIS VAN DROGESTOFGEHALTE; B: REFERENTIE O.B.V. DROGESTOFGEHALTE; C: EPHYRA®, O.B.V. ASGEHALTE EN D: REFERENTIE, O.B.V. ASGEHALTE. IN FIGUUR C IS ÉÉN WAARDE (VAN 80% AFBRAAK) NIET MEEGENOMEN IN DE REEK



5 Moore D S & G P McCabe 2001. Statistiek in de praktijk (Introduction to the practice of statistics, third edition). Academic Service, Den Haag, 2001

Als de verdeling van de twee verschillende populaties ten naaste bij normaal zijn of zo geacht kunnen worden, dan kunnen twee zaken worden berekend. Allereerst kan worden getoetst of de twee meetreeksen (in dit geval twee keer twee reeksen (zie figuur 1.1), de twee reeksen A en B en de twee reeksen C en D) geacht kunnen worden hetzelfde gemiddelde te hebben. De waarde

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

waarbij  $\bar{x}_1$  en  $\bar{x}_2$  de gemiddelden en  $s_1$  en  $s_2$  de standaardafwijkingen van de twee steekproeven zijn, is een toetsingsgrootte die Students t-verdeling volgt. Het aantal vrijheidsgraden bedraagt  $MIN(n_1 + n_2) - 2$ .

De twee reeksen A en B kunnen (marginaal) geacht worden niet hetzelfde gemiddelde te hebben ( $p < 0,06$ ) en de twee reeksen C en D kunnen duidelijk geacht worden niet hetzelfde gemiddelde te hebben ( $p < 0,02$ ).

Het gemiddelde verschil in de afbraak tussen Ephyra en de referentie bedraagt 3,5% zoals berekend aan de drogestofmetingen en 4,7% op basis van berekening aan de hand van de metingen van de asrest. Het betrouwbaarheidsinterval van de verschillen tussen gemiddelden  $\mu_1 - \mu_2$  van de twee reeksen kan als volgt worden berekend<sup>1</sup>:

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm t^* \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}$$

waarbij  $\bar{x}_1$  en  $\bar{x}_2$  de gemiddelden en  $s_1$  en  $s_2$  de standaardafwijkingen van de twee steekproeven zijn en  $t^*$  de bovenste kritieke waarde voor de Student's t-verdeling met  $MIN(n_1, n_2) - 1$  vrijheidsgraden.

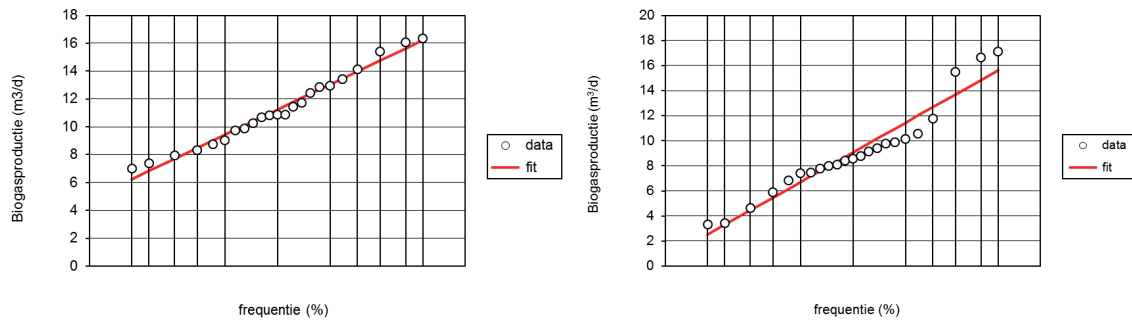
Een 90%-betrouwbaarheidsinterval voor de verschillen in de drogestofmetingen bedraagt 0,48 – 6,60 %; een 95%-betrouwbaarheidsinterval zou 0 (= geen verschil) bevatten: -0,13 – 7,21%. Dat was al min of meer duidelijk uit de vorige toets. Een 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de verschillen in de drogestofafbraak, die is berekend op basis van de metingen van de asrest bedraagt: 0,84 – 6,78%. Dit is met weglating van één –onwaarschijnlijke– meetwaarde van 84%; die zou het interval ophogen tot 1,25 – 8,10%.

## 1.2 BIOGASPRODUCTIE THEMISTA® EN REFERENTIE

Ook voor de biogasproductie van Themista® en de referentie is er de vraag of statistisch gezien Themista® significant meer biogas produceert dan de referentie. Figuur 1.2 laat zien dat het aannemelijk is dat de metingen normaal verdeeld zijn. De toets van Kolmogorov-Smirnov wijst uit dat de metingen inderdaad normaal verdeeld zijn ( $p < 0,01$ )



FIGUUR 1.2 FREQUENTIEVERDELINGEN VAN A. BIOGASPRODUCTIE VAN THEMISTA® EN B. BIOGASPRODUCTIE VAN DE REFERENTIE GEDURENDE STABIELE PERIODE (20 AUG T/M 6 OKT 2015)



Als de verdeling van de twee verschillende populaties als normaal beschouwd kan worden kan ten eerste worden getoetst of de twee meetreeksen geacht kunnen worden hetzelfde gemiddelde te hebben. De waarde

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

waarbij  $\bar{x}_1$  en  $\bar{x}_2$  de gemiddelden en  $s_1$  en  $s_2$  de standaardafwijkingen van de twee steekproeven zijn, is een toetsingsgrootheid die Students t-verdeling volgt. Het aantal vrijheidsgraden (df) bedraagt  $\text{MIN}(n_1, n_2) - 1$ . Deze toetsingsgrootheid is 4,09. De overschrijdingskans, ofwel de kans dat de gemiddelden van beide reeksen hetzelfde zijn is zeer laag ( $t=4,09$ ,  $df=45$ ,  $p<0,0005$ ).

Het gemiddelde verschil in de biogasproductie tussen Themista® en de referentie bedraagt  $2,24 \text{ m}^3/\text{d}$ . Het betrouwbaarheidsinterval van de verschillen tussen gemiddelden  $\mu_1 - \mu_2$  van de twee reeksen kan als volgt worden berekend<sup>1</sup>:

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm t^* \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}$$

waarbij  $\bar{x}_1$  en  $\bar{x}_2$  de gemiddelden en  $s_1$  en  $s_2$  de standaardafwijkingen van de twee steekproeven zijn en  $t^*$  de bovenste kritieke waarde voor de Student's t-verdeling met  $\text{MIN}(n_1, n_2) - 1$  vrijheidsgraden.

Een 90%-betrouwbaarheidsinterval voor de verschillen in de biogasproductie bedraagt  $1,32 - 3,16 \text{ m}^3/\text{d}$ ; een 95%-betrouwbaarheidsinterval bedraagt  $1,14 - 3,35 \text{ m}^3/\text{d}$ .

## BIJLAGE 2

# RESULTATEN LABONDERZOEK EPHYRA® EN THEMISTA®

## 2.1 EPHYRA®

### 2.1.1 INLEIDING

- Het eerste labonderzoek met slib van rwzi Tollebeek heeft in 2013 plaatsgevonden. Bedoeling hiervan was in eerste instantie de haalbaarheid aan te tonen van het Ephyra®-gistingconcept naast een conventionele referentiegisting. De onderzoeksduur van deze indicatieve testen was toen 12 weken (mei t/m juli). In september 2014 is dit onderzoek opnieuw opgestart. De belangrijkste onderzoeksvragen waren:
- Wat is de gemeten slibafbraak voor de optie Ephyra® en de referentie (conventionele gisting) waarbij de Ephyra® zowel slib van rwzi Tollebeek en Lelystad en de referentie-reactor alleen slib van rwzi Tollebeek verwerkt?
- Hoe verhoudt zich de gemeten afbraak tot de aannames gemaakt in de initiële modelberekening en business case voor de Ephyra®-variant en de referentiesituatie?

Geven de labmetingen voldoende aanleiding om de systemen ook te testen op pilotschaal?

TABEL 2.1. OVERZICHT GISTINGSPROEVEN

Specificatie onderzoek	Onderzoeks-delen	Slib van rioolwaterzuiverings-installaties (rwzi's)	Verhouding voeding slibsoorten (ca. massa%)	Type gistingreactor
Onderzoeksperiode 2013		SS rwzi Tollebeek	40	referentie
		PS rwzi Tollebeek	60	
		SS rwzi Tollebeek	30	Ephyra®
		PS rwzi Tollebeek	40	
		SS Lelystad	30	
Onderzoeksperiode 2014/2015	Deel 1	SS rwzi Tollebeek	40	referentie
		PS rwzi Tollebeek	60	
		SS rwzi Tollebeek	30	Ephyra®
		PS rwzi Tollebeek	40	
		SS Lelystad	30	
	Deel 2	SS rwzi Tollebeek	30	referentie
		PS rwzi Tollebeek	40	Ephyra®
		SS Lelystad	30	

Ephyra® = Ephyra®-variant en referentie = conventionele slibgisting

Het voorliggende rapport beschrijft voornamelijk de resultaten van het onderzoek 2014/2015 waarbij er in het hoofdstuk "Conclusies" een vergelijking wordt gemaakt met het eerder uitgevoerde onderzoek in 2013.

Het onderzoek in 2014/2015 is gesplitst in twee onderzoeksdelen. In deel 1 wordt de Ephyra® met een slibmengsel inclusief Lelystad-slib gevoed en de referentie met een mengsel exclusief Lelystad-slib (oorspronkelijke business case). Hierna wordt ook de referentie gevoed met een slibmengsel inclusief Lelystad-slib om zo de prestaties van beide systemen bij een gelijke

slibvoeding te vergelijken. Naast de continu slibgistingstesten zijn ook een aantal batch slibgistingstesten uitgevoerd om de maximale afbreekbaarheid en afbraaksnelheid te bepalen.

## 2.1.2 MATERIAAL EN METHODEN

### SLIBSAMENSTELLING

#### *Levering en opslag voeding*

Wekelijks werd slib van rwzi Tollebeek en Lelystad naar de onderzoeksruimte van Royal HaskoningDHV gebracht om de reactoren te kunnen voeden. Het slib werd gekoeld bewaard om de microbiële activiteit te onderdrukken. Vervolgens werden de slibsoorten, primair en secundair slib apart van elkaar, voorbereid en gekoeld weggezet. De voorbereiding hield in dat daar waar de voeding ook primair slib bevat, dit moet worden gezeefd. Verder kan slib (primair en/of secundair) ingedikt of verdund moeten worden totdat het totale voedingsmengsel een DS-concentratie van 4,0-4,3% heeft. Deze waarde heeft zich in het verleden uitgevezen als DS-concentratie waarbij verstopping van pompen en leidingen grotendeels kunnen worden voorkomen. In de praktijk zal slib met behulp van mechanische indikking worden ingedikt tot ca. 6%. Dit droge stofgehalte is te hoog voor de reactoren in de onderzoeksruimte van Royal HaskoningDHV.

#### *Voorbehandeling en aanmaak voeding*

Op werkdagen werd elke dag voldoende voeding aangemaakt om de reactoren te kunnen blijven voeden in de onbemande tijd van de onderzoeksruimte (avond/nacht/weekend). Bij de samenstelling van het voedingsmengsel werden de voorbereide en gekoelde slibsoorten gemengd aan de hand van een daadwerkelijke of geprognosticeerde drogestofverhouding en verhouding primair/secundair slib in de praktijk of business case.

### BESCHRIJVING OPSTELLINGEN

#### *Batch slibgistingstesten*

Voor de bepaling van de maximale afbraak en de afbraaksnelheid werden op verschillende momenten van het onderzoek batch slibgistingstesten uitgevoerd.

Als testreferentie werd ook enkel uitgegist slib (blanco) getest. De Ephyra®-variant kon in een batchtest niet worden meegenomen omdat het propstroomkarakter van het systeem niet batchgewijs kan worden nagebootst.

In de testopzet worden 200 ml flessen gevuld met 100 ml inoculum (uitgegist slib) en 20 ml substraat (vers slib) in een droge stofverhouding  $R_{1/3}$  van tussen 2,5 en 7. De verschillende combinaties inoculum/substraat werden altijd in triplo uitgevoerd, zodat afwijkende waarden kunnen worden uitgesloten. Daarna werd gedurende de proefperiode (ca. 20 dagen) dagelijks de gasproductie gemeten.

FIGUUR 2.1

## UITLEZEN BATCH SLIBGISTINGSTESTEN

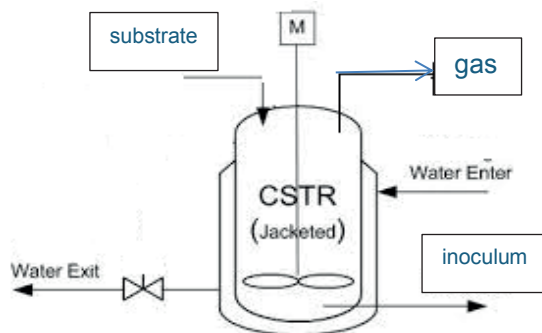
*Continue slibgistingsproeven*

De continue slibgistingsproeven vonden plaats in een Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR; zie figuur 2.2). Dit is een gesloten reactor met een continu bedreven mechanische roerder. In de zuurstofloze omgeving in de reactor wordt organisch drogestof (ODS) omgezet in biogas. Het gas wordt opgevangen in een aangesloten gaszak. Wanneer een lichte overdruk in de CSTR ontstaat als gevolg van de gasproductie, stroomt het gas door een opening de gaszak binnen.

In de loop der tijd zijn de reactoren op het lab steeds verder verbeterd om storingen te voorkomen en het proces beter te beheersen (zie figuur 2.3 en 2.4)

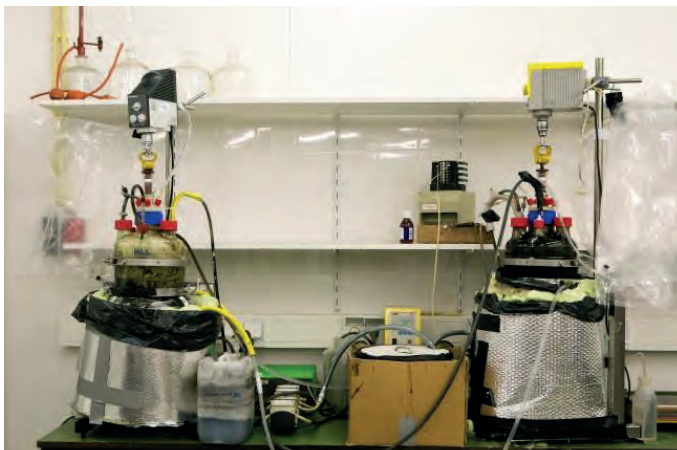
FIGUUR 2.2

## SCHEMATISCHE WEERGAVE CONTINU GISTINGSREACTOREN



FIGUUR 2.3

## EERSTE GENERATIE GISTINGSREACTOREN



FIGUUR 2.4

TWEEDE EN DERDE GENERATIE GISTINGSREACTOREN



De CSTR's hadden een volume van 20 liter en bevatten een buitenmantel waar water doorheen kan stromen zodat de CSTR's verwarmd kunnen worden. Via een slangenpomp werd het voedingsmengsel toegevoegd en digestaat afgevoerd.

Bij een volume van 20 liter in de CSTR wordt er standaard 1 liter voeding per dag (24 x 42 ml) verpompt om een verblijftijd van 20 dagen te realiseren. Wanneer de verblijftijd terug wordt gebracht of verhoogd wordt moet het voedingsdebiet evenredig verhoogd of verlaagd worden (bijv. bij een verblijftijd van 16 dagen wordt het voedingsdebiet 1,25 liter/dag). Dezelfde hoeveelheid uitgestist slib wordt uit elke reactor gepompt als er wordt gevoed. Op deze manier kan zowel het voedingsmengsel als ook uitgestist slib dagelijks worden bemonsterd voor de bepaling van het percentage DS en ODS.

Voor het Ephyra®-onderzoek zijn telkens vier reactoren gebruikt met een inhoud van 8 of 14 liter. De reactoren werden bedreven op een verblijftijd in de range 6-8 dagen. Via geperforeerde metalen schijven worden de vier compartimenten in de Ephyra®-reactor gescheiden waarbij uitwisseling van materiaal kan plaatsvinden via de perforatiegaten. Vanwege de schaalgrootte is voor het labschaalonderzoek gekozen voor een verticale opstelling. Dit is een andere opstelling dan de horizontale pilotinstallatie op rwzi Tollebeek.

Het uitvoeren van slibonderzoeken was onderverdeeld in meerdere fases, namelijk de stabilisatiefase en de stabiele fase. In de stabilisatiefase wordt het aantal te bedrijven reactoren gevoed met hetzelfde slib om te vergelijken of de systemen hetzelfde reageren en om te controleren of de reactoropstellingen geen problemen veroorzaken. Deze stabilisatiefase duurt over het algemeen één verblijftijd.

Als beide systemen gelijk reageren en goed functioneren wordt overgeschakeld op een eerste testconditie. Er volgt weer een stabilisatiefase van een á twee verblijftijden. Voor voldoende inzicht en betrouwbaarheid tijdens stabiele bedrijfsvoering start aansluitend de testfase, de “stabiele fase”. Om de betrouwbaarheid van de resultaten te kunnen waarborgen is een voldoende duur wenselijk van meestal twee á drie verblijftijden.

## METINGEN

Gedurende de looptijd van het onderzoek zijn de in – en uitgaande stromen (24 uur mengmonster) van reactoren voor de continu slibgistingstesten op werkdagen bemonsterd, en werden van de monsters het droge stof (DS) en het organische droge stof (ODS) gehalte gemeten. Op die manier wordt de afbraak in de tijd gevolgd. Naast deze parameters, worden ook andere parameters bijgehouden. Een opsomming van de alle metingen is weergegeven in tabel 1.2.

TABEL 2.2

### ANALYSES UITGEVOERD TIJDENS CONTINU PROEVEN

Parameter	Eenheid	Frequentie	Doel meting
Drogestofgehalte	%	5/week	drogestof verwijderingrendement bepalen
Organische fractie van drogestof	% van DS	5/week	bepalen verwijderingrendement ODS
Biogas	l/dag	5/week	valideren organisch drogestofverwijdering
Temperatuur	°C	Constant	controle stabiele bedrijfsvoering
pH	-	1-2/week	controle stabiele bedrijfsvoering

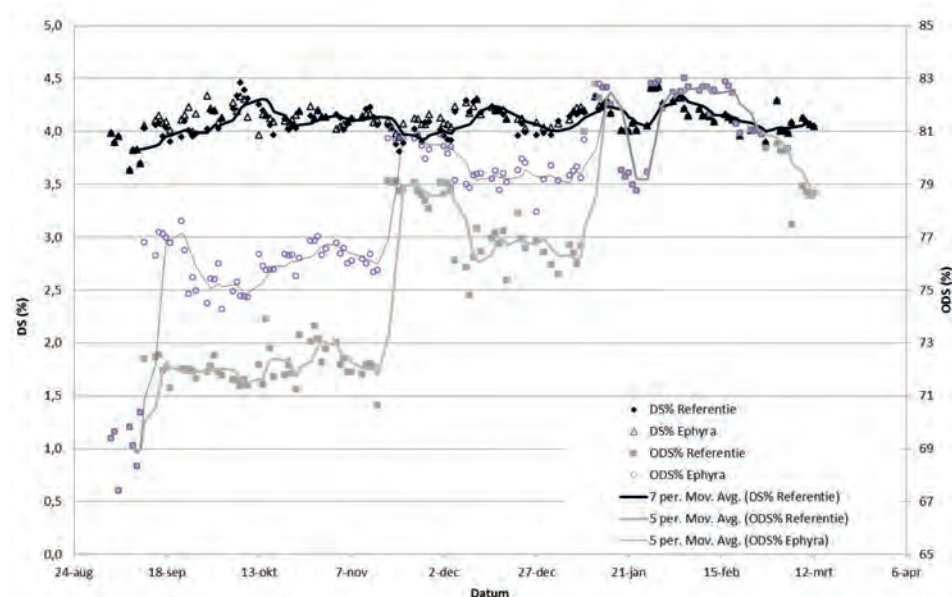
## 2.1.3 RESULTATEN

### SLIBSAMENSTELLING

In figuur 2.5 is een overzicht weergegeven van de samenstelling van de voedingsmengsels met betrekking tot DS en ODS voor de referentie en Ephyra®. Duidelijk is dat gedurende de gehele periode het DS vrij stabiel op gemiddeld 4,2% is gehouden.

FIGUUR 2.5

### CONCENTRATIES DS EN ODS (%) IN DE VOEDING TIJDENS DE CONTINU SLIBGISTINGSTESTEN 2014/2015



Vóór 9 januari is het voedingsmengsel van de referentie zonder en na die datum met Lelystad-slib aangemaakt. Het voedingsmengsel met Lelystad-slib bevat ca. 2-4% meer ODS dan het mengsel zonder Lelystad-slib. Het percentage ODS van de droge stof was in begin september 69% en nam daarna toe tot 83% in januari/februari. Deze grote toename wordt voornamelijk veroorzaakt door de toename in het ODS gehalte van secundair Tollebeek slib

### MAXIMALE AFBRAAK EN AFBRAAKSNELHEID

Er zijn twee batch slibgistingstesten uitgevoerd: op 3 december '14 en op 27 januari '15. Als inoculum is uitgegist slib gebruikt van de continu labschaal reactor (referentie). Als substraat is het slibmengsel (incl. Lelystad-slib) gebruikt. Tabel 2.3 geeft de afbraaknelheid en maximale afbraak weer.

TABEL 2.3 AFBRAAKSNELHEID EN MAXIMALE AFBRAAK; 100% GECORRIGEERD VOOR UITGEGIST SLIB

	Slibmengsel incl. Lelystad+PS (3 dec '14)	Slibmengsel incl. Lelystad-slib zonder PS (27 jan '15)
K-waarde (Hellingshoek) [ml/dag]/dagen	85/0,8	91/0,7
Maximale gasproductie [ml]	227	256
Berekende ODS-afbraak	47%	62%

### AFBRAAK ORGANISCH DROGESTOF

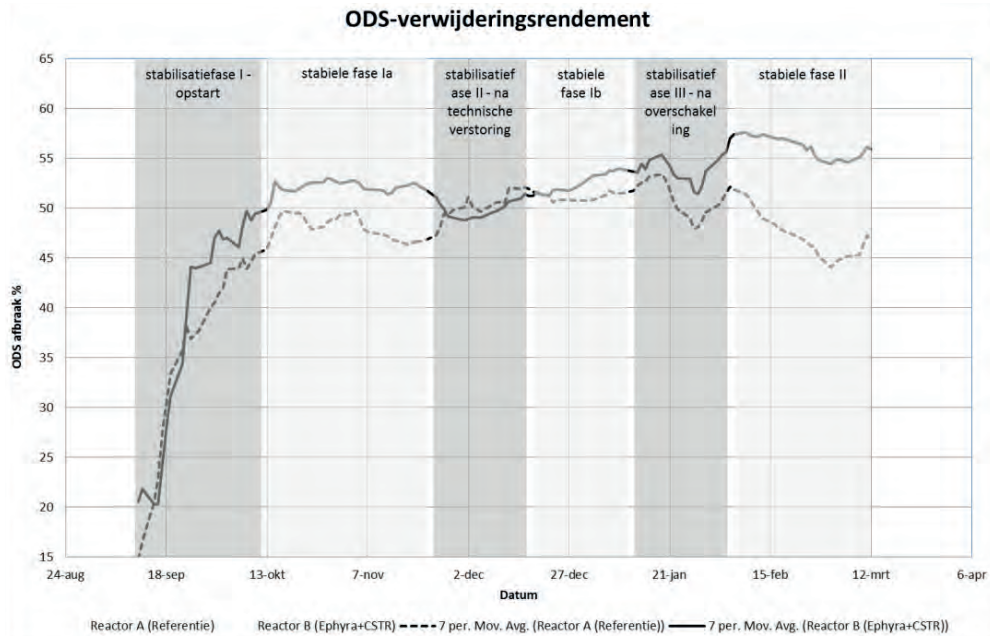
Figuur 2.6 geeft de organische drogestofafbraak weer voor de referentie en de Ephyra®. Al na een maand is de ODS-afbraak op een representatief niveau (>45%). In de derde week van november waren wat technische verstoringen ontdekt, namelijk een te lage verwarming van 34 °C via het waterbad van de Ephyra® en verstopte recirculatie waardoor kortsluitstroming ontstond. Dit is onmiddellijk hersteld en resulteerde ook onmiddellijk in een verbeterd resultaat. Op 9 januari is de voeding van de referentie inclusief Lelystad-slib aangemaakt (onderzoek deel 2). In figuur 2.6. zijn de verschillende fases gemarkeerd:

- Stabilisatiefase I: opstart 3 sept t/m 14 okt;
- Stabiele fase Ia: 15 okt t/m 18 nov;
- Stabilisatiefase II: na technische verstoring 19 nov t/m 18 dec;
- Stabiele fase Ib: 19 dec t/m 8 jan;
- Stabilisatiefase III: na overschakeling 9 jan t/m 8 feb;
- Stabiele fase III: 9 feb tot heden.

Deze gemarkeerde periodes dienen ter bepaling van gemiddelde waarden. Voor de bepaling van een gemiddeld rendement in een bepaalde periode moet de betreffende periode minstens een maand omvatten. Verder wordt altijd de eerste maand na wijziging van de instelling buiten beschouwing gelaten (stabilisatiefase) en niet meegenomen in de berekening van de gemiddelde waarde.

FIGUUR 2.6

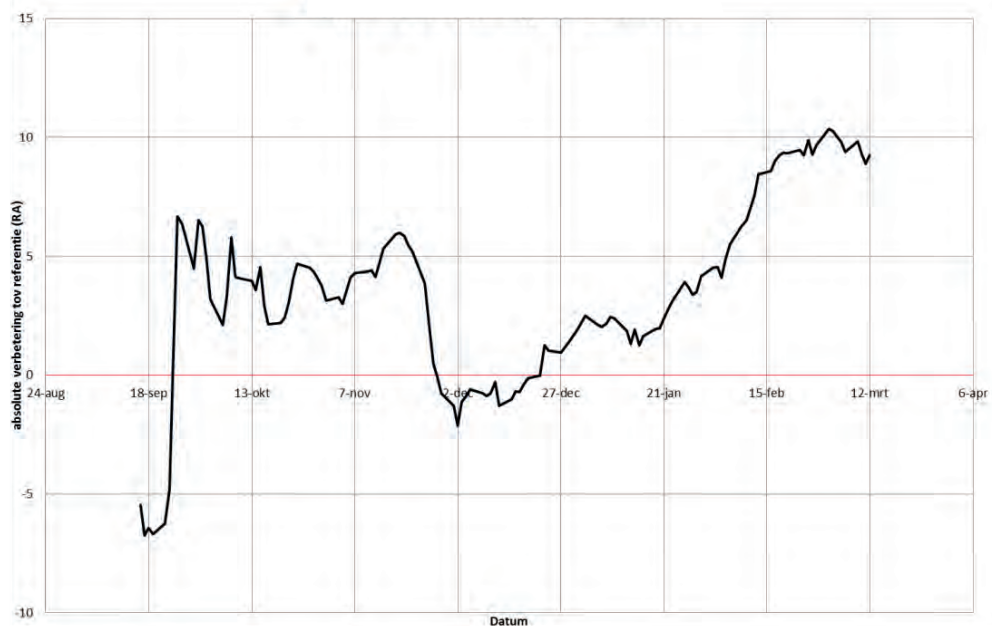
ODS-VERWIJDERINGSRENDEMENT (%) IN DE REFERENTIE EN EPHYRA® TIJDENS DE CONTINU SLIBGISTINGSTESTEN 2014/2015



Het verloop van de absolute verbetering van de Ephyra® ten opzichte van de referentie is weergegeven in figuur 2.7

FIGUUR 2.7

ABSOLUTE VERBETERING VAN HET ODS-VERWIJDERINGSRENDEMENT (%) IN DE EPHYRA® T.O.V. DE REFERENTIE TIJDENS DE CONTINU SLIBGISTINGSTESTEN 2014/2015



Uit figuur 2.7 kan worden afgeleid dat de Ephyra® al binnen vier weken na de opstart stabiliseert tot een gemiddelde absolute verbetering van ca 3%. Na het oplossen van de technische verstoring en de daardoor veroorzaakte dip van de meerafbraak stijgt de curve weer tot het oorspronkelijk niveau (niveau voor de verstoring). Na overschakeling van de voeding in de referentie neemt de absolute verbetering zelfs toe tot aan 10%.



## 2.1.4 CONCLUSIES

### SLIBSAMENSTELLING

De DS concentratie varieerde in het onderzoek 2014/2015 in beide voedingsmengsels (referentie en Ephyra®) nauwelijks. De ODS concentratie neemt echter toe van 72% in september '15 tot bijna 83% in februari '15. Het onderzoek in 2013 (mei t/m juli '13) vertoonde een vergelijkbaar verloop van de ODS concentratie in het voedingsmengsel, een lage ODS concentratie van 81% in mei en een hoge ODS van 68% in juli.

### ODS-AFBRAAK EN ABSOLUTE VERBETERING

Voor de bepaling van een gemiddelde ODS-afbraak en absolute verbetering van de Ephyra® ten opzichte van de referentie zijn twee periodes geselecteerd, stabiele fase Ia en stabiele fase II. Zo doende geeft Tabel 2.4 een overzicht van de gemiddelde waarden.

TABEL 2.4 GEMIDDELDE ODS-AFBRAAK, IN %DS

	referentie	Ephyra®
<b>Zonder Lelystad-slib (voor overschakeling)</b>		
Periodes	Stabiele fase Ia: 15 okt t/m 18 nov 2014	
ODS afbraak	47,9	52,4
Abs. Verbetering Ephyra® t.o.v. referentie		4,4
<b>Met Lelystad-slib (na overschakeling)</b>		
Periodes	Stabiele fase II: 9 feb t/m 12 mrt 2015	
ODS afbraak	46,4	55,9
Abs. Verbetering Ephyra® t.o.v. referentie		9,5

De absolute verbetering van de Ephyra® ten opzichte van de referentie komt neer op gemiddeld 4,4% (business case variant) voor de overschakeling en gemiddeld 9,5% na de overschakeling (beide systemen met hetzelfde slibmengsel gevoed).

## 2.2 THEMISTA®

### 2.2.1 INLEIDING

#### AANLEIDING EN ONDERZOEKSVRAGEN

Uit een tweede slibstrategiestudie voor HHSK was naar voren gekomen dat het aantrekkelijk kan zijn om ook het slib van de rwzi Kortenoord te vergisten op rwzi Kralingseveer, maar dat dit mogelijk ten koste zou kunnen gaan van de afbreekbaarheid van het slibmengsel. Op basis van de strategiestudie en de door Royal HaskoningDHV gepresenteerde Themista®-behandeling ter verbetering van de afbreekbaarheid is in 2013 gestart met een laboratorium onderzoek om de volgende vraag te kunnen beantwoorden:

- 1 Als het slib van rwzi Kortenoord wordt verwerkt op rwzi Kralingseveer en de Themista®-voorbehandeling wordt toegepast, wat is dan de verbetering van de organische drogestofafbraak van het mengsel ten opzichte van het huidige afbraakpercentage op de rwzi Kralingseveer?

Toen bleek dat alleen de Themista®-temperatuur behandeling onvoldoende resultaat opleverde is de test uitgebreid met aanvullend onderzoek om de afbreekbaarheid te verbeteren door het toepassen van aanvullende destructiemethoden. De vraag die hierbij gesteld werd, was:

- 2 Wat is het positieve effect op de afbraak bij een voorbehandeling van het slib, door toepassing van de Themista®-temperatuurbehandeling in combinatie met chemicaliën?

## OPZET ONDERZOEK

Het onderzoek is uitgevoerd in de periode van februari 2013 t/m december 2014 en laat zich in twee onderzoeksdelen opsplitsen. Deel 1 omvatte voornamelijk het testen van verschillende systemen voor de voorbehandelingen en reactorverwarming. Het aansluitende onderzoeksdeel 2 is in dit licht vooral als duurproef te zien waarin gedurende een lange en stabiele periodes Themista® en een referentiereactor zijn getest. Er zijn voor beide reactoren parallel twee verblijftijden getest, namelijk 20 dagen en 16 dagen.

Tabel 2.5 geeft een overzicht van de opzet van het onderzoek.

TABEL 2.5 OVERZICHT HHSK ONDERZOEK

Onderzoek-periode	Onderzoeksdelen	Slib van rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi)	Verhouding voeding slibsoorten (ca. massa%)	Type gistingsreactoren
Periode feb '13 t/m jan '14	Deel 1	SS rwzi Kralingseveer	30	referentie
		PS rwzi Kralingseveer	31	Themista®
		SS rwzi Kortenoord	15	
		SS rwzi Groenedijk	10	
		SS rwzi Groote Zaag	10	
		Kleine rwzi's (Ammerstol, Bergambacht, Berkenwoude, Haastrecht, Stolwijk)	4	
Periode feb '14 t/m dec '14	Deel 2	SS rwzi Kralingseveer	30	referentie
		PS rwzi Kralingseveer	35	Themista®
		SS rwzi Kortenoord	15	
		SS rwzi Groenedijk	10	
		SS rwzi Groote Zaag	10	

referentie = conventionele slibgisting (mesofiel, 20dagen)

## 2.2.2 MATERIAAL EN METHODEN

### SLIBSAMENSTELLING

#### *Levering en opslag voeding*

Elke twee weken wordt slib van de verschillende rioolzuiveringsinstallaties verzameld op rwzi Kralingseveer en naar de onderzoeksruimte van RHDHV gebracht om de reactoren te kunnen voeden. Deze frequentie is gekozen omdat eerder uitgevoerd onderzoek aangetoond heeft dat dan de veroudering van het dan slib beperkt blijft. Het slib wordt gekoeld bewaard om de microbiële activiteit te onderdrukken.

Vervolgens worden de slibsoorten, primair en secundair slib apart van elkaar, voorbereid en gekoeld weggezet. De voorbereiding houdt in dat daar waar de voeding ook primair slib bevat, dit moet worden gezeefd. Verder kan slib (primair en/of secundair) ingedikt of verdund moeten worden tot dat het totale voedingsmengsel een DS-concentratie van 4,0-4,3% heeft. Deze waarde heeft zich in het verleden uitgewezen als DS-concentratie waarbij verstopping van pompen en leidingen grotendeels kunnen worden voorkomen. In de praktijk zal slib met behulp van mechanische indikking worden ingedikt tot ca 6%. Dit drogestofgehalte is te hoog voor de reactoren in de onderzoeksruimte van RHDHV.

#### *Voorbehandeling en aanmaak voeding*

Op werkdagen wordt elke dag voldoende voeding aangemaakt om de reactoren te kunnen blijven voeden in de onbemande tijd van de onderzoeksruimte (avond/nacht/weekend). Bij de samenstelling van het voedingsmengsel wordt de voorbereide en gekoelde slibsoorten gemengd op basis van de verhouding tussen de verschillende jaarlijkse slibproducties. Dit voedingsmengsel wordt zowel aan de referentie reactor als ook aan de Themista®-reactor toegediend.

De Themista®-voorbehandeling van het slib gebeurt in-line voordat het voorbehandelde slibmengsel in de reactor komt. Vanwege de kleine volumina die worden gepompt is het voorbehandelde slibmengsel niet bemonsterd.

## BESCHRIJVING OPSTELLINGEN

### *Batch slibgistingstesten*

Voor een vergelijk van verschillende procesinstellingen of voorbehandelingen en ter bepaling van de maximale afbraak en de afbraaksnelheid zijn op verschillende momenten van het onderzoek batch slibgistingstesten uitgevoerd. Hierin worden geproduceerde biogas dagelijks gemeten. De afbraak van de organische stof is gevolgd aan de hand van de gasproductie die gedurende de test is gemeten.

Om de resultaten zo goed mogelijk met elkaar te kunnen vergelijken is de aanvangsconcentratie droge stof constant gehouden per test. De uitgangspunten voor alle batch testen is gelijk, namelijk:

- Totaal 120 ml slib in 300 ml fles inoculum (uitgegist slib) en substraat;
- Elke instelling in triplo getest ter vergroting van de betrouwbaarheid;
- Verhouding inoculum – substraat groter dan 3:1 op basis van organisch droge stof;
- Gistingstemperatuur 34 °C;
- Gistingduur 14-20 dagen;
- Gemeten CZV-gehalten van primair en secundair slib:
  - CZV-gehalte primair slib 1,9 g CZV/g organische drogestof (ODS);
  - CVZ-gehalte secundair slib 1,42 g CZV/g ODS.
- 1 g afgebroken CZV komt overeen met 0,35 l methaan;
- Methaangehalte van het geproduceerde biogas: 63%.

De resultaten van de verschillende batch series zijn vergeleken aan de hand van de hellingshoek (k-waarde), totale gasproductie en gemiddelde absolute organisch stofafbraak in % berekend op basis van de geproduceerde gashoeveelheid.

### *Continue slibgistingstesten*

De Themista®-voorbehandeling in de continue reactoren is halverwege onderzoeksdeel 1 veranderd van een batchgewijze naar een in-line voorbehandeling bestaande uit verwarming en dosering van waterstofperoxide. De uiteindelijk instellingen voor de Themista®-voorbehandeling die zijn getest in de continue slibgistingstesten zijn afgeleid van de resultaten van batch slibgistingstesten.

Het uitvoeren van continue slibonderzoeken bestond uit meerdere fases, namelijk de stabilisatiefase en stabiele fase. In de stabilisatiefase wordt het aantal te bedrijven reactoren gevoed met hetzelfde slib om te vergelijken of de systemen hetzelfde reageren op de voeding van slib en om te controleren of de reactor opstellingen geen problemen veroorzaken. Deze stabilisatiefase duurt over het algemeen een sibleeftijd.

Als beide systemen gelijk reageren en goed functioneren wordt overgeschakeld op een eerste testconditie. Er volgt weer een stabilisatiefase van een á twee sibleeftijden. Voor voldoende inzicht en betrouwbaarheid tijdens stabiele bedrijfsvoering start aansluitend de testfase, de “stabiele fase”. Om de betrouwbaarheid van de resultaten te kunnen waarborgen is een voldoende duur wenselijk van meestal twee á drie sibleeftijden.

## METINGEN

### Batch slibgistingstesten

Zoals al beschreven hiervoor wordt gedurende de proefperiode dagelijkse de gasproductie gemeten. Verder is op een later moment van het onderzoek ook het DS en ODS gemeten van elke flesje voor en na afloop van de proefperiode.

### Continue slibgistingstesten

Gedurende de looptijd van het onderzoek zijn de reactoren voor de continue slibgistingstesten gecontroleerd door op werkdagen het drogestof en het organische drogestof (ODS) te meten van de ingaande en uitgaande slibstromen (24 uur mengmonster) om de afbraak in de tijd te kunnen volgen. Naast deze parameters, worden ook andere parameters bijgehouden. Deze zijn in tabel 2.6 opgesomd.

TABEL 2.6 ANALYSES UITGEVOERD TIJDENS CONTINU PROEVEN

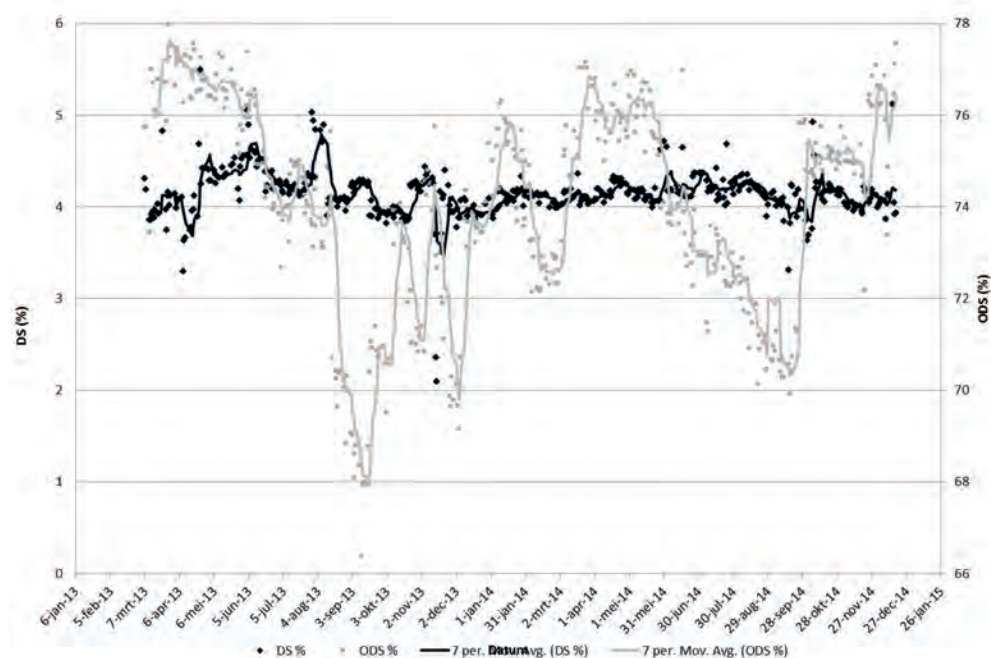
Drogestofgehalte	%	5/week	drogestof verwijderingrendement bepalen
Organische fractie van drogestof	% van DS	5/week	bepalen verwijderingrendement ODS
Biogas	l/dag	5/week	valideren organisch drogestofverwijdering
Temperatuur	°C	Constant	controle stabiele bedrijfsvoering
pH	-	1-2/week	controle stabiele bedrijfsvoering

Ter controle zijn meer of minder regelmatig ingaande en uitgaande stromen van reactoren van de verschillende onderzoeksprojecten bemonsterd en voor externe analyses (bij Aqualysis) verstuurd.

## 2.2.3 RESULTATEN

### SLIBSAMENSTELLING

FIGUUR 2.8 DROGESTOF EN ORGANISCHE DROGESTOF IN DE VOEDING



## BATCH SLIBGISTINGSPROEVEN

Tabel 2.7 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten van de batch testen. Uit de batch testen zijn de instellingen voor de continue reactoren afgeleid.

## CONTINUE SLIBGISTINGSTESTEN

### *Bijzonderheden in bedrijfsvoering*

Het eerste deel van de onderzoeksperiode werd voornamelijk beheerst door het steeds weer aanpassen van de systemen voor zowel de voorbehandeling als ook de reactor verwarming veroorzaakt door technische verstoringen en voortschrijdende inzichten. De belangrijkste gebeurtenissen tijdens de gehele testperiode zijn opgesomd in tabel 2.8. Vanwege frequente wijzigingen van instelling in het onderzoeksdeel 1 hebben de hierna beschreven resultaten dan ook voornamelijk betrekking op deel 2.

**TABEL 2.7 RESULTATEN BATCHPROEVEN THEMISTA®**

Batch	Doel	Resultaat
1	Effect temperatuur en tijd van verhitting op afbraak en afbraaksnelheid	Optimale temperatuur-tijd combinatie is redelijk gevoelig m.b.t. (te) hoge temperaturen. Op basis van de testen is een optimale tijdsduur (30 minuten) en temperatuur geselecteerd.
2	Effect toevoeging natriumbicarbonaat	De zouttoevoeging heeft inclusief verhitting geleid tot een iets hogere afbraak. Met enkel zouttoevoeging tot iets lagere afbraak. De toevoeging van natrium heeft dus geen meerwaarde.
3	Effect toevoegen natronloog	De meerafbraak neemt iets toe door de toevoeging van natronloog. De kosten zijn hoger dan de besparing door de geringe meerafbraak ten opzichte van de situatie zonder loog toevoeging.
5	Effect toevoegen natronloog na verhitting	De kosten van de natronloogdosering wegen niet op tegen de besparing die door de extra meerafbraak die behaald wordt.
6	Effect Themista® per slibsoort	De toename van drogestofafbraak wordt meer gerealiseerd bij slib van de grotere dan de kleine zuiveringen. Mogelijk komt dit door de kortere verblijftijd in de slibopslag waardoor dan minder stabilisatie van het slib plaats.
7	Effect toevoegen peroxide voor en na verhitting	De beste resultaten (5,1 tot 5,6 % meerafbraak) zijn bereikt met peroxidedosering na verhitting.
8	Effect ultrasoon behandelen t.o.v. peroxide doseren	Het effect van ultrageluid is sterker dan peroxidedosering. De kosten voor een dergelijke unit wegen echter niet op tegen de meerafbraak
9	Effect slibsoorten en opslag voeding	Bij het verse slib is het verschil tussen slib van grote en kleine rwzi's niet noemenswaardig. Ook na Themista®-behandeling en na gekoelde opslag van een week is het onderlinge verschil niet heel groot.

**TABEL 2.8 BIJZONDERE GEBEURTENISSEN IN BEDRIJFSVOERING TIJDENS DE CONTINU SLIBGISTINGSTESTEN**

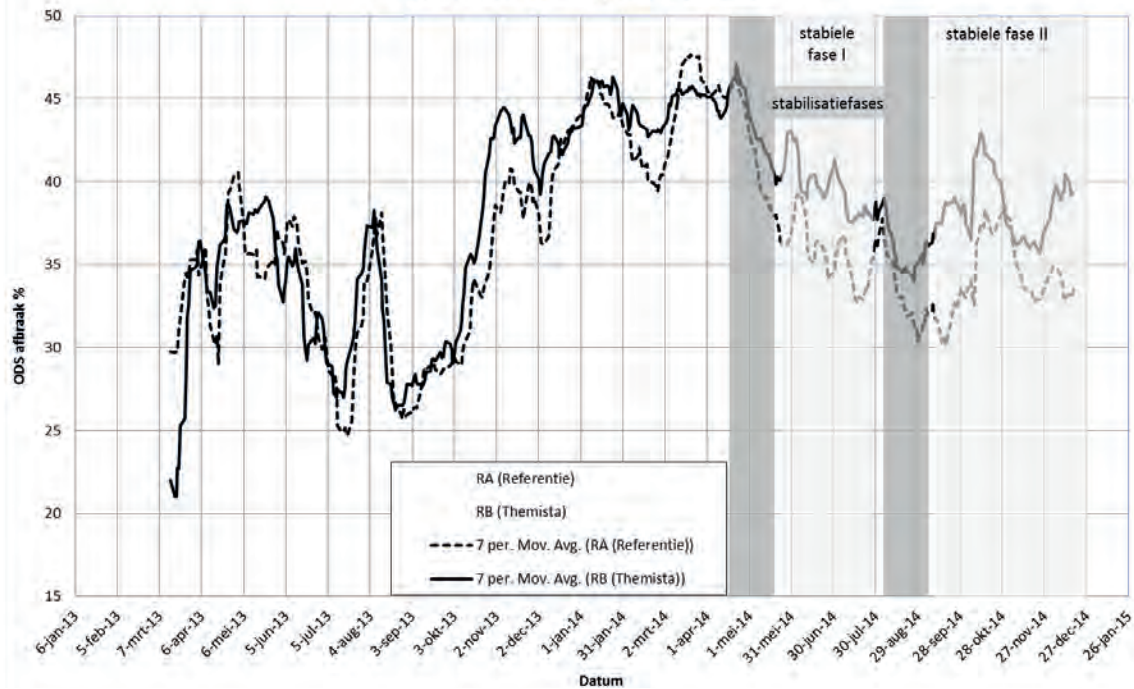
Datum	Beschrijving gebeurtenis
27 februari 2013	RA opgestart met digestaat
13 maart '13	Opstart RB met digestaat
14 maart t/m 12 april '13	Schuimproblematiek door nieuw (verontreinigt?) slib
14 mei '13	Batchgewijze Themista®-voorbehandeling voor RB gestart; voeding van slibmengsel van alle acht zuiveringen
6 september '13	Opstart batchgewijze Themista® voorbehandeling gevolgd van dosering van waterstofperoxide voor RB
1 oktober '13	Opstart continue of in-line voorbehandeling (Themista® plus dosering van waterstofperoxide voor RB
19 november '13	Overschakeling naar voeding met slibmengsel van de 4 grote zuiveringen, inclusief online waterstofperoxide dosering
2 december '13	Warmtewisselaar defect en gerepareerd, water in RB gelekt
14 december '13	Voedingslang RB defect en vervangen
18 december '13	Voedingslang RB opnieuw defect en vervangen door gewapend slang
9 januari '14	Verwarmingssysteem voorbehandeling aangepast
10 april '14	Lekkage verwarmingssysteem reactoren. Vervolgens aanpassing systeem en indikken reactorinhoud
24 juli '14	Verblijftijd van beide reactoren van 20d naar 16 dagen

*Afbraak organische droge stof*

Figuur 2.9 geeft de organische drogestofafbraak weer voor de referentie en de Themista®-reactor gedurende het twee jaar durende onderzoek. Omdat zoals eerder beschreven de echte duurproeven in de het onderzoeksdeel 2 hebben plaats gevonden worden de in dit deel specifieke periodes uitgelicht:

- Stabilisatiefase I: na technische aanpassingen verwarming 10 apr t/m 14 mei;
- Stabiele fase I: 15 mei t/m 23 jul;
- Stabilisatiefase II: na verkorten verblijftijd (20d -> 16d) 24 jul t/m 22 aug;
- Stabiele fase II: 25 aug t/m 18 dec.

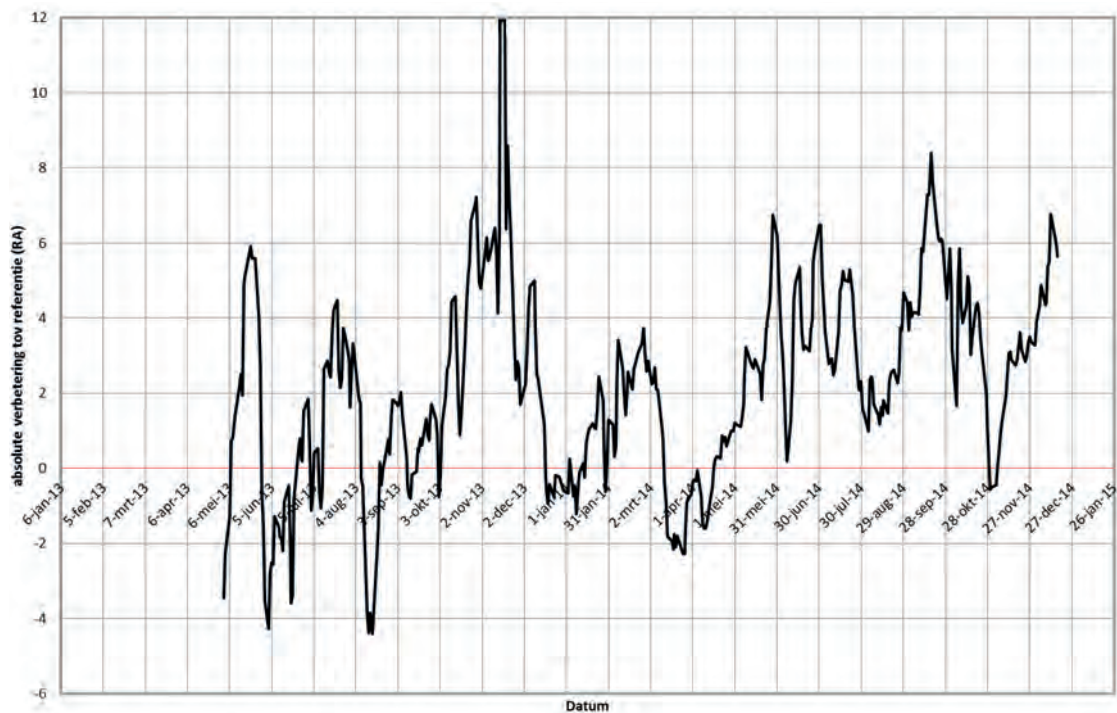
FIGUUR 2.9 ODS-VERWIJDERINGSRENDEMENT (%) VOOR THEMISTA® EN DE REFERENTIE TIJDENS DE CONTINU SLIBGISTINGSTESTEN



De gemarkeerde periodes dienen voor de bepaling van de gemiddelde waarden. Voor de bepaling van een gemiddeld rendement in een bepaalde periode moet de betreffende periode minstens een maand omvatten. Verder wordt altijd de eerste maand na wijziging van de instelling buiten beschouwing gelaten (stabilisatiefase) en niet meegenomen in de berekening van de gemiddelde waarde.

Het verloop van de absolute verbetering van de Themista® ten opzichte van de referentie is weergegeven in figuur 2.10.

FIGUUR 2.10 ABSOLUTE VERBETERING VAN HET ODS-VERWIJDERINGSRENDEMENT (%) VOOR THEMISTA® TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIE TIJDENS DE CONTINUE SLIBGISTINGSTESTEN



Uit figuur 2.10 kan worden afgeleid dat pas vanaf het moment dat het verwarmingssysteem is aangepast een stabiele en positieve waarde voor de absolute verbetering van de Themista®-reactor ten opzichte van referentie reactor van ca. 4% werd bereikt. Deze waarde blijft ook na verlagen van de verblijftijd van 20 dagen naar 16 dagen op vergelijkbaar niveau. Er is een significant verlaging opgetreden rond eind oktober 2014, waarbij een duidelijke reden voor een lagere afbraak gedurende vier achtereenvolgende dagen in de Themista® niet is gevonden.

### 2.3.4 CONCLUSIES

#### SLIBSAMENSTELLING

De DS concentratie in het voedingsmengsel varieerde gedurende het onderzoek nauwelijks en is gemiddeld ca. 4%. De ODS concentratie schommelt tussen de 68% en 77%. Dit wordt veroorzaakt door seizoensinvloeden en daarmee veranderde bedrijfsvoering in de waterlijn, lager ODS in de zomermaanden en hoger ODS in de wintermaanden.

#### ODS-AFBRAAK EN ABSOLUTE VERBETERING

Voor de bepaling van een gemiddelde ODS-afbraak en absolute verbetering van de Themista®-reactor ten opzichte van de referentie zijn twee periodes geselecteerd, stabiele fase I en stabiele fase II. Zodoende geeft tabel 2.9 een overzicht van de gemiddelde waarden.

TABEL 2.9 GEMIDDELDE ODS-AFBRAAK, IN %ODS TIJDENS DE CONTINU-LABTESTEN

	referentie	Themista®
<b>Verblijftijd 20 dagen</b>		
Periodes	Stabiele fase I: 15 mei t/m 23 jul	
ODS afbraak	35,8	39,8
Abs. Verbetering Themista® t.o.v. referentie		4,0
<b>Verblijftijd 16 dagen</b>		
Periodes	Stabiele fase II: 25 aug t/m 18 dec	
ODS afbraak	34,2	38,2
Abs. Verbetering Themista® t.o.v. referentie		4,0

De absolute verbetering van de Themista®-reactor ten opzichte van de referentie bedraagt gemiddeld 4% voor de geteste verblijftijden 20 en 16 dagen.

Ook in diverse batchtesten is een meerafbraak aangetoond door de Themista® voorbehandeling van verhitting tot 60-70°C gevolgd door H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosering. Naast het hogere rendement van ODS verwijdering is in de batchtesten ook gezien dat de gasproductie (en dus de ODS verwijdering) sneller verloopt na Themista® voorbehandeling.

De labresultaten laten een lagere meerafbraak zien voor Themista® in vergelijking met een conventionele installatie dan initieel gemodelleerd. De gemeten meerafbraak in het lab zijn wel genoeg om Themista® verder te testen op pilotschaal.



## BIJLAGE 3

# BETROUWBAARHEID ASMETINGEN, DROGESTOFMETINGEN EN ORGANISCHE DROGESTOFMETINGEN

## 3.1 INLEIDING

De drogestof- en organische drogestofafbraak in een slibgisting kan berekend worden uit drogestof en organische drogestofmetingen en uit de gemeten asgehalten van het slib. Bij de berekening uit het asgehalte wordt de zogenaamde constante asmethode gebruikt. Hierbij is de aanname dat er geen as verdwijnt of wordt geproduceerd. De verschillen in asgehalte voor en na de gisting zijn een gevolg van de organische stofafbraak in de gisting.

## 3.2 DISCREPANTIE RESULTATEN DROGESTOF EN AS METINGEN

De berekende drogestof en organische drogestof afbraak uit drogestof/organische drogestofmetingen en het asgehalte voor en na de slibgisting, verschilt significant. Naast het verschil is afbraak voorspelde de resultaten berekend uit de asgehalten ook een hogere meerafbraak voor Ephyra® en Themista® dan berekende uit drogestof/organische drogestofmetingen. De vraag kan gesteld worden welke methode betrouwbaarder is? Op deze vraag wordt hieronder ingegaan.

Tabel 3.2 geeft een slibbalans over de Themista® en referentie reactor.

TABEL 3.2

GEMIDDELTE SLIB AAN- EN AFVOER VAN DE REFERENTIE REACTOR EN THEMISTA®

Parameter	Referentie	Themista®	Eenheid
aanvoer slibgisting			
- drogestof	36,5	34	kg/d
- organische drogestof	26,7	25	kg/d
- as	9,8	9	kg/d
afvoer slibgisting			
- drogestof	24,3	23,8	kg/d
- organische drogestof	15,9	16,2	kg/d
- as	8,3	7,6	kg/d

Uit tabel 3.2 blijkt dat bij de Themista® en referentiereactor minder as wordt afgevoerd dan er wordt aangevoerd. Dit zou theoretisch niet kunnen. In de praktijk blijkt op de pilotinstallatie te Kralingseveer periodiek onderin as te worden afgelaten. Het is echter onbekend hoeveel dit is geweest.

Tabel 3.3 geeft een gecorrigeerde balans waarbij is aangenomen dat de hoeveelheid as in de aan- en afvoer van de slibgisting gelijk zijn. Dit betekent dat in de slibafvoer de hoeveelheid as en dus ook de hoeveelheid droge stof worden verhoogd. De hoeveelheid organische droge stof

wordt niet aangepast. Bij deze aanname wordt dus de eventuele vorming van as, bijvoorbeeld door struvietvorming of andere neerslagen, verwaarloosd.

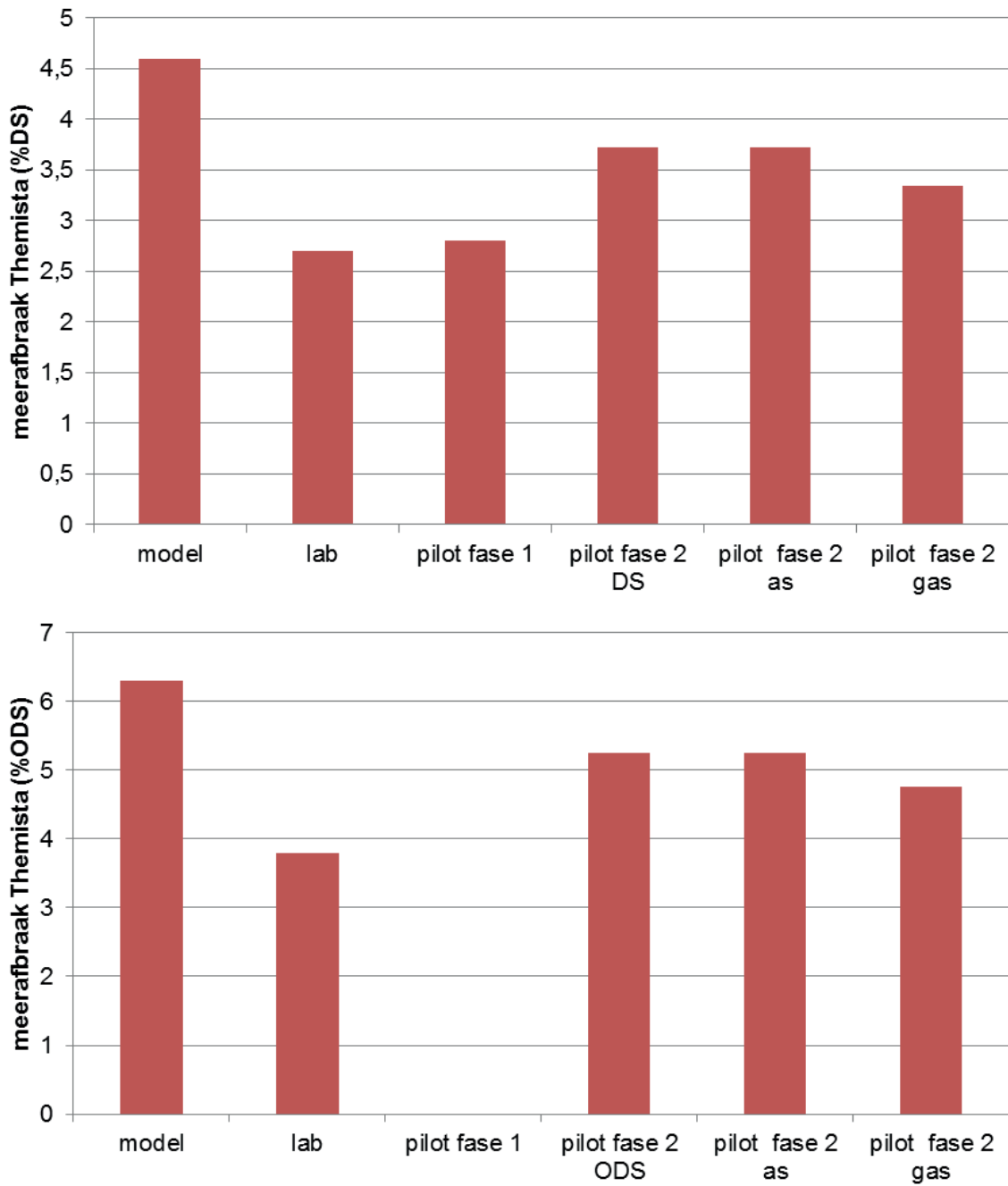
**TABEL 3.3** GEMIDDELDE SLIB AAN- EN GECORRIGEERDE AFVOER VAN DE REFERENTIEREACTOR EN THEMISTA® EN DE GEMIDDELDE GASPRODUCTIES IN BEIDE SYSTEMEN

Parameter	Referentie	Themista®	Eenheid
aanvoer slibgisting			
- drogestof	36,5	34	kg/d
- organische drogestof	26,7	25	kg/d
- as	9,8	9	kg/d
afvoer slibgisting			
- drogestof	25,7	25,2	kg/d
- organische drogestof	15,9	16,2	kg/d
- as	9,8	9	kg/d
Biogas	10,7	8,9	m <sup>3</sup> /d

Figuur 3.1 geeft de berekende meerafbraak in de Themista® reactor berekend met de gegevens van tabel 3.3, dus met de correctie voor as. Uit de figuur blijkt dat de berekende meerafbraak volgend drogestof, organische droge stof en as metingen na de doorgevoerde correctie redelijk goed overeenstemmen. Echter, de vraag blijft of de uitgevoerde correctie voor de as aan- en afvoer correct is. Immers, bij de berekening van de rendementen met de constante asmethode is de aanname is dat de ashoeveelheid constant is. Er wordt dus geen rekening gehouden met eventuele vorming van as in de slibgisting. Asvorming is aannemelijk omdat er bij Kralingseveer en ook Tollebeek in meer of mindere mate struvietvorming en andere neerslagen optreden. De exacte hoeveelheid blijft onbekend. Dit betekent ook dat iedere correctie voor asvorming of de hoeveelheid as in de aan- en afvoer een “best guess” blijft. De berekening met de constante as methode is daarom ook niet toepasbaar.

De conclusie luidt dat de afbraak berekend uit drogestof/organische drogestof metingen een beter beeld geven dan berekend uit de asgehalten voor en na de gisting.

FIGUUR 3.1 BEREKENDE ABSOLUTE MEERAFBRAAK IN THEMISTA® TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIEREACTOR VOLGENS DE INITIËLE MODELBEREKENINGEN, DE LABTESTEN EN DE PILOT TESTEN FASE 1 (1 REACTORBEDRIJF) EN FASE 2 (2 REACTOREN BEDRIJF)



## BIJLAGE 4

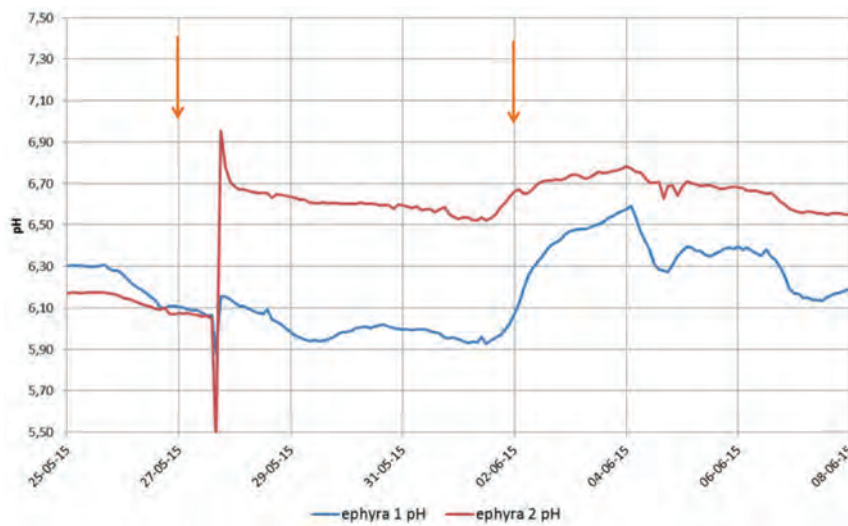
## RESULTATEN PIEKAANVOEREN EPHYRA®

Op de pilotreactor Ephyra® zijn piekaanvoeren getest om de stabiliteit van het system na te gaan.

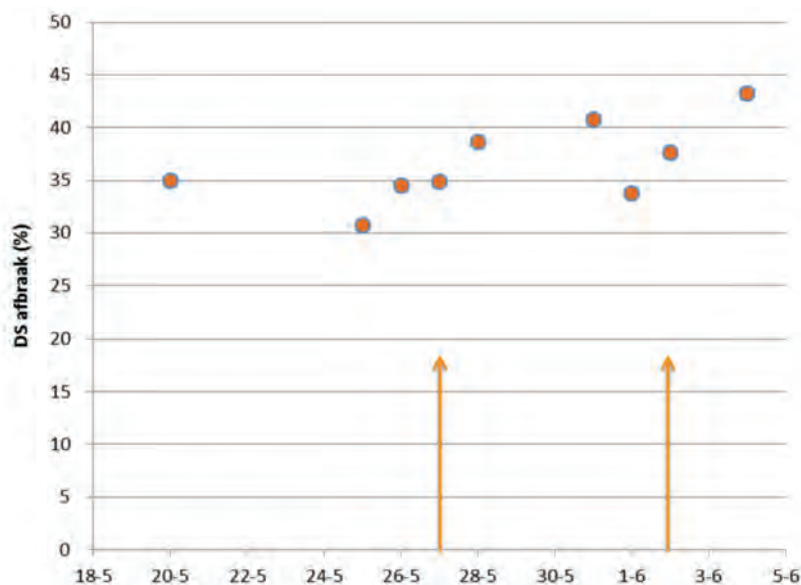
## LANGE PIEK

Figuur 4.1 en 4.2 geeft het verloop van de pH en de slibafbraak voor, tijdens en na de lange piek

FIGUUR 4.1 PH IN EERSTE EN TWEEDE COMPARTIMENT (EPHYRA® 1 EN 2) TIJDENS PIEKAANVOER. HET BEGIN EN EINDE VAN DE PIEK IS GEGEVEN DOOR DE TWEE ORANJE PIJLEN. TIJDENS DE PIEKAANVOER WAS DE VERBLIJFTIJD IN EPHYRA® 6 DAGEN IN PLAATS VAN 8 ONDER NOMINALE AANVOER

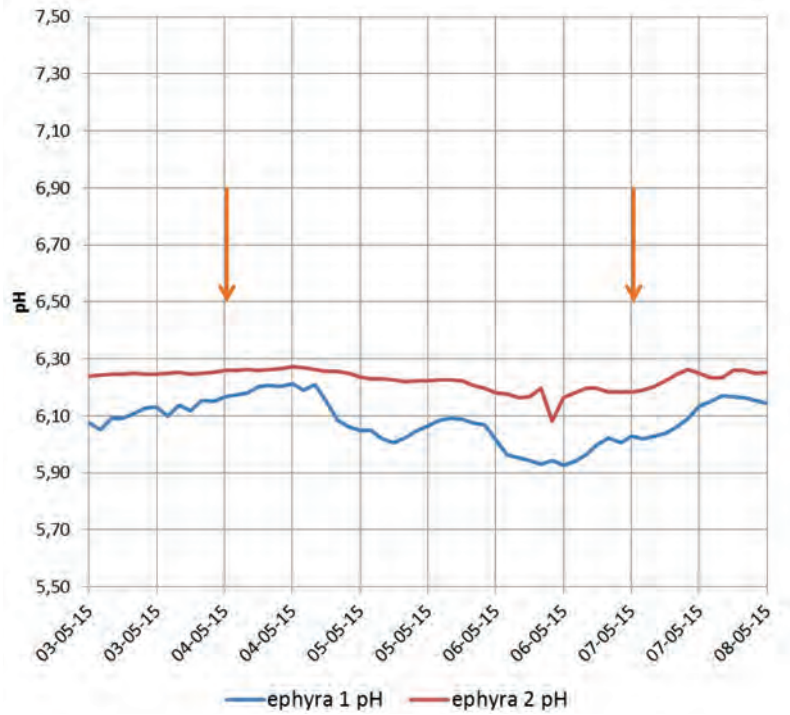


FIGUUR 4.2 DROGESTOFAFBRAAK IN DE EPHYRA® TIJDENS PIEKAANVOER. HET BEGIN EN EINDE VAN DE PIEK IS GEGEVEN DOOR DE TWEE ORANJE PIJLEN. TIJDENS DE PIEKAANVOER WAS DE VERBLIJFTIJD IN EPHYRA® 6 DAGEN IN PLAATS VAN 8 ONDER NOMINALE AANVOER



TYPISCHE PIEK

FIGUUR 4.3 PH IN EERSTE EN TWEEDE COMPARTIMENT (EPHYRA® 1 EN 2) TIJDENS PIEKAANVOER. HET BEGIN EN EINDE VAN DE PIEK IS GEGEVEN DOOR DE TWEE ORANJE PIJLEN. TIJDENS DE PIEKAANVOER WAS DE VERBLIJFTIJD IN EPHYRA® 6 DAGEN IN PLAATS VAN 8 ONDER NOMINALE AANVOER



FIGUUR 4.4 DROGESTOFAFBRAAK IN DE EPHYRA® TIJDENS PIEKAANVOER. HET BEGIN EN EINDE VAN DE PIEK IS GEGEVEN DOOR DE TWEE ORANJE PIJLEN. TIJDENS DE PIEKAANVOER WAS DE VERBLIJFTIJD IN EPHYRA® 6 DAGEN IN PLAATS VAN 8 ONDER NOMINALE AANVOER

