

KWR 2017.007 | april 2017

Actieve hydrodynamische cavities voor effectieve slibontsluiting

Actieve hydrodynamische cavitatie voor effectieve slibontsluiting

KWR 2017.007 | april 2017

Opdrachtnummer

400544

Projectmanager

Erwin Beerendonk

Opdrachtgever

TKI Watertechnologie

Kwaliteitsborger

Roberta Hofman-Caris

Auteurs

Tessa van den Brand en Laura Snip (KWR Watercycle
Research Institute)

Samenwerkingspartners

WhirlWind International, Delfluent Services & KWR
Watercycle Research Institute

Dit rapport is verzonden aan de deelnemende partijen
en is openbaar.

Dit project is mede gefinancierd uit de Toeslag voor
Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het
ministerie van Economische Zaken.



Jaar van publicatie
2017

Meer informatie

Tessa van den Brand
T +31 (0)30 606 96 29
E Tessa.van.den.Brand@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle
Research
Institute

KWR | april 2017 © KWR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd,
opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand,
of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze,
hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën,
opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande
schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Al geruime tijd wordt er naarstig een oplossing gezocht voor de hoge kosten die gepaard gaan met de slibverwerking op een afvalwaterzuiveringsinstallatie. De behandeling van de sliblijn is namelijk verantwoordelijk voor 25% van de totale kosten. Een apparaat dat de methaanproductie en ontwaterbaarheid van het slib maximaliseert, is daarom erg interessant voor de waterschappen.

In deze studie wordt de toepassing van actieve hydrodynamische cavitatie op de sliblijn onderzocht. Bij actieve hydrodynamische cavitatie wordt cavitatie opgewekt door een zelf vibrerend element in een buis. Hiertoe is een instrument ontworpen en gebouwd dat op dit principe is gebaseerd. Dit innovatieve concept maakt het mogelijk effectieve(re) cavitatie op te wekken tegen lagere energiekosten dan bij passieve cavitatie (zoals d.m.v. een venturibuis), wat al wel wordt toegepast. Dit nieuwe apparaat is zo ontworpen dat er verschillende parameters ingesteld kunnen worden, zoals de tegendruk, diameter van de bal, ruimte tussen bal en buiswand en de stroomsnelheid, om de opgewekte cavitatie te optimaliseren.

De effectiviteit van dit apparaat als voorbehandeling voor de vergistingstap is geëvalueerd met een “automatic methane potential test system” (AMPTS II). Door zowel een onbehandeld monster (blanco) als een gecaviteerd (behandeld) monster in te zetten, kon de relatieve toename van methaanproductie gemeten worden. Voor beide types monsters is gebruik gemaakt van een inoculum (uitgegist slib) om de vergisting op gang te brengen. Aanvullend zijn er verkennende ontwaterbaarheidsproeven uitgevoerd, en is de financiële haalbaarheid berekend.

De AMPTS II resultaten laten zien dat een verkenning van het werkgebied van de instellingen van de tool heeft geleid tot een verbetering van methaanproductie van ongeveer 10%. De flexibiliteit van de tool maakt dat de instellingen mogelijk nog geoptimaliseerd kunnen worden, waardoor de methaanproductie mogelijk nog verder verbeterd.

De toepassing van VibroCavtool heeft waarschijnlijk de vorming van fijne deeltjes tot gevolg, waardoor ook de eigenschappen van het slib kunnen veranderen. De mogelijke vorming van fijne deeltjes kan, wanneer er voor ontwatering gebruik wordt gemaakt van een centrifuge, de ontwaterbaarheid mogelijk verbeteren. Wanneer de ontwaterbaarheid beïnvloed wordt heeft dit een direct gevolg voor de kosten van slibverwerking.

Een voorbehandeling met de VibroCavtool kost ook energie. In een financiële haalbaarheidsbepaling zijn dit energieverbruik (aanslag: 2,0 kW/m³) en de verbetering van de methaanproductie (10%) meegenomen. Ook is er een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd naar het effect van de ontwaterbaarheid op de financiële haalbaarheid. Deze berekening laat zien dat de VibroCavtool winstgevend kan worden als de ontwaterbaarheid 0,5% (absoluut) verbetert. Kortom, het is interessant om de innovatieve VibroCavtool verder te verkennen.

Inhoud

1	Introductie	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel onderzoek	7
1.3	Leeswijzer	7
2	Begrippenlijst / Definities	8
3	Achtergrond slibontsluiting	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Effecten slibontsluiting	10
3.3	Toepassing op RWZI	11
3.4	Overzicht slibontsluitingmethoden	12
4	Materiaal en methoden	16
4.1	Proof of concept analyse	16
4.2	Pilot	17
4.3	Vergisting (AMPTS II)	22
4.4	Ontwaterbaarheid	23
5	Resultaten en Discussie	24
5.1	Proof of concept met uitgegist slib	24
5.2	Vergisting van behandeld secundair slib in de pilot	24
5.3	Ontwaterbaarheidsmethodes	27
5.4	Financiële haalbaarheidsstudie	28
6	Conclusies	36
7	Outlook	37
7.1	Uitwerken werkgebied van actieve hydrodynamische cavitatie op secundair slib	37
7.2	Meetmethode ontwaterbaarheid ontwikkelen	37
7.3	In-line vergelijken met referentie situatie	37
7.4	Tool inzetten op uitgegist slib	38
	Referenties	39
	Bijlage I Protocol metingen AMPTS II	43
	Bijlage II Optimalisatie AMPTS II	46
	Bijlage III AMPTS II interpretatie	47
	Bijlage IV Resultaten van ontwaterbaarheidstest	49
	Bijlage V Alternatieve toepassingen actieve hydrodynamische cavitatie	50

1 Introductie

1.1 Aanleiding

De aanleiding van dit TKI-project 'VibroCav' is de ontwikkeling van effectieve actieve hydrodynamische cavitatie door Whirlwind International B.V. Met actieve hydrodynamische cavitatie lijken verschillende toepassingen voorhanden:

- Energie-efficiëntere en effectievere slibontsluitingsmethode
- Effectieve destructie van organische microverontreinigingen
- Desinfectie van gecontamineerde waterstromen

VibroCav wordt beschreven in het patent van Ivannikov and Ivvanikov 2004 als een hydrodynamische zelfvibrerende element-in-buis instrument dat de cavitatie versterkt. Deze actieve hydrodynamische cavitatie tool werkt volgens een uniek systeem waarin zowel vibratie als cavitatie optreedt. Deze technologie is veelbelovend om als slibontsluitingstechniek in te zetten, omdat het effectief actieve cavitatie kan opwekken tegen lagere energiekosten en bij hogere tegendrukken dan passieve cavitatie (een reeds bewezen slibontsluitingstechnologie).

1.2 Doel onderzoek

De inzet van een slibontsluitingstechnologie kost extra energie. Echter, de kosten worden naar verwachting teruggewonnen doordat er minder downstream kosten voor de sliblijn zijn. Bovendien kan er meer biogas geproduceerd worden, wat zorgt voor een extra compensatie in de energiekosten van slibontsluiting. Dit rapport focust daarom op het in kaart brengen van de effecten van actieve hydrodynamische cavitatie op de sliblijn. Hierbij zal voornamelijk de haalbaarheid van de toepassing van VibroCav voor slibontsluiting worden onderzocht op basis van additionele methaanproductie en de ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib, waarbij rekening is gehouden met de energiekosten van de tool.

Naast het uitgebreide onderzoek naar het effect van de innovatieve VibroCavtool op de vergisting, is er ook een verkennend literatuuronderzoek gedaan naar eventuele andere toepassingen van deze tool voor water gerelateerde onderwerpen. Een korte samenvatting van andere toepassingsmethoden is opgenomen als Bijlage V.

1.3 Leeswijzer

Enkele definities van soorten slib worden toegelicht in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt achtergrond informatie over slibvergisting en slibontsluiting gegeven. Hoofdstuk 4 beschrijft de materialen en methodes gebruikt in deze studie, waarna in hoofdstuk 5 de resultaten hiervan beschreven worden. De conclusies worden in hoofdstuk 6 opgesomd, en tot slot wordt een vooruitblik gegeven in hoofdstuk 7

2 Begrippenlijst / Definities

Primair slib

Het primaire slib is afkomstig van de voorbezinktank.

Secundair slib

Secundair slib is het biologische slib dat wordt verwijderd uit een actiefslibinstallatie.

Spuislib

Het spuislib bestaat uit zowel primair als secundair slib, en wordt afgevoerd richting de vergister.

Uitgegist slib

Het slib dat de vergistingstank verlaat. Gezien dit een tank is met continue doorstroom, is niet al het slib volledig vergist. In deze sliblijn is dan ook nog veel vergistingsactiviteit waar te nemen. Uitgegistslib bevat zowel primair als secundair slib.

Droge stof (DS)

Droge stof gehalte, wordt ook wel eens Total Solids (TS), Dry Matter (DM) of Dry Weight (DW) genoemd. Het drogestofgehalte (DS) wordt bepaald door een monster te verhitten tot 105 °C om al het water te laten verdampen. Het gewicht dat na het verhitten overblijft is het drogestofgewicht. De DS wordt bepaald volgens een standaard methode (APHA, 1995)

Organische stof (OS)

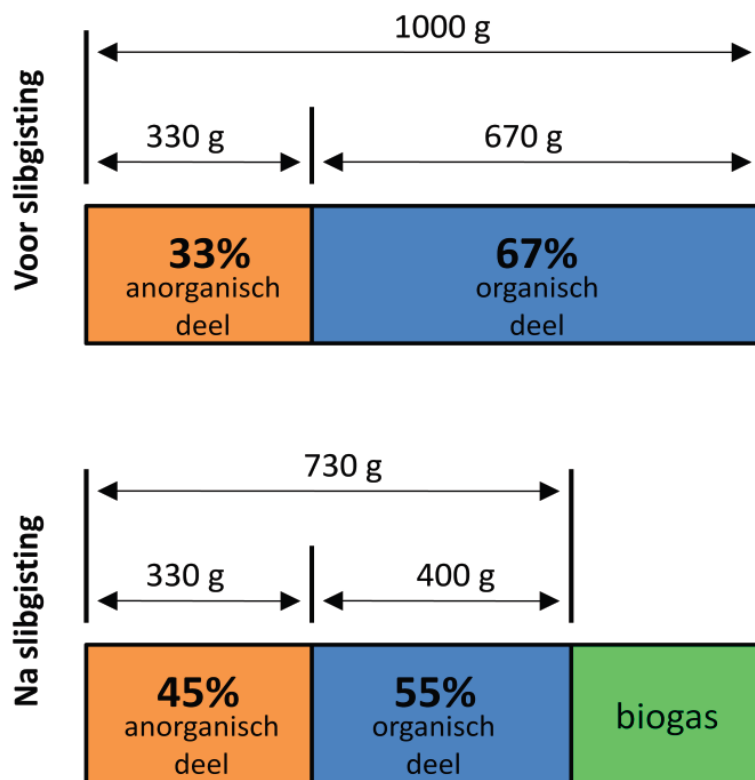
Het drogestofgewicht in slib bestaat uit een anorganisch en organisch gedeelte. Door na het verhitten tot 105°C een extra verhittingsstap tot 600 °C voor minimaal 45 minuten toe te passen, kan het organische stofgehalte worden bepaald (STOWA, 2011a). Bij 550-600 °C wordt het organische materiaal verbrand en blijft alleen het anorganische materiaal over. Met het verschil tussen het gewicht na verhitting tot 105°C en het gewicht na verhitting tot 550-600°C kan het organische stofgehalte bepaald worden. De Engelstalige parameter "Volatile Solids" (VS) en het begrip Organic Matter (OM) komen overeen met het op deze manier bepaalde organische stofgehalte. De OS wordt bepaald volgens een standaard methode (APHA, 1995)

3 Achtergrond slibontsluiting

3.1 Inleiding

De bewerking van het spuislib, bestaande uit zowel primair als secundair slib, dat geproduceerd wordt op een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) gaat gepaard met hoge kosten. De complete slibbehandeling van bijvoorbeeld Wetterskip Fryslân, kost 10 miljoen euro per jaar, wat overeenkomt met 25% van de totale kosten van de afvalwaterzuivering (Wetterskip Fryslân 2013). In het kader van de “energiefabriek” wordt veelal geprobeerd energie terug te winnen uit reststromen van de RWZI (energiefabriek.com), waaronder het spuislib.

Tijdens slibvergisting wordt het organische gedeelte in het slib omgezet in biogas. Het anorganische gedeelte blijft in absolute zin gelijk, zoals weergegeven in Figuur 3-1 (STOWA, 2011a). Na vergisting is nog niet al het organisch materiaal in biogas omgezet; in potentie betekent dit dat uit het restant organisch materiaal nog meer biogas geproduceerd kan worden

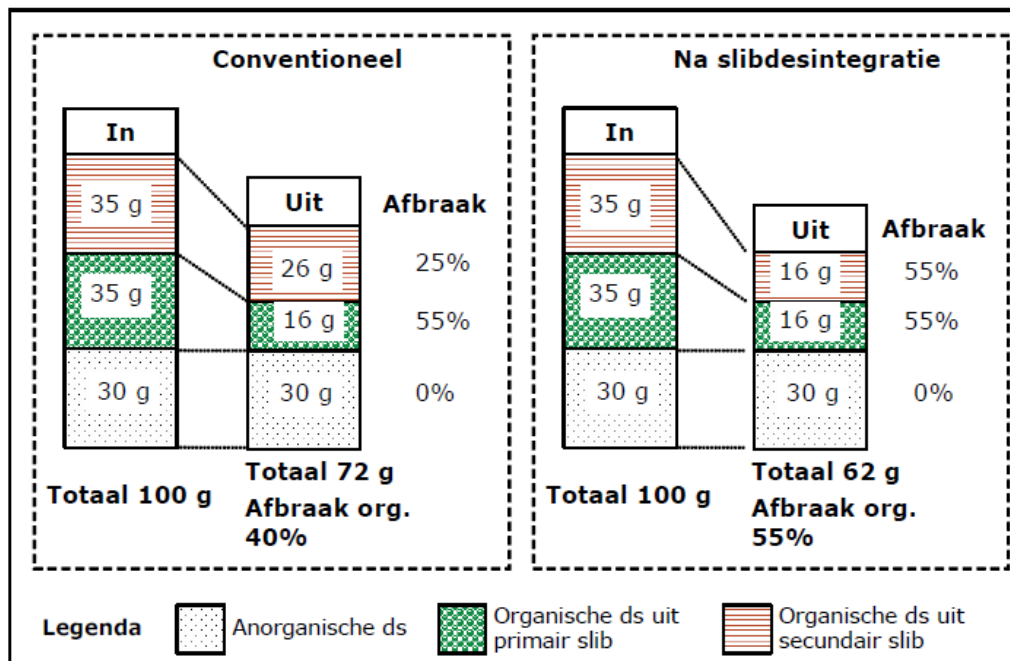


FIGUUR 3-1 OVERZICHT VAN DE SAMENSTELLING VAN SLIB VOOR EN NA VERGISTING (STOWA, 2011A).

De samenstelling, die weergegeven is in Figuur 3-1, is een theoretische samenstelling van slib. Elke RWZI kan een andere slibsamenvoeging hebben. De samenstelling van het slib wordt vaak weergegeven met de parameters drogestofgehalte en organische stofgehalte in massaprocenten.

3.2 Effecten slibontsluiting

Een methode om meer biogas uit de vergisting van slib te halen kan gevonden worden in toepassing van slibontsluitingstechnologieën (slibdesintegratie). Deze technologieën kunnen worden gebruikt om de kosten van (verdere) slibbehandeling te verminderen. Door een voorbehandeling van het geproduceerde spuislib, waarbij het organische materiaal dat aanwezig is in slib gemakkelijker afbreekbaar wordt gemaakt, kan het rendement (biogasproductie) van de vergisting worden verhoogd (Figuur 3-2). Daarnaast kunnen in potentie de kosten voor de ontwatering, opslag, transport en verbranding van uitgegist slib worden verlaagd, als een verbeterde slibontwatering kan worden gerealiseerd.



FIGUUR 3-2 HET EFFECT VAN SLIBONTSLUITING VAN SECUNDAIR SLIB OP HET ORGANISCHE STOFGEHALTE VAN SLIB TIJDENS VERGISTING (STOWA, 2005).

Eerdere onderzoeken tonen aan dat de energie input die nodig is voor de slibbehandeling lang niet altijd in balans is met de gecreëerde profijten bij de slibverwerking (Boehler and Siegrist 2006). Optimalisering van bestaande technologieën of ontwikkeling van innovatieve technieken, die de balans tussen energie input en opbrengsten verbeteren, is dan ook van groot belang.

Het ontsluiten van slib kan worden gedefinieerd als het kapot maken van slib (biologisch moeilijk afbreekbare cel- en vlokstructuren vernietigen) door externe krachten. Door ontsluiting wordt organisch materiaal omgezet in componenten met een lagere moleculaire massa, en wordt het beter biodegradeerbaar (Weemaes and Verstraete 1998).

Ontsluitingstechnieken kunnen zowel fysisch, chemisch als biologisch ingrijpen op het slib; hier wordt verder op in gegaan in hoofdstuk 3.4. Deze technieken hebben effect op de eigenschappen van het slib, en deze effecten kunnen worden opgedeeld in de volgende categorieën (Müller, Winter et al. 2004):

- Open breken van de vlokstructuur, en vervolgens de cellen,
- Het vrijkomen van opgelost materiaal,
- Het veranderen van de biochemische processen.

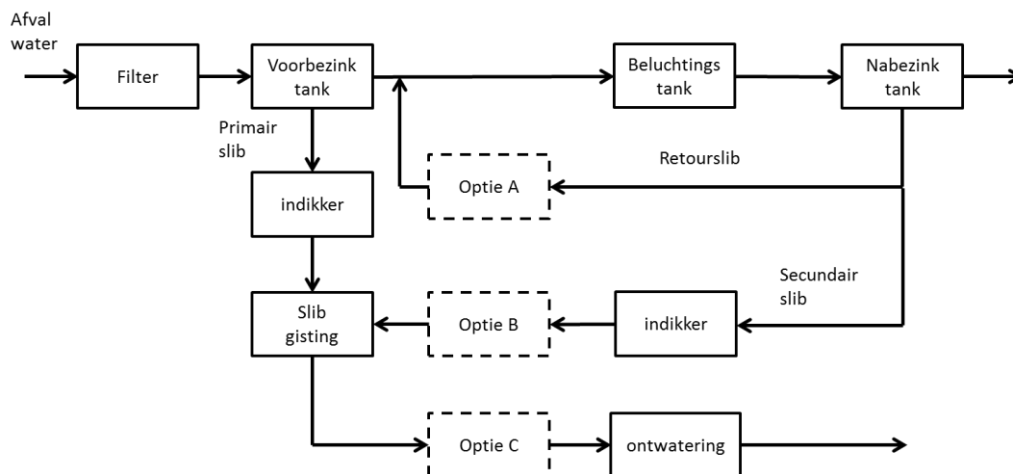
De volgende voordelen van slibontsluiting voor de afvalwaterzuivering zijn op full-scale bevestigd :

- Slibvolumereductie,
- Bestrijding van licht slib en schuimvorming,
- Verbetering van het ontwateringsrendement,
- Toename van biogasproductie.

Positieve effecten in de slibvolumereductie na slibontsluiting kunnen op twee manieren bereikt worden. Enerzijds kan het vergistingsrendement bij kortere verblijftijd behaald worden, anderzijds kan bij dezelfde verblijftijd een verdergaande afbraak van organisch materiaal worden gerealiseerd. Dit wordt met name bereikt door de bevordering van de hydrolyse, waarbij ontsluiting van celmateriaal een belangrijke factor is. Na slibontsluiting kan 10% meer slib omgezet worden dan wanneer dat niet wordt toegepast, met name door de verdere afbraak van organische droge stof uit het secundaire slib (STOWA 2005). Doordat de slibvlokken verder worden afgebroken wordt ook de ontwatering gestimuleerd. Dit is een gevolg van meer biologische afbraak, waardoor de anorganische materiaal fractie stijgt en het slib beter ontwaterbaar is (Müller, Winter et al. 2004). Ontsluiting breekt de (dradige) structuur van de vlokken af. Door het verder omzetten van organische stof, zal er meer biogas geproduceerd worden. Echter, de specifieke biogasproductie (volume biogas dat per verwijderde kg drogestof (of kg organische stof of kg CZV, ofwel de yield) wordt geproduceerd) zal niet toenemen door ontsluiting, omdat de biogasproductie één op één in relatie staat tot het extra vrijgekomen organisch materiaal (Nickel 2002).

3.3 Toepassing op RWZI

De ontsluiting van slib kan ingezet worden op meerdere locaties/sliblijnen in het RWZI concept en dient bij iedere locatie een ander doel. Optie A, zoals schematisch weergegeven in Figuur 3-3, dient met name voor het verbeteren van het denitrificatieproces. Door de ontsluiting van slib is er een verbeterde afbraak van organisch materiaal, waardoor meer koolstof-bron voor stikstofverwijdering beschikbaar is in de beluchtingstank (actieve slib tank) (STOWA 2005). Optie B beoogt een verbetering van de vergistbaarheid van het slib, terwijl optie C vooral bedoeld is voor een verbeterde ontwatering.



FIGUUR 3-3 EEN SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN SLIBSTROMEN EN DE MOGELIJKHEDEN OM SLIBONTSLUITING IN TE ZETTEN (GEBASEERD OP (BOEHLER AND SIEGRIST 2006)).

Doorgaans is er relatief veel energie nodig voor slibontsluitingstechnieken om de biogasproductie en ontwatering van de sliblijn te verbeteren. De energiebalans, en daarmee de kostenbalans, moet wel optimaal afgestemd zijn op de daadwerkelijke baten die gerealiseerd worden. Boehler and Siegrist (2006) beschreven destijds dat de technieken een te hoge energie input vereisen ten opzichte van de te realiseren verbetering in biogasproductie. Het is daarom nog steeds van belang om het onderzoek rondom slibontsluiting vooral te richten op het verbeteren van de biogasproductie en ontwatering in relatie tot de energie input. Actieve hydrodynamische cavitatie is een veelbelovende technologie (Bakker 2012), waarmee tegen een lagere energie input naar verwachting dezelfde effecten van slibontsluiting bereikt kunnen worden als bij passieve hydrodynamische cavitatie.

3.4 Overzicht slibontsluitingmethoden

Slibontsluitingmethoden kunnen worden opgesplitst in vier hoofdcategorieën:

- Fysisch: mechanisch
- Fysisch: thermisch
- Biologisch
- Chemisch

In Tabel 3-1 staan voorbeelden van slibontsluitingstechnologieën, gerangschikt naar categorie.

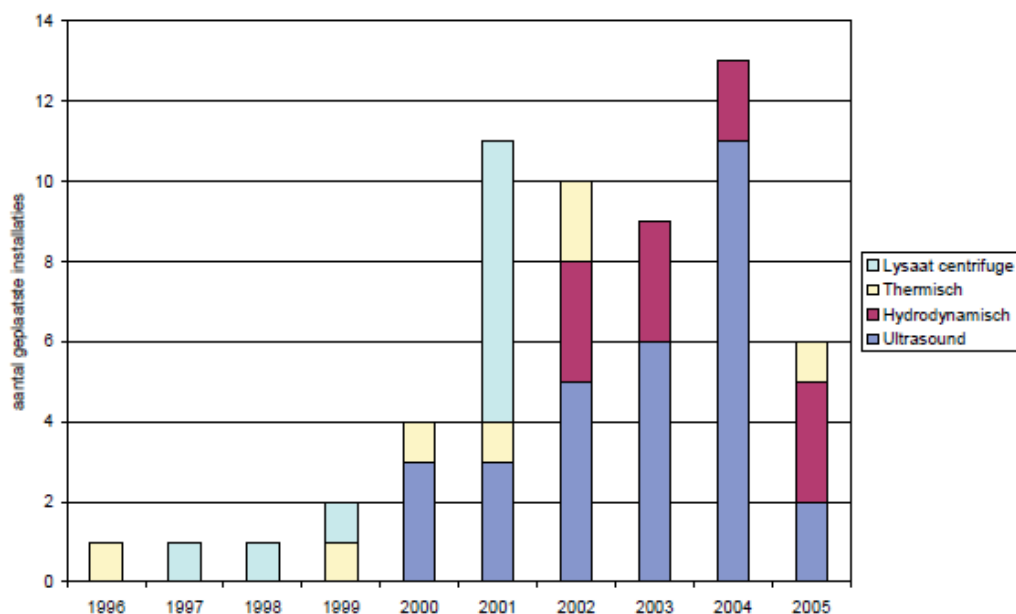
TABEL 3-1 VOORBEELDEN VAN MECHANISCHE, THERMISCHE, BIOLOGISCHE EN CHEMISCHE ONTSLUITINGSTECHNIEKEN (STOWA 2005).

Mechanisch	Thermisch	Biologisch	Chemisch
Ultrasoon geluid	Verwarmen	Enzymen	Ozon
Hydrodynamische cavitatie	Vriesdrogen	Schimmels	Zure hydrolyse
Vermalen		Wormen	Alkalische hydrolyse
Elektrische pulsen			Natte oxidatie
Lysaat centrifuge			
Botsing onder hoge snelheid			

De technieken beschikbaar voor secundaire slibbehandeling en gerealiseerd op full-scale zijn:

- ultrasoon geluid,
- hydrodynamische cavitatie (venturi-buis),
- lysaat centrifuge,
- verwarmen (thermische druk hydrolyse).

Met name hydrodynamische cavitatie en ultrasound winnen aan populariteit sinds 2000 (Figuur 3-4). In het onderzoek van STOWA (2005), dat deze technieken vergelijkt op basis van referenties, prestaties, bedrijfszekerheid en kostenniveau, worden ultrasoon geluid en hydrodynamische cavitatie als beste twee technieken voor de ontsluiting aangemerkt. Ondanks dat deze technologieën veelvuldig op full-scale worden toegepast, zijn er weinig data beschikbaar over de full-scale prestaties van de slibontsluiting. Thermische druk hydrolyse is niet meegenomen in de eerste onderzoeken van STOWA naar slibontsluiting, omdat deze technologie in 2005 nog niet werd toegepast voor slibontsluiting op full-scale. Er zijn wel latere rapporten beschikbaar waar informatie over de prestaties op full-scale zijn beschreven (STOWA 2011, STOWA 2012, Veldhoen, Wypkema et al. 2013).



FIGUUR 3-4 AANTAL GEREALISEERDE INSTALLATIES VOOR ONTSLUITING VAN SECUNDAIR SLIB VOOR VERGISTING (AANTALLEN IN 2005 ZIJN DE VERKOCHTE INSTALLATIES PER 31 JANUARI 2005) (STOWA 2005).

In deze literatuurstudie wordt onderzocht of het actieve hydrodynamische cavitatieproces, ingezet kan worden als nieuwe slibontsluitingstechniek. Daarvoor moet het resulteren in betere resultaten, zoals meer biogasproductie of minder energieverbruik, t.o.v. bestaande technologieën. Uit persoonlijke communicatie met Delfluent Services blijkt dat thermische druk hydrolyse (TDH) momenteel de voorkeur geniet als slibontsluitingstechnologie. Aangezien actieve hydrodynamische cavitatie dan zal moeten kunnen concurreren met thermische druk hydrolyse, is TDH in het volgende hoofdstuk nader toegelicht.

3.4.1 Thermische druk hydrolyse

Thermische druk hydrolyse is pas zeer recentelijk in opmars. De TDH is een voorbehandelingstechnologie die gebaseerd is op een hoge temperatuur (140-170 °C) en hoge druk (5-8 bar). In het kort doorloopt het proces de volgende stappen (STOWA 2012):

1. het slib wordt ingedikt,
2. het slib wordt voorverwarmd tot ~100°C,
3. er vindt batch-gewijs thermische hydrolyse plaats bij 165°C en ~7bar, met een verblijftijd van 20-30 minuten.

Er zijn verschillende leveranciers voor thermische slibontsluiting, bijvoorbeeld Cambi, Sustec en Veolia, elk met hun unieke operationele specificaties. Deze methoden beginnen met het indikken van slib tot een droge stof gehalte van 7-25%, voor respectievelijk Sustec en Veolia systemen (STOWA 2011). Daarna wordt het slib verwarmd en onder druk gebracht waardoor ontsluiting plaatsvindt. Door de slibontsluiting neemt het organische chemische zuurstof verbruik (CZV) in de waterfase toe met 13% en wordt de ontwatering verhoogd met ~10% (van 22-25% naar 30-35%) (STOWA 2011).

Een rekenvoorbeeld van STOWA (2012) geeft aan wat de opbrengst van thermische slibontsluiting kan zijn. Hiervoor is uitgegaan van een biogasproductie zonder een slibontsluitingbehandeling van 1,6 miljoen m³/jaar en wordt de biogasproductie met slibontsluitingbehandeling 1,9 miljoen m³/jaar op basis van pilotonderzoek. Dit is een toename in biogasproductie van ongeveer 20% (STOWA 2012). Deze toename blijkt zeer sterk afhankelijk van het type slib dat is gebruikt.

De resultaten van STOWA (2012) komen overeen met de full-scale uitvoering zoals beschreven door Ringoot, Reitsma et al. (2014) waar 28% meer biogas werd geproduceerd door toepassing van thermische slibontsluiting (7.000 versus 9.000 m³/dag). Deze slibontsluitingstechniek gebruikte 134 kWh/m³ aan energie, wat neerkomt op 2,4 kWh per kg droge stof (STOWA 2012).

Uit de gegevens, samengevat in Tabel 3-2, blijkt dat de energieconsumptie van de voorbehandeling 2,5 kWh/kg DS is. Uit dezelfde gegevens is er een indicatieve prijs voor TDH beschikbaar. Met een capaciteitsbasis van 20.000 kg DS/dag zijn de investeringskosten ongeveer €1.700.000,-. De prijsindicatie voor een andere capaciteit kan met deze gegevens worden geschat wanneer het effect van schaalgrootte in acht genomen wordt.

Na behandeling met TDH en vergisting is de reductie van organische stof van secundair en primair slib respectievelijk 50 en 44%. Wanneer alleen vergisting wordt toegepast, is er sprake van een organische stof reductie van 50 en 27% voor respectievelijk primair en secundair slib. Thermische druk hydrolyse is dus verantwoordelijk voor 17% aan extra organische stofreductie van het secundaire slib, en heeft geen additioneel effect op organische stofreductie in het primaire slib.

TABEL 3-2 SAMENVATTING RESULTATEN VAN THERMISCHE DRUK HYDROLYSE OP FULL-SCALE TER REFERENTIE VOOR DE RESULTATEN DIE MET ACTIEVE HYDRODYNAMISCHE CAVITATIE GEHAALD WORDEN. (INFORMATIE KOMT VAN STOWA, 2012).

Parameters ter beoordeling	Thermische druk hydrolyse
Toename biogasproductie t.o.v. geen inzet van slibontsluitingstechnologie	20%
Prijs installatie (capaciteit 20.000 kg DS/dag)	1.700.000 €
Energiekosten	2.4 – 2.5 kWh/kg DS

3.4.2 Actieve hydrodynamische cavitatie

VibroCav wordt beschreven in patent Ivannikov and Ivannikov 2004, als een instrument wat beschikt over een hydrodynamisch zelfvibrerend element-in-buis, dat de cavitatie versterkt. Door de vloeistofstroming botst het element (een bal) in de buis met de buiswand, wat een wisselende stroming rond het element veroorzaakt, die gepaard gaat met een actief waterslag effect dat de vibratie en cavitatie versterkt. Door dit vibrerende element (bal) kan er effectieve cavitatie opgewekt worden met lagere stroomsnelheden en hogere tegendrukken dan in instrumenten gebaseerd op passieve cavitatie. De hoge tegendrukken resulteren in het ineenstorten van cavitatiebellen met uitzonderlijk sterke effecten tot gevolg. Deze technologie heeft als voordeel dat de energiekosten in vergelijking met passieve cavitatie significant lager zijn, maar gelijke of zelfs betere effecten op het slib verwacht worden. Dit instrument is uitgebreid beschreven in het proefschrift van Bakker (2012).

4 Materiaal en methoden

4.1 Proof of concept analyse

Het test circuit (Figuur 4-1), dat beschreven is in het proefschrift van Bakker, 2012 kan in water (of wat betreft de viscositeit vergelijkbare vloeistoffen) zeer goed actieve hydrodynamische cavitatie genereren, maar dient aangepast te worden om dit ook succesvol te kunnen doen in het viskeuze secundaire slib. Er is besloten om eerst een “proof of concept” uit te voeren, alvorens grote investeringen te doen in een pilot opstelling waarin secundair slib behandeld kan worden met actieve hydrodynamische cavitatie. Dit “proof of concept” diende twee doelen: enerzijds onderzoeken of cavitatie de vergisting verbetert (versnelde of verhoogde methaanproductie), en anderzijds het in kaart brengen van kritische design aspecten om de pilot zo goed mogelijk te ontwerpen. Hiervoor zijn monsters genomen na verschillende malen recirculeren van het slib door de VibroCavtool.

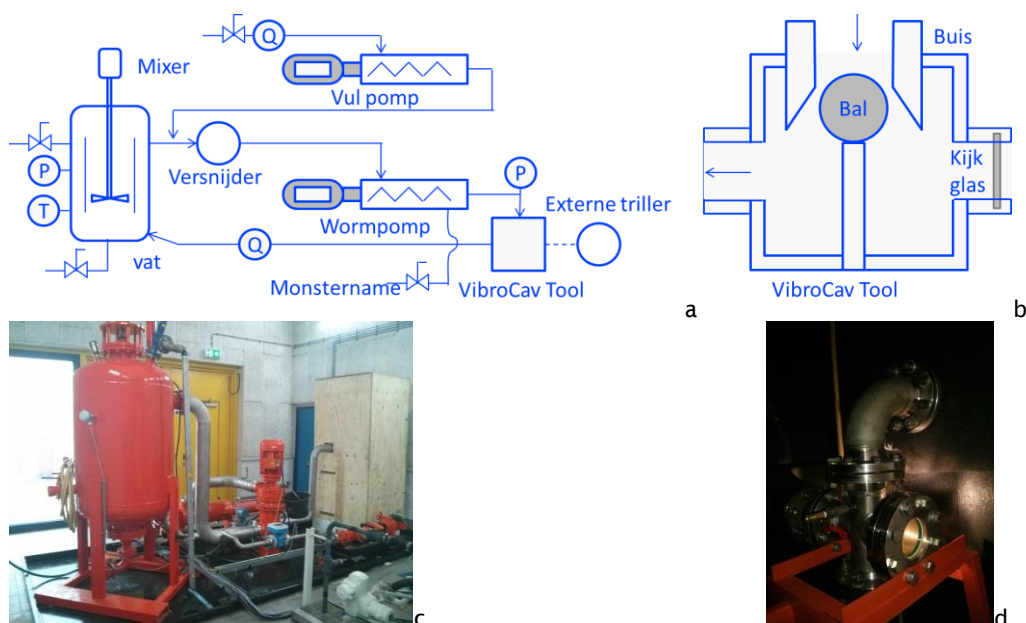


FIGUUR 4-1 FOTO VAN DE PROOF OF CONCEPT TEST CIRCUIT.

Voor deze test is gebruik gemaakt van uitgegist slib, zodat de additionele methaanproductie goed bepaald kon worden. Er is dan namelijk sprake van minder methaanproductie vanuit het inoculum, waardoor een verschil in methaanproductie als gevolg van behandeling met de tool eerder significant beschouwd kan worden. Het effect op methaanproductie is geanalyseerd door middel van de AMPTS II, die beschreven is in hoofdstuk 4.3. Door de beperkingen ten aanzien van de flow bij de genereren drukval in het bestaande test circuit was het niet mogelijk om actieve cavitatie te creëren met een voldoende ruimte (gap) tussen de bal en de buis om met de deeltjes die in uitgegist slib zitten te werken. In plaats hiervan is getest met een venturibuis (passieve cavitatie). Passieve cavitatie kost meer energie dan actieve cavitatie, maar genereert in principe dezelfde imploderende bellen, en kan zodoende toch inzicht geven in het effect van cavitatie. Om verstoppingen van slib in de vernauwing van de venturibuis te voorkomen is het uitgegiste slib gezeefd (4 mm maaswijdte). Deze leerpunten van de proof of concept zijn meegenomen in het ontwerp van de pilot. Zowel het bedrijven van het test circuit als de AMPTSII analyses (van de proof of concept) zijn uitgevoerd door WhirlWindi.

4.2 Pilot

Na een veelbelovende proof of concept test heeft WhirlWindi een nieuwe pilot ontworpen (Figuur 4-2). Deze gesloten full-scale pilot-opstelling is ontworpen met een totaal volume van 1,1 m³. Met een wormpomp kan een drukval over de tool worden gehandhaafd van maximaal 25 bar. Die drukval is groot genoeg is om zelfs bij een tegendruk van 10 bar in het vat achter de tool een stroomsnelheid in de tool te creëren waarbij cavitatie achter de bal ontstaat. Naast de opstelling is er ook een kleine vul pomp geplaatst, zodat de opstelling kan worden gevuld met onbehandeld (visceus) slib. Indien nodig, kan het onbehandelde slib door een versnijder geleid worden. Deze verkleint de deeltjes (<5mm) zodat verstopping van de opstelling voorkomen kan worden. Bovendien zorgt de versnijder er ook voor dat het onbehandelde slib wordt gemengd met het recirculerende slib (dat dus al deels behandeld is). Het recirculerende slib heeft dan inmiddels een lagere viscositeit. De VibroCavtool zal ingeval van een vibrerende bal geluid genereren. Ook cavitatie genereert geluidsgolven in het ultrasonische gebied. Om eventuele overlast te voorkomen is de tool in een geluiddempende kast geplaatst. Bij het ontwerp van de VibroCavtool is rekening gehouden met de mogelijkheid om de tool zowel op full-scale toe te passen, als om hem in te zetten voor verdiepend onderzoek. Om verdiepend onderzoek te kunnen doen zijn extra functies toegevoegd, zoals verlichting en een kijkraampje (Figuur 4-2b) om de cavitatie visueel te kunnen beoordelen; in de praktijk is dit alleen mogelijk indien een heldere vloeistof, zoals water, wordt gebruikt. Momenteel kan de pilot alleen gevuld worden met secundair slib met een maximale DS van 4%. Dit kan in de toekomst verhoogd worden door een krachtiger vulpomp te installeren.



FIGUUR 4-2 SCHEMA EN FOTOS VAN DE VIBROCAV PILOT EN TOOL OP RWZI HOUTRUST

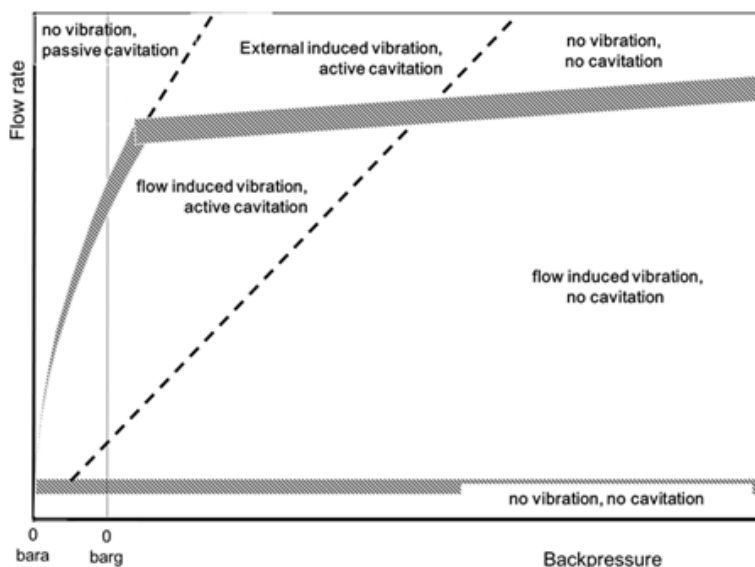
Daarnaast is bij het ontwerp van de tool rekening gehouden met de wens om verschillende instellingen te kunnen gebruiken. Een lijst hiervan is weergegeven in Tabel 4-1. Hierdoor is het mogelijk om de vibrocavitatie in de tool vergaand te optimaliseren, zodat er maximale slibontsluiting bereikt kan worden. Voordat echter naar een optimalisatie kon worden gestreefd moest eerst het werkgebied worden vastgesteld waarbinnen actieve cavitatie optrad. Daartoe zijn secundair slibmonsters met een VibroCavtool voorbehandeld onder geselecteerde instellingen van de tool. De experimenten met de tool zijn uitgevoerd door

WhirlWindi op RWZI Houtrust, de beoordeling van het effect van deze instellingen op de methaan productie (met de AMPTSII) is uitgevoerd door KWR.

Tabel 4-1 Een lijst met parameters die ingesteld kunnen worden voor de nieuwe Vibrocavtool die gebruikt zijn in dit onderzoek.

Debiet in de tool
Recirculatie
Bal diameter
Ruimte tussen de bal en de wand (de "gap maat")
Druk in het vat, ofwel tegendruk aan de uitstroomzijde van de buis
Externe triller (aan/uit), om trilling van de bal te garanderen
Versnijder (aan/uit), om het secundaire slib te verkleinen en te mengen met het gerecirculeerde slib.

In eerste instantie is het effect van de parameters tegendruk en flow op het ontstaan van cavitatie uitgebreid onderzocht. In eerder onderzoek met het proof of principle testcircuit is aangetoond dat er in water een nauw samenspel is tussen deze parameters om actieve hydrodynamische cavitatie te genereren. Het is dan ook zaak om de juiste stroomsnelheid te kiezen voor het opwekken van actieve cavitatie in secundair slib. Het werkgebied waarbij actieve cavitatie optreedt in de pilot opstelling in RWZI Houtrust is eerst visueel vastgesteld voor water. Het verschil tussen slib en water is echter niet alleen dat slib deeltjes bevat, maar ook dat het een hogere viscositeit heeft dan water. Het werkgebied waarin actieve cavitatie plaatsvindt kan daardoor voor slibmonsters verschoven zijn ten opzichte van het werkgebied voor water. Er zijn verschillende instellingen geprobeerd, om het werkgebied voor actieve cavitatie op secundair slib vast te stellen. Of er in dat geval cavitatie was opgetreden en in welke mate, waarbij wordt aangenomen dat cavitatie leidt tot verbeterde methaanproductie, kon alleen achteraf worden vastgesteld door het meten van de bijbehorende methaanproductie met AMPTS II.



FIGUUR 4-3 HET EFFECT VAN TEGENDRUK EN FLOWRATE OP HET BEHALEN VAN ACTIEVE HYDRODYNAMISCHE CAVITATIE (BAKKER, 2012).

De pilot is ook getest op de mogelijke aanwezigheid van dode zones. Het experiment waarbij water door de tool werd gecirculeerd waarin lokaal een kleurstof is geïnjecteerd, liet zien dat de kleurstof snel en goed mengt met het water. De verwachting is dat een representatief resultaat is voor een situatie waarbij secundair slib door de tool gerecirculeerd wordt. In de tool worden dus geen dode zones verwacht.

4.2.1 Toolinstellingen

Door het grote aantal mogelijkheden wat betreft de instelbare parameters die van invloed zijn op de stroomsnelheid, zie Tabel 4-1, is het lastig om de instellingen voor een monster beknopt te beschrijven. Bij de hier uitgevoerde batch-proeven kan bovendien de duur van de behandeling worden gevarieerd door het aantal recirculaties van de stroom door de tool aan te passen. Er is daarom gekozen om de monsterbenaming te vereenvoudigen naar een letter referentie, zie Tabel 4-2.

Om de proeven onderling te kunnen vergelijken, was het gewenst om hetzelfde slib als uitgangsmateriaal te gebruiken voor zoveel mogelijk testen. De monsters die gelijktijdig zijn ingezet in de AMPTS II zijn op dezelfde dag behandeld in de vibrocavtool en met hetzelfde slib als start. Bij dit onderzoek is de VibroCavtool batchgewijs gevuld. Dit bleek veel tijd in beslag te nemen en daardoor konden niet meer dan drie monsters per dag gegenereerd en geanalyseerd worden. Daarom is besloten om drie verschillende instellingen in serie toe te passen. Eerst werd de opstelling gevuld en bemonsterd (blanco), vervolgens werd instelling A toegepast en bemonsterd (monster A). Het slib dat eerst behandeling "A", heeft ondergaan, wordt vervolgens behandeld met instelling B en weer bemonsterd (B). Monster B heeft dan ook zowel de behandeling van A als van B ondergaan. Als instelling A niet tot cavitatie leidt dan is monster A in feite hetzelfde als de blanco. De volgorde van instellingen is altijd zo geweest dat instelling B een grotere kans heeft op (meer) cavitatie dan instelling A. Wanneer er (ook) cavitatie plaat vind bij instellingen "B" dan is monster B dus extra behandeld ten opzichte van monster A. Het is dan ook de verwachting dat monster B in een gelijk of groter effect resulteert dan monster A. Het kan wel zijn dat, indien er bij de instelling "A" sprake is van maximale cavitatie, het effect van cavitatie die dan mogelijk bij optie B heeft plaatsgevonden niet zichtbaar is in additionele methaanproductie. Het verschil is dan alleen dat B een extra aantal recycles door de Vibrocavtool is gegaan (hogere recirculatie) en dus een langere tijd met cavitatie is voorbehandeld. De instellingen van de monsters zijn samengevat in Tabel 4-2. Om inzichtelijk te maken welke monsters in serie op één dag hebben plaatsgevonden zijn de series om en om in zwart of in grijs genoteerd, waarbij elke kleur een serie vertegenwoordigt.

TABEL 4-2 EEN SAMENVATTING VAN DE TOOLINSTELLINGEN DIE IN DE PILOT GETEST ZIJN.

	P vat gemiddeld barg	P wormpomp gemiddeld barg	Delta P gemiddeld bar	T vat gemiddeld C	Q tool gemiddeld m ³ /hr	Trilmotor - ON/OFF	Recirculatie instelling	Recirculatie totaal	Bal diameter mm	Gap max mm	Energie kWh	Energie/m ³ slib' gemiddeld kW/m ³ slib
Monster A	2,5	5,7	3,2	21,7	30,3	OFF	2,9	2,9	30	3,3	4,6	0,4
Monster B	2,4	5,4	3,0	21,9	30,3	OFF	2,5	5,5	30	3,3	4,5	0,4
Monster C	2,7	11,8	9,0	19,2	28,8	ON	3,2	3,2	30	2,5	7,2	0,8
Monster D	2,6	10,2	7,6	19,5	26,6	ON	2,2	5,4	30	2,5	5,9	0,5
Monster E	1,9	8,7	6,8	18,9	26,3	ON	2,9	2,9	30	2,5	9,0	1,0
Monster F	1,8	10,6	8,8	19,5	30,5	ON	3,0	5,9	30	2,5	10,5	1,0
Monster G	3,3	11,0	7,6	19,8	25,6	OFF	2,8	2,8	30	2,5	9,9	1,1
Monster H	2,3	6,9	4,6	18,7	18,6	ON	3,1	3,1	30	2,5	6,3	1,1
Monster I	2,4	7,8	5,4	18,9	21,1	ON	2,9	6,0	30	2,5	7,9	1,1
Monster J	2,6	7,3	4,8	19,3	21,1	ON	2,9	9,0	30	2,5	7,8	1,1
Monster K	1,6	10,6	9,1	19,9	28,8	ON	4,0	4,0	30	2,5	10,0	1,4
Monster L	2,1	9,3	7,3	20,1	26,9	ON	3,7	3,7	30	2,5	8,9	1,2
Monster M	3,6	3,9	0,2	19,3	25,1	ON	3,5	3,5	27,5	6,50	6,7	0,9
Monster N	4,1	10,5	6,5	19,6	22,4	ON	3,1	6,6	30	2,5	8,7	1,2
Monster O	3,0	8,8	5,8	20,0	22,5	ON	3,1	9,7	30	2,5	8,3	1,2
Monster P	3,6	11,6	8,0	20,3	26,4	ON	3,7	3,7	30	2,5	9,8	1,4
Monster Q	2,6	9,8	7,2	20,8	26,3	ON	3,7	3,7	30	2,5	9,4	1,3
Monster R	2,1	9,3	7,2	21,7	27,5	ON	3,8	3,8	30	2,5	8,9	0,0
Monster S	2,6	7,5	4,8	22,4	18,3	ON	3,3	3,3	30	2,5	7,9	1,4
Monster T	2,3	9,1	6,8	23,0	26,5	ON	3,7	7,0	30	2,5	9,7	1,3
Monster U	2,9	8,3	5,4	25,1	20,4	ON	3,4	3,4	30	2,5	8,2	1,4
Monster V	2,4	7,6	5,2	26,0	20,9	ON	3,5	6,9	30	2,5	8,2	1,4
Monster W	2,3	8,3	6,0	26,9	23,4	ON	3,9	10,8	30	2,5	8,8	1,5

	P Vat gemiddeld barg	P wormpomp gemiddeld barg	Delta P gemiddeld bar	T vat gemiddeld C	Q tool gemiddeld m ³ /hr	Trilmotor - ON/OFF	Recirculatie instelling	Recirculatie totaal	Bal diameter mm	Gap max mm	Energie kWh	Energie/m ³ slib gemiddeld kW/m ³ _slib
Monster X	3,7	9,6	5,9	26,8	18,3	ON	3,6	3,6	30	2,5	8,3	1,6
	3,9	11,7	7,8	27,7	23,6	ON	3,6	7,2	30	2,5	9,6	1,5
	4,0	13,9	9,9	28,5	29,7	ON	4,1	11,3	30	2,5	11,4	1,6
Monster Y	2,9	7,4	4,5	29,6	17,9	ON	3,6	14,9	30	2,5	7,8	1,6
	3,0	9,5	6,6	30,4	24,7	ON	3,8	18,7	30	2,5	9,3	1,4
	3,0	11,3	8,3	31,1	29,9	ON	3,7	22,4	30	2,5	10,7	1,3
Monster Z ¹	2,0	5,5	3,5	32,0	17,9	ON	3,6	26,1	30	2,5	7,5	1,5
	1,9	7,2	5,3	32,7	25,2	ON	3,9	29,9	30	2,5	8,5	1,3
	2,0	8,8	6,9	33,3	33,3	ON	4,2	34,1	30	2,5	9,8	1,2
Monster 2A	4,1	13,7	9,6	25,7	23,0	OFF	3,3	3,3	venturi	11	11,3	1,3
Monster 2B	3,0	12,5	9,5	26,6	30,0	OFF	3,0	6,3	venturi	11	11,2	1,1
Monster 2C	2,2	12,0	9,8	27,4	29,9	OFF	3,3	9,7	venturi	11	11,2	1,3
Monster 2D	4,6	12,9	8,2	21,7	17,9	ON	3,3	3,3	30	2,3	9,1	1,7
Monster 2E	3,0	13,0	10,0	22,7	23,3	ON	3,6	6,9	30	2,3	10,5	1,6
Monster 2F	2,0	16,6	14,6	23,6	28,3	ON	3,5	10,4	30	2,3	13,6	1,7
Monster 2G	4,2	8,2	4,1	22,3	18,8	ON	3,5	3,5	30	2,7	8,1	1,5
Monster 2H	3,7	8,8	5,1	23,7	24,3	ON	3,7	7,2	30	2,7	9,0	1,4
Monster 2I	2,1	6,9	4,7	24,7	30,4	ON	3,8	11,0	30	2,7	9,5	1,2

¹ Er zijn eerst drie verschillende instellingen toegepast bij de behandeling van het eerste monster (X), en vervolgens drie nieuwe instellingen in serie voor monster (Y), en hetzelfde voor monster (Z).

4.3 Vergisting (AMPTS II)

4.3.1 Meting van methaan- of biogasproductie met AMPTS II

Het vergelijken van de efficiëntie van de vergisting van het gecaviteerde slib met die van het ongecaviteerde slib (blanco) is gedaan met resultaten van de Automatic Methane Potential Test System (AMPTS) II van Bioprocess Control (Lund, Zweden) (<http://www.bioprocesscontrol.com/products/ampts-ii/>). Met dit apparaat kan de productie van methaan of de productie van het totale biogas gemeten worden. De AMPTS II analyses van de pilotmonsters zijn uitgevoerd door KWR, tenzij anders aangegeven in Tabel 5-1.

De AMPTS II bestaat uit drie verschillende onderdelen (zie Figuur 4-4). Het eerste onderdeel (*sample incubation unit*) is een waterbad waarin 15 reactoren geplaatst kunnen worden. Hierin vindt de vergisting plaats en wordt biogas geproduceerd. Dit biogas wordt vervolgens naar het tweede deel (*CO₂-fixing unit*) gebracht waar verschillende zure gassen (zoals CO₂ en H₂S) zullen worden afgevangen door NaOH en er alleen methaan overblijft. Dit wordt dan naar het laatste deel (*gas volume measuring device*) gebracht waar de meting van de productie plaatsvindt.

Indien gewenst kan in plaats van de methaanproductie ook de totale biogasproductie gemeten worden door het eerste onderdeel direct aan het laatste onderdeel te koppelen. Hierdoor wordt de *CO₂-fixing unit* overgeslagen en blijft al het geproduceerde gas in het systeem.



FIGUUR 4-4 DE DRIE ONDERDELEN VAN DE AMPTS II WAARMEE DE METHAANPRODUCTIE GEMETEN WORDT (BIOPROCESS CONTROL, 2014) . LINKS: INCUBATION UNIT. MIDDEN: CO₂-FIXING UNIT. RECHTS: GAS VOLUME MEASURING DEVICE

Het laatste onderdeel van de AMPTS II is gekoppeld aan het netwerk, waardoor online met de bijgeleverde software weergegeven kan worden hoeveel methaan of biogas geproduceerd is en met welke snelheid.

Het uitgebreide protocol, dat is gevolgd in dit onderzoek, is beschreven in Bijlage I. In dit protocol is een andere verhouding van inoculum (uitgegist slib) en substraat (monster) ingezet dan geadviseerd wordt door Bioprocess Control. Er is voor gekozen om een zo'n groot mogelijk volume substraat in te zetten, zodat het effect van cavitatie als significant beschouwd zou kunnen worden. De optimalisatie van deze keuzes is beschreven in Bijlage II. Ook is er regelmatig voor gekozen om een verkorte test uit te voeren (duur: 1 week in plaats van 30 dagen); deze diende dan als quick-scan om het effect van actieve hydrodynamische cavitatie op de vergisting van het slib snel te bepalen en zodoende het werkgebied van cavitatie in secundair slib snel te verkennen.

De organische stof (OS) en droge stof (DS) bepaling is uitgevoerd zoals beschreven in het boek "Standard methods for the examination of water and wastewater" (APHA 1995).

4.3.2 Berekeningen van methaan- en biogasproductie

Uit de verkregen data kunnen de gegevens zoals weergegeven in Tabel 4-3 bepaald worden.

TABEL 4-3 BELANGRIJKSTE GEGEVENS VAN DE DATA VAN AMPTS II METINGEN.

Gegevens	Eenheid	Omschrijving
$CH_{4,\#}/OS_{\#}$	mL/g	relatieve methaanproductie per gram OS monster toegevoegd
$CH_{4,r}$	mL	methaanproductie in reactor vat met monster inoculum
$CH_{4,inoc}$	mL	methaanproductie in reactor vat met inoculum
OS_r	g	OS hoeveelheid in reactor vat met monster en inoculum
OS_{inoc}	g	OS hoeveelheid in reactor vat met inoculum

In combinatie met het gemeten OS gehalte, kan de methaanproductie per g OS (representatief voor biomassa) bepaald worden. Hierbij is het van belang dat de methaanproductie van het gecaviteerde of ongecaviteerde slib onderscheiden wordt van de methaanproductie van het inoculum (uitgegist slib) om een duidelijk beeld van het effect van cavitatie te verkrijgen. De methaanproductie per gram OS is bepaald met behulp van onderstaande formule:

$$CH_{4,\#}/OS_{\#} = (CH_{4,r} - CH_{4,inoc}) / (OS_r - OS_{inoc})$$

Opgemerkt zij dat deze getallen sterk beïnvloed worden door de tijdsduur die gekozen wordt. Een vergisting duurt doorgaans ongeveer 30 dagen, en eigenlijk zouden de getallen ook op basis van productie na 30 dagen genomen moeten worden. Echter, gedurende de quick-scan analyses is ervoor gekozen om na één week de bepaling te doen om zodoende een snelle indicatie te krijgen of de methaanproductie is verbeterd (en of er dus cavitatie plaatsvond).

Wanneer een methaanproductiesnelheid berekend wordt ($mLCH_4 \cdot g \text{ OS}^{-1} \cdot \text{uur}^{-1}$), is dit per definitie over de eerste 80 uur van de test.

Indien de totale biogasproductie ook gemeten is naast de methaanproductie kan het percentage methaan in het biogas berekend worden.

4.4 Ontwaterbaarheid

De ontwaterbaarheid van het behandelde slib en onbehandelde slib is getest met een methode die Delfluent zelf gebruikt op de RWZI. Hiervoor wordt polymeer, Zetag 8185 van Brenntag, toegevoegd om grotere vlokken te vormen waardoor het slib beter ontwaterd kan worden. Op een monster van 200 mL slib wordt 25 mL polymeeroplossing (3,9 g/L) toegevoegd, waarna circa 30 seconden gemengd wordt bij een roersnelheid van 300 RPM. Het geheel wordt vervolgens in een filterzak overgeheveld om uit te lekken alvorens het in de labcentrifuge wordt gedaan. Hierbij moet ervoor gezorgd worden dat er ruimte tussen de filterzak en de bodem van de centrifugebuis zit, zodat het centraat niet terug de filterzak in gaat. Het monster wordt gedurende 30 minuten gecentrifugeerd bij 4500 RPM. Van de slibkoek worden het drogestof gehalte (DS, minimaal 6h drogen bij 100-105°C en vervolgens het OS (minimaal 2h gloeien bij 550 °C) gehalte bepaald.

5 Resultaten en Discussie

5.1 Proof of concept me uitgegist slib

Het proof of concept is uitgevoerd in het bestaande testcircuit met een venturibuis. Bij gebruik van de Vibrocav in dit circuit zou de gap naast de bal voldoende groot moeten zijn om de deeltjes in het uitgegiste slib te laten passeren. De pomp in het bestaande test circuit was echter niet krachtig genoeg om voldoende slib te verpompen om onder deze condities actieve cavitatie op te wekken. Daarom werd besloten om te kiezen voor een grotere gap van 5 mm in een venturibuis. Bovendien werd ter voorkoming van verstoppingen het slib gezeefd over een 4 mm zeef. Het bewijs of een voorbehandeling met cavitatie leidt tot een verhoogde methaan productie wordt hierdoor niet beïnvloed,

Gedurende de proof of concept zijn er monsters genomen na verschillende doorlooptijden (recycles) van behandeling. Tabel 5-1 toont de gekozen instellingen en laat zien dat voor elk gecaviteerde monster de methaanproductie toeneemt met de recirculatie. In deze series werd 19-85% extra methaan geproduceerd als gevolg van cavitatie. Deze resultaten laten zien dat dat meer recirculatie leidt tot een hoger methaanproductie. Een uitzondering hiervan is de laagste recirculatie (50x) bij serie 2. Het was in het algemeen dusdanig positief, dat is overgegaan tot de bouw van de grote pilot die op RWZI Houtrust is geplaatst. De ervaringen die zijn opgedaan bij deze proof of concept test zijn meegenomen in het ontwerp van de pilot, zoals beschreven in 4.2.

TABEL 5-1 OVERZICHT VAN DE VERGISTINGSRESULTATEN VAN DE VERSCHILLENDE GECAVITEERDE SLIBMONSTERS.

Monster	Q tool (m ³ /h)	P vat (Bar)	Recirculatie	Verschil CH ₄ productie blanco en monster (%)	Vergistingsduur (dagen)
Serie 1	6.2	8.0	50	29	11
Serie 1	6.2	8.1	100	69	11
Serie 1	6.3	8.3	150	71	11
Serie 2	6.2	8.2	50	29	22
Serie 2	6.1	8.4	75	19	22
Serie 2	6.1	8.4	100	24	22
Serie 3	6.4	8.5	50	25	12
Serie 3	6.1	8.7	75	37	12
Serie 3	6.1	8.5	100	52	12
Serie 4	5.1	2.8	50	28	11
Serie 4	5.0	2.9	75	69	11
Serie 4	4.9	2.9	100	85	11

5.2 Vergisting van behandeld secundair slib in de pilot

De verschillende behandelde monsters (zoals beschreven in §4.2.1) zijn getest op hun methaanproductie met de AMPTS II, om zodoende het werkgebied van actieve hydrodynamische cavitatie van de VibroCavtool vast te stellen. De metingen zijn in triplo uitgevoerd. Een overzicht van de gemiddelde verandering in methaanproductie van het monster is weergegeven in Tabel 5-2. Hierbij is de productie van het behandelde monster

gedurende het experiment vergeleken met de productie van het blanco monster. Monsters X, Y en Z zijn bij KWR en bij Delfluent elk in triplo ingezet en gemeten, en gaven vergelijkbare resultaten. De monsters, die in één serie zijn gemeten, zijn om en om grijs en zwart afgebeeld zoals ook in Tabel 4-2. De behandelde monsters die minder produceerden dan de blanco's zijn cursief weergegeven in de tabel. Daarnaast is het best behaalde resultaat onderstreept. Hierbij moet rekening gehouden worden met de tijdsduur van de experimenten zoals vermeldt in Tabel 5-2.

Tegen verwachting in ligt de methaanproductie van sommige gecaviteerde monsters lager dan de blanco. Bovendien werd verwacht dat een monster, dat drie keer in één serie is behandeld en dus waarschijnlijk meer cavitatie heeft ondergaan, gelijke of hogere methaanproductie te zien geeft dan een monster dat twee keer is behandeld in dezelfde serie (zie toelichting in hoofdstuk 4.2). Dit bleek echter niet altijd het geval te zijn. Ook leverde dezelfde toolinstellingen niet altijd dezelfde vergistingsresultaten op. Dit bleek later het gevolg te zijn van een beschadiging van de tool. De tool kon spoedig hersteld worden, waarna de verkenning van het werkgebied werd hervat. Andere oorzaken voor spreiding in vergistingsresultaten kunnen zijn:

- Onnauwkeurigheid in OS bepaling; deze heeft een groot effect op de meting,
- De AMPTSII kent een onnauwkeurigheidsmarge van ongeveer 2-3%,
- Monsternamen uit tool. Het slib zou niet goed gemengd kunnen zijn. Dit bepaalt in sterke mate de verhouding van behandeld/onbehandeld slib, misschien als gevolg van de aanwezigheid van dode zones.

Uit het overzicht van Tabel 5-2 blijkt dat er afwijkende resultaten in methaanproductie worden behaald bij verschillende instellingen; de spreiding is meer dan 20% (absoluut). Bij de ene instellingen werd er kennelijk wel gewerkt binnen het juiste werkgebied en bij andere instellingen niet. Deze resultaten geven dan ook een goede eerste indicatie van het juiste werkgebied voor het behandelen van secundair slib. Deze data laat zien dat met de juiste instellingen een verhoging van 10% in methaanproductie verwacht kan worden. Wanneer het werkgebied nog verder verkend wordt, is het misschien mogelijk om nog efficiënter te caviteren, waardoor de methaanproductie in potentie meer kan toenemen. Zoals beschreven is in § 4.2.1 zijn er meerdere instellingen mogelijk die op dit moment nog niet getest zijn. Om de optimale instelling te bepalen zou een uitgebreide analyse aan de hand van een statistische proefopzet aan te raden zijn.

TABEL 5-2 OVERZICHT VAN DE VERGISTINGSRESULTATEN VAN DE VERSCHILLENDE GECAVITEERDE SLIBMONSTERS.

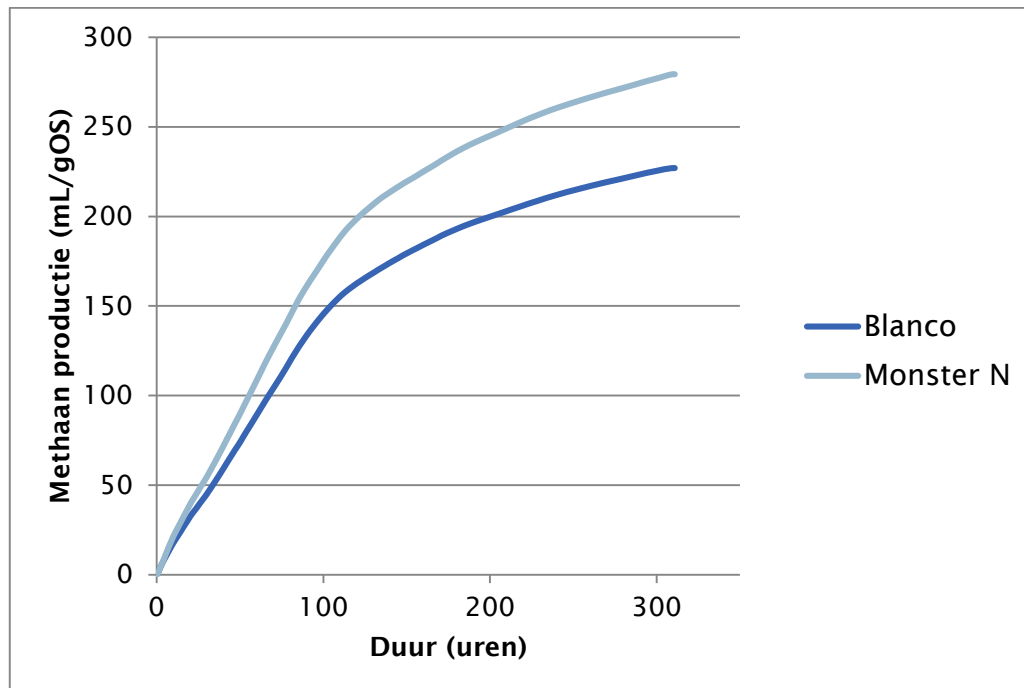
Monster	Verschil CH ₄ productie blanco en monster (%)	Vergistingsduur (dagen)
A	2	9
B	7	9
C	2	28
D	0	28
E	2	6
F	8	6
G	-1	6
H	-3	6
I	-2	6
J	4	6
K	4	5
L*	-	8
M	-15	13
N	23	13
O	17	13
P	-1	12
Q	3	12
R _{vat}	1	33
R _{pomp}	-7	33
S	3	27
T	2	27
U**	-	-
V**	-	-
W**	-	-
X	-3	28
Y	-1	28
Z	1	28
X Delfluent	2	21
Y Delfluent	6	21
Z Delfluent	-2	21
2A	2	11
2B	15	11
2C	10	11
2D	-1	9
2E	5	9
2F	6	9
2G	13	4
2H	8	4
2I	10	4

* De meting van monster L is niet betrouwbaar gebleken en daarom niet meegenomen.

** Van U, V en W zijn geen resultaten omdat deze vroegtijdig zijn gestopt, zonder OS analyse.

De resultaten van de AMPTS II zijn gecorrigeerd voor de methaanproductie van het inoculum en voor het OS gehalte in het monster om een vergelijking te kunnen maken met de blanco. De methaanproductie per g OS van monster N en de blanco is weergegeven in Figuur 5-1.

Hieruit komt duidelijk naar voren dat monster N meer methaan produceert dan de blanco. Alle andere instellingen zijn op dezelfde manier beoordeeld.



FIGUUR 5-1 DE METHAANPRODUCTIE VAN MONSTER N EN DE BLANCO GECORRIGEERD VOOR HET INOCULUM EN HET OS GEHALTE GEDURENDE HET EXPERIMENT.

Naast het meten van de methaanproductie is voor monster K en G ook de totale biogasproductie geanalyseerd, om het percentage methaan in het biogas te bepalen. Hieruit is gebleken dat de fractie methaan in het biogas onveranderd is gebleven ten opzichte van de blanco, namelijk ongeveer 75-80%.

5.3 Ontwaterbaarheidsmethodes

De triplo meting van de ontwaterbaarheidstest resulteerde in een sterke onderlinge spreiding, waardoor de test als onbetrouwbaar werd beschouwd. Een klein verschil in het ontwaterbaarheidspercentage heeft een groot verschil in de hoeveelheid slib die vervoerd wordt tot gevolg. Aangezien de methode zoals die bij RWZI Houtrust op het lab gebruikt wordt de vereiste nauwkeurigheid niet kan bieden, zijn de resultaten niet gebruikt.

De (theoretische) verwachting is dat er fijne deeltjes ontstaan als gevolg van cavitatie. Fijne deeltjes hebben een verstoppende werking op het filter. Wanneer ontwatering op basis van een filtermethode wordt bepaald, zal dit resulteren in een ontwatering die als slechter wordt beoordeeld. In de praktijk op RWZI Houtrust wordt gebruik gemaakt van een centrifuge. In een centrifuge methode zullen de fijne deeltjes vermoedelijk via het centraat gescheiden worden. De fijne deeltjes worden dan teruggevoerd in het proces, en komen opnieuw in de vergistingstank. Het is mogelijk dat deze fijne deeltjes nu gemakkelijker vergist worden, verder onderzoek zal dit echter in kaart moeten brengen.

Er is gezocht in de literatuur naar andere methodes om de ontwaterbaarheid te meten. De samenvatting van deze resultaten is beschreven in Tabel 5-3.

TABEL 5-3 ALTERNATIEVE METHODES VOOR VASTSTELLEN ONTWATERBAARHEID

Methode	
Capillaire zuigtijd (CST)	Filtratiemethode, die vooral iets zegt over de snelheid van filtratie, en niet de over maximale ontwaterbaarheid die gegenereerd wordt.
Drukcilinder, MFT (over of onderdruk filteren)	Gebaseerd op filtratie methode. De aanwezigheid van kleine deeltjes heeft mogelijk een verstoppende werking.
Compatibiliteitsindex (indicatie)	Dit is een technologie die sterk overeen komt met het bepalen van de SVI (slib volume index), waarbij wordt uitgegaan van een hogere ontwaterbaarheid ten gevolge van een compacter bed.
Penetrometer	Dit is een centrifuge-methode, waarna een dunne naald wordt gebruikt om te beoordelen in welke mate het bed doordringbaar is. Hoe doordringbaarder het bed, des te slechter de ontwaterbaarheid.
Viscositeitsmeting (indirect)	Deze meting geeft een indicatie van de ontwaterbaarheid, omdat de viscositeit toeneemt als het slib beter ontwaterbaar is.
Troebelheidsmeter bovenstaande vloeistof centrifuge	Deze meting geeft vooral een indicatie over de aanwezigheid van kleine deeltjes

5.4 Financiële haalbaarheidsstudie

Wanneer de financiële haalbaarheid van VibroCav onderzocht wordt, moeten verschillende aspecten meegenomen worden. Er moet gekeken worden naar de opbrengst van de methaanproductie, de energiekosten van de voorbehandeling ter slibdesintegratie door middel van actieve hydrodynamische cavitatie, en de verwerkingskosten van het vergiste slib. Voor deze berekeningen zijn gegevens van de RWZI Houtrust gebruikt.

Eerst zijn de effecten van cavitatie op de methaanproductie en totale vracht van slib bepaald, waarna de baten en kosten in kaart gebracht zijn.

5.4.1 Opbrengst van methaanproductie met Vibrocav

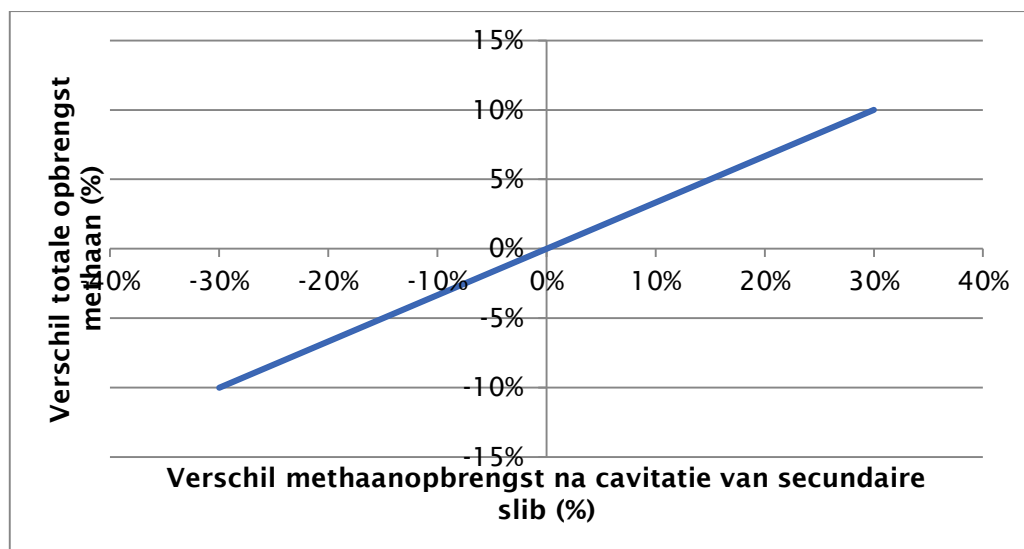
Het is van belang om de extra methaanproductie van het secundaire slib mee te nemen en de methaanproductie van het primaire slib gelijk te houden, omdat het primaire slib niet behandeld wordt met cavitatie. Er wordt aangenomen dat 2/3 van de methaanproductie tot stand is gekomen door vergisting van het primaire slib en het resterende 1/3 deel door vergisting van het secundaire slib (gegevens RWZI Houtrust).

Daarnaast wordt ook aangenomen dat de batch test in het lab dezelfde resultaten geeft als het continue proces in de vergistingsinstallatie in Houtrust. Tot slot wordt aangenomen dat de productie van methaan in de lab test na de eerste week niet significant meer stijgt, en daarom gebruikt kan worden voor de vergelijking met het continue proces op een RWZI.

Door gebruik te maken van cavitatie als voorbehandeling van het secundaire slib, kan er meer methaan geproduceerd worden. De verbetering van methaanproductie in de labtesten varieert afhankelijk van de gekozen toolinstellingen (zie Tabel 5-2). Wanneer alleen gekeken wordt naar de monsters met een verbeterde methaanproductie, kan er geconcludeerd worden dat 10% verbetering haalbaar is. Daarom is er bij deze financiële haalbaarheidsstudie uitgegaan van 10% meer methaanproductie tijdens de vergisting van het secundaire slib.

Uit de gegevens van Houtrust is gebleken dat over de jaren 2010 en 2011 gemiddeld 7.700 kg OS primair slib en 7.700 kg OS secundair slib per dag wordt vergist. Op basis van kg OS is er dus evenveel primair als secundair slib. De totale gemiddelde productie methaan in 2010 en 2011 was 3.350 Nm³/dag. Hiervan was 2/3 geproduceerd door het primaire slib en 1/3 door het secundaire slib. Dit komt neer op een productie van 0,29 Nm³ CH₄/ kg OS voor primair slib en 0,15 Nm³ CH₄/ kg OS voor secundair slib. Wanneer aangenomen wordt dat het secundaire slib 10% meer methaan produceert na behandeling, wordt de productie verhoogd tot 0,16 Nm³ CH₄/kg OS. Voor het secundaire slib van Houtrust resulteert dit in een methaanproductie van (7.700 * 0,16) 1.230 Nm³ CH₄. De totale productie zou dan 3.460 Nm³ CH₄ zijn. Dit is ongeveer 3% meer dan wanneer er geen cavitatie plaats zou vinden (110 Nm³ CH₄).

Aangezien de verhoging van de methaanproductie variabel kan zijn, is er rekening gehouden met een variatie van de productie van 30% zowel naar boven als naar beneden. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 5-2 en tonen aan dat een verandering in de methaanproductie van secundair slib door cavitatie niet tot een even hoge verandering in de totale methaanproductie leidt. Doordat het primaire slib hetzelfde debiet heeft als het secundaire slib, maar verantwoordelijk is voor een groter deel van de methaanproductie, wijzigt het percentage van verschil in totale opbrengst minder hard.



FIGUUR 5-2 VARIATIE IN DE OPBRENGST VAN METHAAN NAAR AANLEIDING VAN DE VERBETERING VAN METHAANPRODUCTIE VAN HET SECUNDAIRE SLIB NA CAVITATIE.

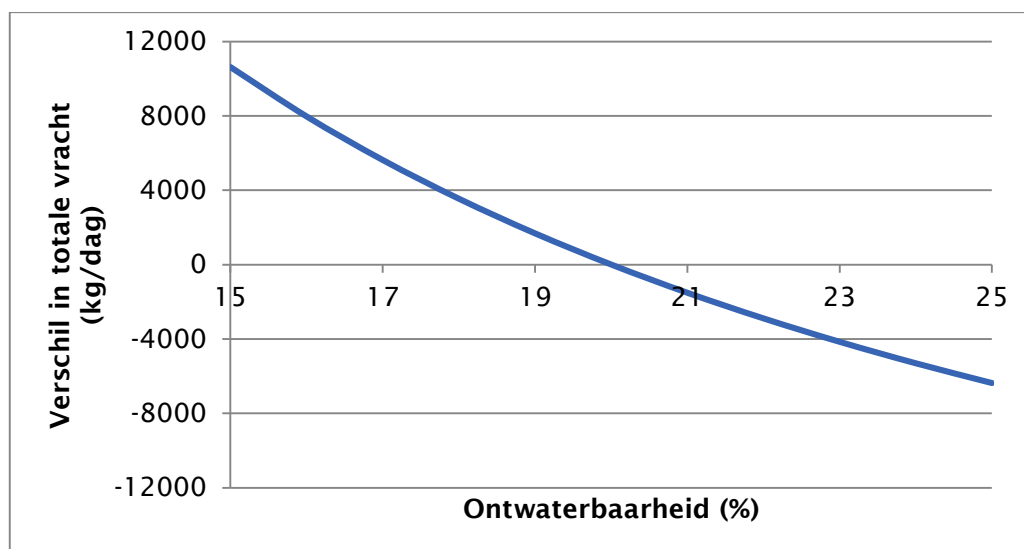
5.4.2 Verwerking vergiste slib

Door het slib te cavitaren verandert niet alleen de methaanproductie, maar kunnen ook de ontwaterbaarheid, het OS en DS gehalte en in potentie de deeltjesgrootteverdeling worden beïnvloed. De methodes om ontwaterbaarheid te meten bleken niet toereikend (zie § 5.3) en daarom is er in deze financiële haalbaarheidsstudie uitgegaan van een mogelijke verbetering en verslechtering (van 25%) van de ontwaterbaarheid gebaseerd op de gegevens van Houtrust. Hierbij is aangenomen dat de ontwaterbaarheid van het vergiste slib op Houtrust 20% is. De variatie in DS en OS is afgeleid van de toe- of afname van methaanproductie door cavitatie.

5.4.2.1 Effect van ontwaterbaarheid op totale vracht

Uit de gegevens van Houtrust blijkt dat er na vergisting over de jaren 2010/2011 circa 12.000 kg DS/dag overblijft. Wanneer wordt aangenomen dat het slib 20% droge stof bevatte, is er dus een totale vracht van slib van ongeveer 61.000 kg/dag wat behandeld moet worden. Zoals eerder vermeld (§5.4.1) bestaat het slib voor de helft uit primair slib en de andere helft uit secundair slib. Aangezien, alleen het secundaire slib wordt gecaviteerd, zal de ontwaterbaarheid van de helft van het slib worden beïnvloed, als primair en secundair slib geen invloed op elkaar hebben in de (gemengde) vergisting. Indien de ontwaterbaarheid van het secundair slib verbeterd wordt naar 25%, blijft er na vergisting en ontwatering nog 55.000 kg/dag (30.000 kg/dag primair slib en 25.000 kg/dag secundair slib) over wat getransporteerd moet worden, wat ongeveer 10 % minder is. Hierbij is aangenomen dat de ontwaterbaarheid van primair slib onveranderd blijft en dus 20% is.

Door de onzekerheid wat betreft de labtesten met betrekking tot de ontwaterbaarheid, is gekeken naar een variatie in de ontwaterbaarheid van het secundair slib en het effect op de totale vracht slib die afgevoerd moet worden. De ontwaterbaarheid is gevarieerd van 15 tot 25%. Daarna is uitgerekend wat het verschil in de totale vracht zou zijn met de nieuwe ontwaterbaarheid van het secundaire slib. Hieruit blijkt dat de relatie tussen het verschil in totale vracht en de ontwaterbaarheid niet lineair is. Dit komt omdat er aangenomen wordt dat de droge stof een percentage van het geheel is. Als de ontwaterbaarheid verhoogd wordt, betekent dit dat het percentage droge stof van het te transporteren slib groter is. Dit leidt tot een kleinere hoeveelheid totale vracht per dag zoals ook weergegeven is in Figuur 5-3.



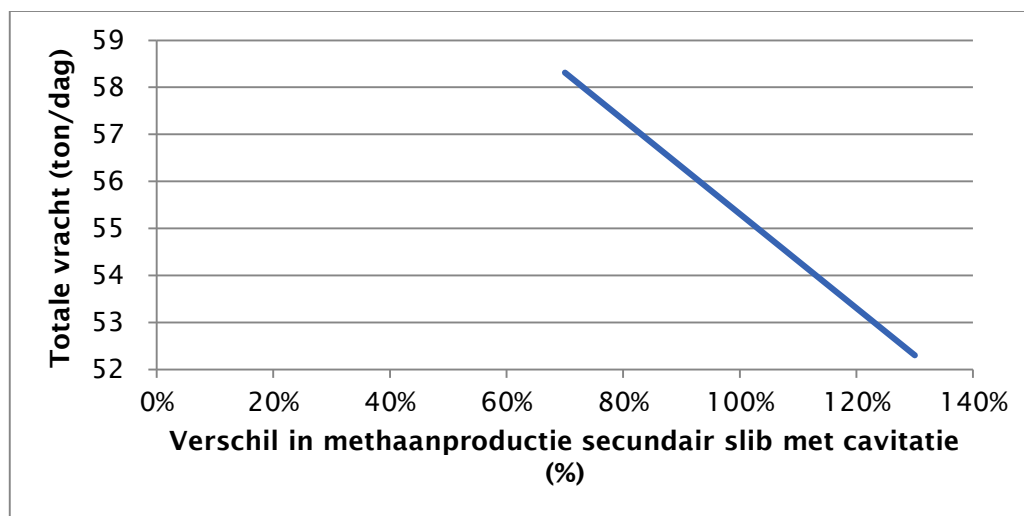
FIGUUR 5-3 HET EFFECT VAN ONTWERBAARHEID VAN HET SECUNDAIRE SLIB OP HET VERSCHIL IN TOTALE VRACHT VAN SLIB DAT GETRANSPORTEERD MOET WORDEN.

5.4.2.2 Effect van OS en DS gehalte op totale vracht

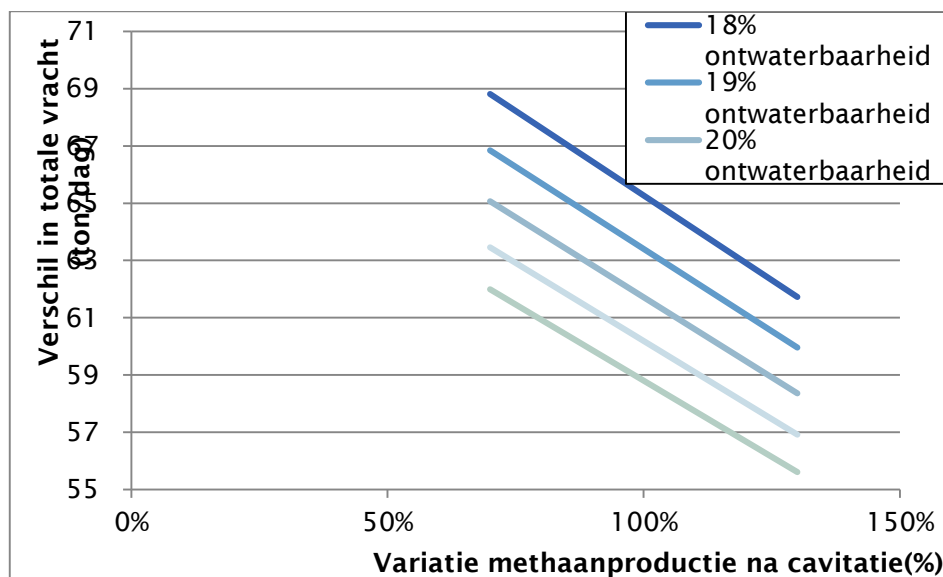
Door de cavitatie en de verhoogde methaanproductie kan aangenomen worden dat meer OS wordt omgezet in methaan. Hierdoor blijft er minder OS en dus ook minder DS over na vergisting dan nu het geval is bij Houtrust. Theoretisch gezien is de CZV/OS ratio 1,42 en kan 1 kg CZV leiden tot 0,35 m³ CH₄, wat zou betekenen dat 1 m³ CH₄ van ongeveer 2 kg OS afkomstig is.

Als er hier weer uitgegaan wordt van een verhoogde methaanproductie van 10% is dit over de jaren 2010/2011 een toename in productie van $110 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$, wat afkomstig zou moeten zijn van 220 kg OS. Dit houdt in dat DS ook met 220 kg verlaagd wordt en er dus minder slib getransporteerd zou hoeven worden.

Wanneer de ontwaterbaarheid gelijk zou blijven aan de ontwaterbaarheid zonder behandeling (20%) zou dit resulteren in een totale vracht van 61.000 kg/dag. Dit is 2% lager dan de totale vracht zonder vermindering van OS. Echter, wanneer aangenomen zou worden dat de ontwaterbaarheid toeneemt naar 25% voor het secundair slib, neemt de totale vracht af tot minder dan 54.000 kg/dag. Dit is ongeveer 12% minder dan de vracht met de ontwaterbaarheid van 20%.



FIGUUR 5-4 HET EFFECT VAN DE VARIATIE IN OS EN DS NA VERGISTING NAAR AANLEIDING VAN VERANDERDE METHAANPRODUCTIE VOOR GECAVITEERD SLIB.



FIGUUR 5-5 HET EFFECT VAN DE VARIATIE IN OS EN DS NA VERGISTING NAAR AANLEIDING VAN VERANDERDE METHAANPRODUCTIE VOOR GECAVITEERD SLIB MET VERSCHILLENDE PERCENTAGES ONTWATERBAARHEID.

Een verandering in de methaanproductie leidt dus ook tot een verandering in de OS en DS in het slib. Het effect hiervan op de totale vracht van het slib is weergegeven in Figuur 5-4 waarbij een ontwaterbaarheid van 20% voor het primaire slib en 25% secundair slib is aangehouden. Een variatie in de ontwaterbaarheid is weergegeven in Figuur 5-5.

5.4.3 Kostenvergelijking van slibbehandeling met Vibrocav of zonder voorbehandeling

De baten en kosten van slibvergisting en verwerking zijn in overleg met Houtrust vastgesteld en weergegeven in Tabel 5-4.

TABEL 5-4 AANNAME VAN DE KOSTEN/OPBRENGST VAN TOEPASSING OP HET VERWERKEN VAN SLIB BIJ HOUTRUST.

Omschrijving	Baten/Kosten	Eenheid
Transport en verbrandingskosten totaal slib	83	€/ton totaal slib
Opbrengst CH ₄	2,90	kWh/Nm ³
Energie	0,07	€/kWh
Polymeer dosering	18	kg polymeer/ton droge stof slib
Kosten polymeer	2,75	€/kg polymeer
Kosten VibroCavtool	2,00	kWh/m ³ secundair slib voor vergisting

In deze kosten is aangenomen dat de opbrengst van CH₄ leidt tot een vermindering van inkoop van energie. Daarom is aangenomen dat de gegenereerde elektriciteit van CH₄ ook 0,07 €/kWh is.

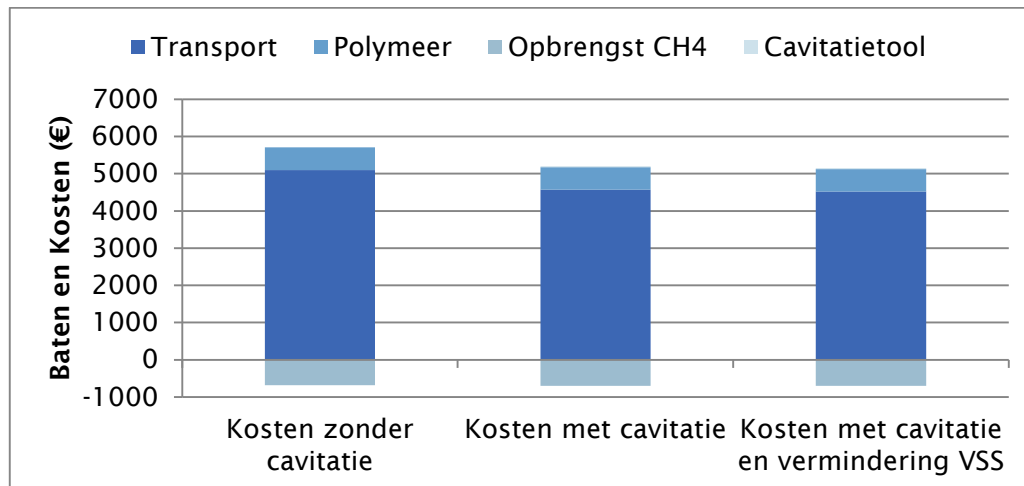
Hierbij is de energie die nodig is voor de vergisting niet meegenomen, omdat aangenomen wordt dat die gelijk blijft. Ook de investeringskosten van de VibroCavtool zijn niet meegenomen. De volgende kosten en baten zijn wel meegenomen:

- Transport en verbrandingskosten van het vergiste slib;
- Baten van de methaanproductie;
- Polymeerkosten;
- Energiekosten van de VibroCavtool.

Wanneer de kosten en baten voor de vergisting en verwerking van ongecaviteerd slib berekend zijn, wordt er een totale kostenpost van ongeveer €5.000,- per dag verwacht. Het grootste gedeelte hiervan bestaat uit de transportkosten die bijna €5.100,- per dag bedragen (61 ton slib/dag * 83 €/ton slib). De kosten voor de polymeerdosering (€600,-) worden terugverdiend door de opbrengst van CH₄ (€ 680,-). Een verdeling van de kosten en baten is zichtbaar in Figuur 5-6.

Dezelfde baten en kosten zijn ook berekend wanneer het secundaire slib wordt gecaviteerd. Hierbij wordt aangenomen dat de methaanproductie van het secundaire slib met 10% verhoogd wordt en de ontwaterbaarheid 25% wordt. Dit leidt tot een vermindering in de transportkosten (€ 4.600,-) en een verhoging in de baten van de CH₄ productie (€700,-). Hierdoor verminderen de totale kosten tot ongeveer €4.500,- wat €530,- per dag lager is dan de kosten zonder behandeling. Hierbij zijn de kosten van het gebruik van de VibroCavtool ook afgetrokken, welke €24,- per dag zijn. De kosten van het gebruik van de VibroCavtool zijn gebaseerd op cavitatie alleen op secundair slib. Het debiet van ingedikd secundair slib is ongeveer 170 m³/dag over de jaren 2010/2011. Wanneer een energieverbruik van 2 kWh/m³ wordt gehanteerd en een energieprijis van 0,07 €/kWh, komt dit uit op een kostenpost van

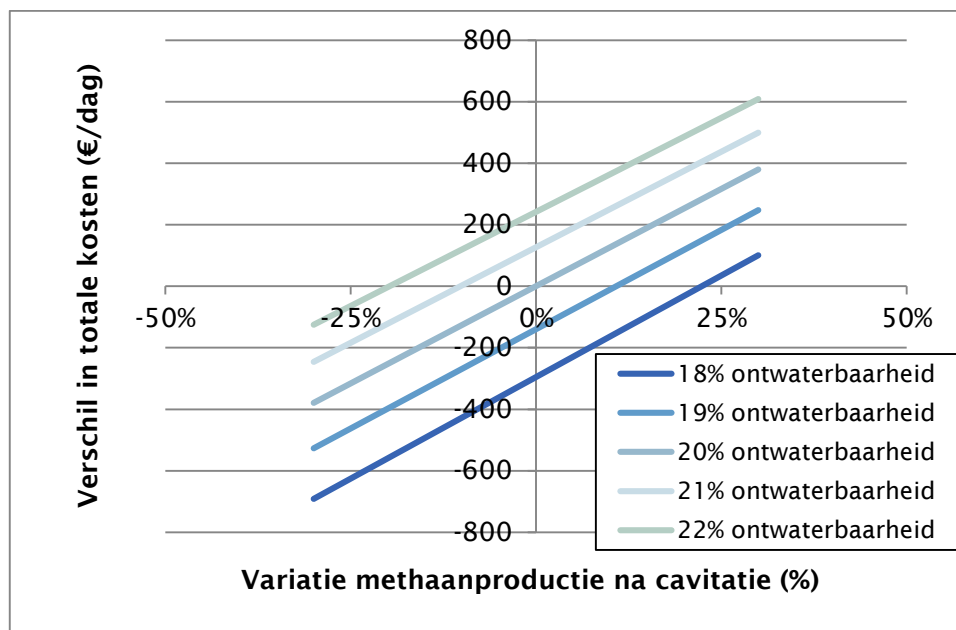
€24,- per dag. Zoals blijkt uit Figuur 5-6 is dit de laagste kostenpost en weegt het op tegen de besparing van €530,- die met de verbeterde methaanproductie en ontwatering wordt behaald.



FIGUUR 5-6 VERDELING VAN DE BATEN/KOSTEN PER DAG VAN DE VERWERKING VAN HET SLIB MET EN ZONDER CAVITATIE EN MET IN ACHTNEMING VAN DE EFFECTEN VAN CAVITATIE OP OS.

Daarnaast is in de derde kolom in Figuur 5-6 het effect van een vermindering van OS opgenomen. Zoals hiervoor uitgelegd, is de verwachting dat het gehalte OS vermindert door behandeling van het slib met cavitatie en de verhoogde methaanproductie. Voor iedere Nm^3 CH_4 die geproduceerd wordt, is theoretisch gezien 2 kg OS nodig. Zoals berekend bij §5.4.2.2 leidt deze vermindering bij een hogere methaanproductie van 10% en een verbeterde ontwaterbaarheid van 25% tot ongeveer 12% minder totale vracht. Hierdoor dalen de transportkosten en de polymeerkosten verder, waardoor de totale besparing oploopt tot ongeveer €580,-. Aangezien het effect van cavitatie op de methaanproductie en de ontwaterbaarheid van het secundaire slib kan variëren en nog niet exact bekend is, zijn er verschillende percentages van verandering in de methaanproductie en verschillende ontwaterbaarheden aangenomen. Het verschil in de totale kosten hiervoor is berekend en weergegeven in Figuur 5-7.

Het verschil in de totale kosten tussen de verschillende ontwaterbaarheden bij dezelfde methaanproductie ligt rond de €130,- per dag per 1% variatie ontwaterbaarheid, afhankelijk van de verandering in de methaanproductie. Wanneer de ontwaterbaarheid hetzelfde blijft, maar de methaanproductie gevarieerd wordt met 2,5%, verschilt het rond de €32,- per dag afhankelijk van het percentage ontwaterbaarheid. Een verschil in de ontwaterbaarheid heeft dus een grotere invloed op de totale kosten dan een variatie in methaanproductie. Hierbij is het verschil in kosten bij een gelijke ontwaterbaarheid voor elke variatie in methaanproductie lineair. Dit is niet het geval bij een gelijke methaanproductie maar een verschil in ontwaterbaarheid. Hoe lager het percentage van ontwaterbaarheid, hoe groter het verschil in de transportkosten.

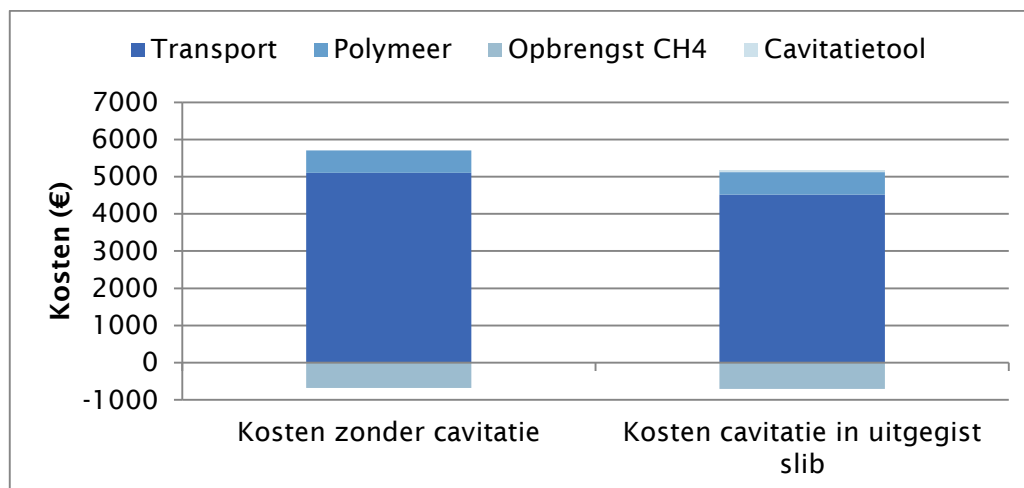


FIGUUR 5-7 HET VERSCHIL IN KOSTEN BIJ VARIATIE IN DE METHAANPRODUCTIE EN DE ONTWERBAARHEID VAN HET SECUNDAIRE SLIB MET INACHTNEMING VAN DE VERMINDERING VAN OS.

Om de energiekosten van €24,- per dag eruit te halen, zal er ongeveer 120 Nm³ CH₄ per dag meer geproduceerd moeten worden bij een gelijke ontwaterbaarheid. Dit is een verhoging van de methaanproductie van het secundaire slib van 11%. Wanneer de ontwaterbaarheid verbeterd wordt en er 290 kg nat slib (0,5% van 61.000 kg) minder behandeld hoeft te worden, zijn deze kosten er ook uit. Hierbij is alleen geen rekening gehouden met de investeringskosten van de tool.

5.4.4 VibroCavtool inzetten op uitgegist slib

In voorgaande berekening is uitgegaan van het behandelen van secundair slib. Het is echter ook mogelijk om uitgegist slib te behandelen; uitgegist slib kan wel nog verder vergist worden, omdat het uit een continue reactor wordt bemonsterd. De energiekosten voor het behandelen van het slib verhogen dan van €24,- per dag naar €48,- per dag, omdat een hoger debiet aan slib behandeld moet worden (340 in plaats van 170 m³/dag). Er kan dan gewerkt worden met een slibstroom met een lagere viscositeit. Wanneer uit gegaan wordt van een gelijk effect op methaanproductie en ontwaterbaarheid als bij ingedikt slib, blijven de overige kosten en baten gelijk. Ondanks dat er nu hogere kosten voor de cavitatietool zijn (€48,- per dag), zijn de totale kosten voor slibverwerking met €560,- per dag gedaald ten opzichte van geen behandeling (zie Figuur 5-8).



FIGUUR 5-8 VERDELING VAN DE BATEN/KOSTEN PER DAG VAN DE VERWERKING VAN HET SLIB ZONDER CAVITATIE EN MET CAVITATIE VAN UITGEGIST SLIB.

5.4.5 Conclusie financiële haalbaarheidsstudie

De transportkosten beslaan het grootste deel van de kosten van de verwerking van slib (hierbij is geen rekening gehouden met energiekosten van de vergisting). Op deze kosten heeft de ontwaterbaarheid het grootste effect. Het effect van de vermindering van OS door verhoogde methaanproductie verlaagt de kosten verder. De besparing op de transportkosten door de vermindering van OS is groter dan de opbrengst van methaan.

De energiekosten van de tool behelzen maar €24,- per dag en worden ruimschoots gecompenseerd wanneer deze voorbehandeling leidt tot 120 Nm³ meer CH₄ productie of 290 kg minder nat slibafvoer.

6 Conclusies

Dit onderzoek heeft gedemonstreerd dat actieve hydrodynamische cavitatie erg interessant is als slibontsluitingstechniek.

- Bij verkenning van het juiste werkgebied van actieve hydrodynamische cavitatie op secundair slib zijn verschillende instellingen gevonden die de methaanproductie verhogen. We verwachten een verhoging van 10% in methaanproductie mogelijk is. Het cavitatiegebied is nog niet geheel vastgesteld, dus nieuwe instellingen kunnen mogelijk in een groter effect resulteren.
- De energiekosten voor VibroCavtool, die actieve hydrodynamische cavitatie toepast, zijn laag (volgens WhirlWindi 2kw/m^3), en dat maakt deze tool erg interessant als alternatief voor passieve cavitatie voor slibdestructie.
- De kostenanalyse demonstreert dat de ontwaterbaarheid een cruciale rol speelt in de financiële haalbaarheid van deze toepassing. Met een ontwateringsverbetering van 0,5% (absoluut), is er een financieel voordeel te behalen. Methoden die de ontwaterbaarheid vaststellen op het lab zijn echter niet toereikend genoeg om met deze nauwkeurigheid te meten; zowel op basis van reproduceerbaarheid van de labmeting, als dat het ontwateringsprincipe in het lab fundamenteel anders is dan in de praktijk op RWZI Houtrust wordt toegepast.

7 Outlook

Naar aanleiding van dit onderzoek worden verschillende vervolgstappen geadviseerd. Deze kunnen in de volgende categorieën worden opgedeeld:

1. Uitwerken van werkgebied
2. Meetmethode voor ontwaterbaarheid ontwikkelen
3. inline vergelijken met referentie situatie
4. Tool inzetten op uitgegist slib

In de volgende paragrafen zal verder in detail beschreven worden hoe dit opgepakt kan worden.

7.1 Uitwerken werkgebied van actieve hydrodynamische cavitatie op secundair slib

Ondanks dat er vele instellingen van de tool zijn onderzocht, is het mogelijk dat de methaanproductie van het slib verder kan toenemen bij andere instellingen. Het werkgebied op secundair slib is nog niet volledig in kaart gebracht. Een statistische proefopzet kan eraan bijdrage een snelle optimalisatie te verkrijgen. De mate waarin cavitatie optreedt is ook sterk afhankelijk van de eigenschappen van het slib. Een onderzoek naar de effectiviteit van deze tool op de sliblijn van een andere RWZI zou dan informatie geven over de mate waarin de eigenschappen van het slib de efficiëntie van de tool mede bepalen.

7.2 Meetmethode ontwaterbaarheid ontwikkelen

De ontwaterbaarheid van het slib is in zeer sterke mate bepalend voor de kosten van de slibverwerking. Wanneer door toepassing van de VibroCavtool de ontwaterbaarheid met 0.5% (absoluut) wordt verbeterd, weegt de kostenbesparing op tegen de energiekosten die gepaard gaan met de voorbehandeling. Momenteel is het echter niet mogelijk de ontwaterbaarheid op labschaal met deze nauwkeurigheid te meten; zowel op basis van reproduceerbaarheid van de labmeting, als dat het ontwateringsprincipe in het lab fundamenteel anders is dan in de praktijk wordt toegepast. Om hier concrete getallen te noemen zou een nauwkeurige ontwaterbaarheidstestmethode ontwikkeld moeten worden.

Een testmethode die gebaseerd is op filtratie geniet volgens de literatuur de voorkeur. De kleine deeltjes die vrij komen als gevolg van de vibrocavitatie hebben een verstoppende werking op het filter. In de praktijk is er echter geen sprake van filtratie, maar wordt een centrifuge gebruikt om te ontwateren. Het effect van de kleine deeltjes is heel anders in deze centrifuge methode. Op labschaal kan de ontwaterbaarheid niet getest worden door een centrifugeermethode.

7.3 In-line vergelijken met referentie situatie

Indien cavitatie wordt toegepast op de secundaire sliblijn in Houtrust is het lastig objectief een verandering te constateren, omdat er geen vergelijking gemaakt kan worden. Er is geen parallelle straat waar de cavitatie niet toegepast zal worden, waardoor een verhoogde methaanproductie ook het gevolg zou kunnen zijn van een verandering in samenstelling van het slib zelf of in de condities van de vergistingsinstallatie. Een mogelijkheid om toch een vergelijking te maken, zou kunnen worden gevonden in het toepassen van een anaeroob vergistingsprocesmodel.

Een wetenschappelijk gepubliceerd model, dat hiervoor gebruikt zou kunnen worden, is het Anaerobic Digestion Model no. 1 (ADM1) (Batstone et al., 2002a & b). Door het model te calibreren en valideren met gegevens van de vergistingsinstallatie kan een voorspelling gedaan worden wat de methaanproductie zou moeten zijn. Wanneer de methaanproductie tijdens het gebruik van de VibroCavtool significant afwijkt van de voorspelling van het model, kan worden geconcludeerd dat cavitatie invloed heeft op het vergisten van secundair slib.

7.4 Tool inzetten op uitgestort slib

Het uitgestorte slib van RWZI Houtrust heeft nog een hoog OS gehalte van ongeveer 65 tot 68%. Het hoge OS gehalte laat zien dat er nog ruimte is om de vergisting te verbeteren. Naast dat de VibroCavtool ingezet kan worden op secundair slib, is het wellicht interessant om de effecten op de vergiste slibstroom te onderzoeken. Het voordeel van de behandeling van uitgestort slib is dat deze slibstroom niet verdund hoeft te worden alvorens het behandeld wordt. Met de huidige pilot kan in-line op full-scale onderzocht worden of cavitatie effectief optreedt op uitgestort slib.

Referenties

- APHA (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th edition, ISBN:0-87553-223-3.
- Badve, M.P., Bhagat, M.N., Pandit, A.B. (2015). "Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation." *Separation and purification Technology* **151**: 31-38.
- Bakker, T. W. (2012). "Virbrocav; hydrodynamic vibration and cavitation technology." ISBN: 978-94-6203-207-1.
- Batstone, D.J. Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Vavilin, V. A. (2002a). Anaerobic digestion model no. 1 (ADM1), IWA task group for mathematical modelling of anaerobic digestion processes. IWA Publishing, London, United Kingdom of Britain.
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Vavilin, V. A. (2002b). The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, **45** (10): 65-73.
- Bioprocess control (2014) Brochure Discover the benefits of AMPTS II.
- Boehler, M. and H. Siegrist (2006). "Potential of activated sludge disintegration." *Water Science and technology* **53**(12): 207-216.
- Bougrier, C., C. Albasi, J. P. Delgenès and H. Carrère (2006). "Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **45**(8): 711-718.
- Braeutigam, P., M. Franke, R. J. Schneider, A. Lehmann, A. Stolle and B. Ondruschka (2012). "Degradation of carbamazepine in environmentally relevant concentrations in water by Hydrodynamic-Acoustic-Cavitation (HAC)." *Water Research* **46**(7): 2469-2477.
- Capocelli, M., M. Prisciandaro, A. Lancia and D. Musmarra (2014). "Hydrodynamic cavitation of p-nitrophenol: A theoretical and experimental insight." *Chemical Engineering Journal* **254**: 1-8.
- Carrère, H., C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Batstone, J. P. Delgenès, J. P. Steyer and I. Ferrer (2010). "Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review." *Journal of Hazardous Materials* **183**(1-3): 1-15.
- Chen, L., Z. Dong, C. Liu, X. Zhang and K. Zhang (2016). "Experimental study on disinfection of Escherichia coli by hydrodynamic cavitation behind square multi-orifice plates." *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering* **35**(9): 48-54.
- Dular, M., T. Griessler-Bulc, I. Gutierrez-Aguirre, E. Heath, T. Kosjek, A. Krivograd Klemenčič, M. Oder, M. Petkovšek, N. Rački, M. Ravnikar, A. Šarc, B. Širok, M. Zupanc, M. Žitnik

- and B. Kompare (2016). "Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment." Ultrasonics Sonochemistry **29**: 577-588.
- Gaikwad, V. and V. Ranade (2016). "Disinfection of water using vortex diode as hydrodynamic cavitation reactor." Asian Journal of Chemistry **28**(8): 1867-1870.
- Gogate, P. R. (2002). "Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes." Advances in Environmental Research **6**(3): 335-358.
- Gogate, P. R. and A. B. Pandit (2005). "A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future." Ultrasonics Sonochemistry **12**(1-2): 21-27.
- Gogate, P. R. (2007). "Application of cavitational reactors for water disinfection: Current status and path forward." Journal of Environmental Management **85**(4): 801-815.
- Gogate, P. R., S. Mededovic-Thagard, D. McGuire, G. Chapas, J. Blackmon and R. Cathey (2014). "Hybrid reactor based on combined cavitation and ozonation: From concept to practical reality." Ultrasonics Sonochemistry **21**(2): 590-598.
- Gogate, P. R. and P. N. Patil (2015). "Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes." Ultrasonics Sonochemistry **25**: 60-69.
- Ivannikov, V.I and Ivannikov I.V (2004). "Method and apparatus for producing fluid cavitation" Patent US 6705396
- Jyoti, K.K., Pandit, A.B. (2004). "Effect of cavitation on chemical disinfection efficiency". Water research **38**: 2249-2258.
- Jyoti, K. K. and A. B. Pandit (2004). "Ozone and cavitation for water disinfection." Biochemical Engineering Journal **18**(1): 9-19.
- Liu, Z., M. Zhu, C. Deng, H. Su, P. Chen and Z. Wang (2016). "Pollutant and microorganism removal from water by hydrodynamic cavitation." Open Biotechnology Journal **10**: 258-264.
- Machnicka, A., K. Gröbel and J. Suschka (2009). "The use of hydrodynamic disintegration as a means to improve anaerobic digestion of activated sludge." Water SA **35**(1).
- Madhavan, J., F. Grieser and M. Ashokkumar (2010). "Combined advanced oxidation processes for the synergistic degradation of ibuprofen in aqueous environments." Journal of Hazardous Materials **178**(1-3): 202-208.
- Madhavan, J., F. Grieser and M. Ashokkumar (2010). "Degradation of orange-G by advanced oxidation processes." Ultrasonics Sonochemistry **17**(2): 338-343.
- Matilainen, A. and M. Sillanpää (2010). "Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes." Chemosphere **80**(4): 351-365.
- Méndez-Arriaga, F., R. A. Torres-Palma, C. Pétrier, S. Esplugas, J. Gimenez and C. Pulgarin (2008). "Ultrasonic treatment of water contaminated with ibuprofen." Water Research **42**(16): 4243-4248.

- Müller, J. A., A. Winter and G. Strükmann (2004). "Investigation and assessment of sludge pre-treatment processes." Water Science and technology **49**(10): 97-104.
- Nickel, K. (2002). "Intensivierung der anaeroben Klaerschlammbiliserung durch vorgeschalteten Ultraschall." disseration TU Hamburg-Harburg.
- Patil, A. L., P. N. Patil and P. R. Gogate (2014). "Degradation of imidacloprid containing wastewaters using ultrasound based treatment strategies." Ultrasonics Sonochemistry **21**(5): 1778-1786.
- Phothilangka, P. (2008). "Sludge disintegration technologies for improved biogas yield." disseration.
- Prisciandaro, M., M. Capocelli, A. Lancia, D. Musmarra, S. Rodriguez, A. Romero and A. Santos (2014). On the comparison and the synergistic effect of chemical AOP and hydrodynamic cavitation. 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2014. J. Y. Yong, P. Y. Liew, J. J. Klemes and P. S. Varbanov, Italian Association of Chemical Engineering - AIDIC. **39**: 1783-1788.
- Raut-Jadhav, S., V. K. Saharan, D. Pinjari, S. Sonawane, D. Saini and A. Pandit (2013). "Synergetic effect of combination of AOP's (hydrodynamic cavitation and H₂O₂) on the degradation of neonicotinoid class of insecticide." Journal of Hazardous Materials **261**: 139-147.
- Raut-Jadhav, S., V. K. Saharan, D. V. Pinjari, D. R. Saini, S. H. Sonawane and A. B. Pandit (2013). "Intensification of degradation of imidacloprid in aqueous solutions by combination of hydrodynamic cavitation with various advanced oxidation processes (AOPs)." Journal of Environmental Chemical Engineering **1**(4): 850-857.
- Ringoot, D., B. Reitsma and R. Neef (2014). "Thermische hydrolyse als de motor van centrale slibverwerking." H₂O maart.
- Rivas Ibáñez, G., B. Esteban, L. Ponce-Robles, J. L. Casas López, A. Agüera and J. A. Sánchez Pérez (2015). "Fate of micropollutants during sewage sludge disintegration by low-frequency ultrasound." Chemical Engineering Journal **280**: 575-587.
- Save, S. S., A. B. Pandit and J. B. Joshi (1994). "Microbial cell disruption: role of cavitation." The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal **55**(3): B67-B72.
- STOWA (2005). "Literatuurstudie slibontsluiting." Rapport 2005-W04.
- STOWA (2011a) "Handboek slibgisting" Rapport 2011-16.
- STOWA (2011b). "Verkenning thermische slibontsluiting." Rapport 2011-W03.
- STOWA (2012). "Thermische slibontsluiting - pilot-onderzoek naar de mogelijkheden en randvoorwaarden." rapport 2012-W25.
- Tao, Y., J. Cai, X. Huai, B. Liu and Z. Guo (2016). "Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment." Chemical Engineering and Technology **39**(8): 1363-1376.

- Tiehm, A., K. Nickel, M. Zellhorn and U. Neis (2001). "Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization." Water Research **35**(8): 2003-2009.
- Tijani, J. O., O. O. Fatoba, G. Madzivire and L. F. Petrik (2014). "A review of combined advanced oxidation technologies for the removal of organic pollutants from water." Water, Air, and Soil Pollution **225**(9).
- Veldhoen, A., E. Wypkema, U. C. and F. Kramer (2013). "Businesscase thermofiele slibgisting." H₂O mei **2013**.
- Weemaes, M. P. J. and W. H. Verstraete (1998). "Evaluation of current wet sludge disintegration techniques." Journal of Chemical Technology & Biotechnology **73**(2): 83-92.
- Wetterskip Fryslân (2013). "Strategisch aanpak Wetterskip Fryslân voor de keuze van slibverwerking na 2014." www.wetterskipfryslan.nl.
- Xu, L. J., W. Chu and N. Graham (2015). "Sonophotolytic degradation of phthalate acid esters in water and wastewater: Influence of compound properties and degradation mechanisms." Journal of Hazardous Materials **288**: 43-50.
- Zhang, X., Z. Dong, L. Chen, C. Liu and K. Zhang (2016). "Experimental study on Escherichia coli killed by hydrodynamic cavitation behind triangular multi-orifice plates." Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering **35**(8): 65-71.
- Zhou, X. Zhao, J., Li, Z., Song, J., Li, X., Yang, X., Wang, D. (2016). "Enhancement of ultrasound on secondary wastewater effluent disinfection by sodium hypochlorite and disinfection by-products analysis". Ultrasonics Sonochemistry **29**: 60-66.
- Zupanc, M., T. Kosjek, M. Petkovšek, M. Dular, B. Kompare, B. Širok, Ž. Blažeka and E. Heath (2013). "Removal of pharmaceuticals from wastewater by biological processes, hydrodynamic cavitation and UV treatment." Ultrasonics Sonochemistry **20**(4): 1104-1112.

Bijlage I Protocol metingen AMPTS II

Er zijn 5 moederoplossingen gewenst. Elk van deze moederoplossingen wordt gemengd in de keukenmachine (deze staat in de zuurkast klaar) met een deeghaak (langzaamste stand), 2 minuten is voldoende. Na het maken van één moederoplossing, kunnen 3 bioreactoren (zie schema in Tabel 1-1) in het AMPTS II-waterbad worden gevuld met 400 mL van de moederoplossing. Vervolgens worden deze afgesloten met het deksel (dat ingevet is). Het naspoelen met kraanwater van de bak van de keukenmachine (en het uitslaan van water) is voldoende voor het hergebruik voor de volgende moederoplossing.

Het gaat hierbij om de volgende volumina:

Inoculum bioreactor:	100 mL uitgegist slib + 300 mL Milli-Q
Blanco bioreactor:	100 mL uitgegist slib + 300 mL onbehandeld slib
Monster bioreactor:	100 mL uitgegist slib + 300 mL monster

Moederoplossing: Inoculum:

- 400 mL inoculum (uitgegist slib)
- 1200 mL Milli-Q (H_2O)

Moederoplossing: Blanco

- 400 mL inoculum (uitgegist slib)
- 1200 mL onbehandeld slib

Moederoplossing: Monster A

- 400 mL inoculum (uitgegist slib)
- 1200 mL Monster A (behandeling A)

Moederoplossing: Monster B

- 400 mL inoculum (uitgegist slib)
- 1200 mL Monster B (behandeling B)

Moederoplossing: Monster C

- 400 mL inoculum (uitgegist slib)
- 1200 mL Monster C (behandeling C)

TABEL 1-1 OVERZICHT VAN INHOUD BIOREACTOREN AMPTS II

Pot	Monster: 400 mL per potje, door uit te schenken vanuit de gemaakte moederoplossing
1	Inoculum 1
2	Inoculum 2
3	Inoculum 3
4	Blanco 1
5	Blanco 2
6	Blanco 3
7	Monster A 1
8	Monster A 2
9	Monster A 3
10	Monster B 1
11	Monster B 2
12	Monster B 3
13	Monster C 1
14	Monster C 2
15	Monster C 3

In de kleine potjes met blauwe dop dient voor gebruik de NaOH-oplossing vervangen te worden door nieuwe 3M NaOH-oplossing. In de tussentijd mag er GEEN contact zijn geweest met de lucht, anders werkt het invangen met NaOH niet meer!

Uitvoering inzetten metingen AMPTS II (inclusief vullen bioreactoren):

1. Meng de moederoplossingen in de keukenmachine op de laagste stand.
2. Bepaal in triplo het drooggewicht en de asrest van de moederoplossingen (filter leeg wegen, filtreren, 105 °C 6 uur, 550 °C 2 uur incuberen, na 105 °C incubatie en na 550 °C incubatie wegen).
3. Vul de bioreactoren in het waterbad volgens Tabel 1-1.
4. Was de bak van de keukenmachine met kraanwater en sla het water hier vervolgens uit. Dit is voldoende om volgende moederoplossing erin te kunnen maken (na de laatste bereiding van een moederoplossing moet de bak wel volledig worden schoongemaakt om aangroei te voorkomen).
5. Sluit de bioreactoren in waterbad af met deksels (motor zit er al aan vast). Smeer ze met vet in om lekkage van het geproduceerde gas te voorkomen.
6. Vervang de NaOH-oplossingen (3M) in kleine potjes met blauwe deksel en sluit ze direct af. Voorkom zoveel mogelijk contact met de lucht.
7. Zorg dat waterbad genoeg water heeft (tot iets onder plexiglas plaat): vul aan met Milli-Q water.
8. Zorg dat er genoeg water zit in het gasmeting onderdeel van de AMPTS II (*gas volume measuring device*): eventueel met Milli-Q aanvullen. Waterniveau moet tussen de twee groene streepjes staan.
9. Flush het systeem met N₂ gas. Er zit aan elke bioreactor een klein slangetje (afgesloten met rode klem) vanaf daar kan N₂ gas ingebracht worden (als je klaar bent direct afsluiten). Controleer of het klepje dat hoort bij de bioreactor daadwerkelijk omhoog gaat (dus of bioreactor 1 correct is aangesloten op klepje 1: nummer staat op klepje).
10. Nadat alle bioreactoren geflushed zijn; haal handmatig alle klepjes even omhoog, zodat de druk in elk systeem nu gelijk is.
11. Sluit alle stekkers aan.

12. Stel waterbad in op 37°C.
13. Zet het softwareprogramma aan.
 - a. User, met wachtwoord: bpc (inloggen op AMPTS PC).
 - b. Start internet explorer op de AMPTS PC.
 - c. Klik vervolgens linksboven in de zoekbalk op de tekst "bioprocess control AMPTS". Nu verschijnt de bioprocess control site.
 - d. De site kent 6 belangrijke pagina's (Home, Experiment, Control, Graphs, Download report en System). Beschrijving staat hieronder:
 - e. Home: homepage, niets veranderen.
 - f. Experiment: experiment informatie, niets veranderen.
 - g. Control: Hier kun je huidige experimenten stoppen en nieuwe experimenten starten.
 - i. Stop eerst de huidige experimenten die beëindigd zijn door per cel (in totaal 15 cellen) op het stopteken te klikken. Er verschijnt een balk welke vraagt voor een bevestiging van het stoppen (aangezien alle voorgaande data verloren gaan). LET OP: maak altijd eerst een laatste update van de data voordat je deze stop zet (zie stap 13-i).
 - ii. Speed adjustments = 80%.
 - iii. Mixer on time seconds = 0.
 - iv. Mixer off time seconds = 0.
 - v. Na deze instellingen te hebben ingevoerd klik op: Apply motor settings.
 - h. Graphs: overzicht van de geproduceerde grafieken van de huidige testen.
 - i. Download report: Hier wordt het AMPTS rapport gedownload.
 - i. Klik eerst bij 'Interpolation time base' op Quarter of an hour.
 - ii. Klik vervolgens op 'generate report'. Doe dit altijd ook al staat er al een Excel file weergegeven.
 - iii. Download de excel file door te klikken op 'Download generated report for Excel (XML)'.
 - iv. Sla het Excel bestand op, op de D schijf onder de juiste map op basis van datum inzet.
 - j. Systeem: Niets veranderen.

Alternatieven:

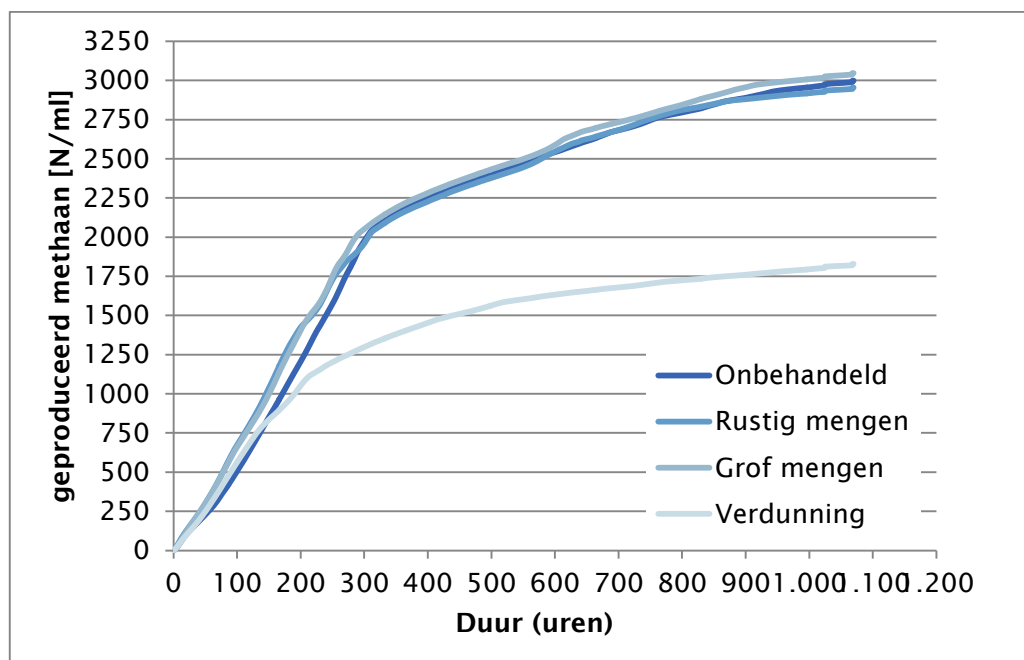
- Als je totaal biogas wilt meten, kan dit gedaan worden door het potje NaOH over te slaan, en het slangetje direct aan te sluiten op het laatste onderdeel van de AMPTS II (*gas volume measuring device*).

Bijlage II Optimalisatie AMPTS II

Er zijn verschillende facetten die een belangrijke rol kunnen spelen bij de efficiëntie van vergisting. Één daarvan is het ontstaan van frictie, waardoor het slib uit elkaar kan vallen, en in potentie gemakkelijker vergistbaar wordt. Zeker gezien dit ook één van de mogelijke effecten van cavitatie is, is het belangrijk om niet teveel onnodige frictie (turbulentie) in het onbehandelde monster (blanco) te genereren. De test heeft drie meng varianten toegepast: 1) geen menging, 2) rustig mengen met keukenapparaat en 3) grof mengen met keukenapparaat. Deze monsters zijn gestart met een gelijke OS concentratie. Figuur 0-1 laat zien dat deze mengvarianten niet tot extra (of minder) biogasproductie leiden.

Een verdunning van het monster (lagere inoculum tot substraat verhouding) resulteert in een lagere methaanproductie. De methaanproductie staat in verhouding tot de OS van het monster, waaruit blijkt dat ook verdunnen geen effect heeft op de vergistingsefficiëntie. Wel blijkt dat de methaanproductie eerder begint af te vlakken; dit wordt veroorzaakt doordat bij een lage substraatdosering de hoeveelheid substraat eerder de concentratie bereikt waarin het substraat limiterend is in de omzetting.

Er is een verhouding van 100mL inoculum en 300mL substraat (monster) ratio toegepast, zodat er maximaal gebruik gemaakt wordt van het aanwezige monster en de kans groter is dat een significant verschil met de blanco wordt waargenomen. Ook kan een keukenmachine op mixstand gebruikt worden om het inoculum met het monster te mengen, zonder dat dit de vergisting beïnvloedt.

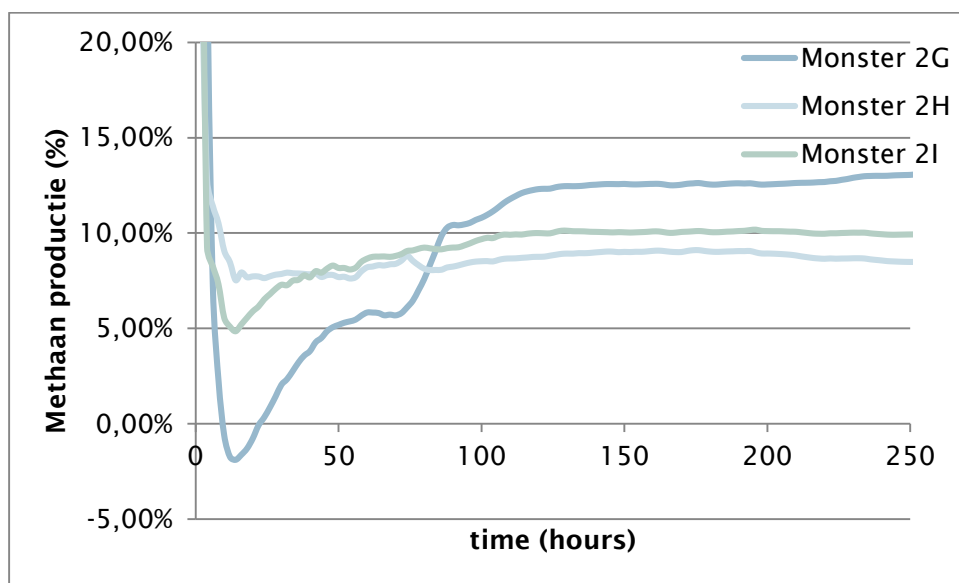


FIGUUR 0-1 HET EFFECT VAN MINGEN OP DE METHAANPRODUCTIE TIJDENS DE VERGISTING.

Bijlage III AMPTS II interpretatie

De AMPTS II resultaten kunnen op verschillende manieren bekeken en geanalyseerd worden. De standaard methode, zoals geadviseerd door de leverancier Bioprocess Control (Zweden), is uitgewerkt in het hoofdstuk “Materiaal en methoden”(zie hoofdstuk 4). Deze methode maakt het mogelijk om te beoordelen hoeveel procent de methaanproductie van een behandeld monster is verbeterd ten opzichte van een blanco (onbehandeld monster).

In de praktijk kan het echter mogelijk zijn dat deze verbetering wel zichtbaar is in het begin van de vergisting, omdat het materiaal “gemakkelijker” toegankelijk is, maar dat dit later niet het geval blijkt te zijn, omdat er uiteindelijk evenveel substraat aanwezig blijkt te zijn. Om dit in kaart te brengen zou ervoor gekozen kunnen worden om het verschil in percentage methaanproductie in de tijd uit te zetten. Voor monsters X, Y en Z, behandeld zoals beschreven in Tabel 4-2, is dit profiel weergegeven als Figuur 0-2.



FIGUUR 0-2 PERCENTAGE METHAANPRODUCTIE VERBETERING VAN MONSTER TEN OPZICHTE VAN DE BLANCO IN DE TIJD.

Figuur 0-2 laat zien dat er in het begin van het experiment een groot verschil voorkomt, maar dat dit uiteindelijk stabiliseert. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat in het begin nog amper methaan wordt gevormd, waardoor de verschillen erg sterk tot uiting komen.

Het blijkt echter dat andere monsters, ook na 100 of 200 uur nog, schommelingen laten zien in het percentage methaanvorming. Deze schommelingen zijn groter voor monsters met meer substraat (300 mL substraat en 100mL inoculum), dan voor monsters waarbij het grootste deel bestond uit inoculum (100 mL substraat en 300 mL inoculum. Het inoculum bestond uit uitgegist slib, waardoor er een stabielere productie van methaan verwacht kon

worden, en er minder schommelingen in de grafieken die het percentage verschil weergeven verwacht werden.

De schommelingen worden in ieder geval niet veroorzaakt door plotselinge openingen van het klepje, die geregistreerd worden als productie van 9 mL biogas. Bioprocess control heeft toegelicht dat de wiskunde achter de AMPTS II interpretatie maakt dat het openen van zo'n klep niet resulteert in een trapsgewijze methaanproductie. De methaanproductie wordt gemiddeld over de hele productielijn.

Bijlage IV Resultaten van ontwaterbaarheidstest

TABEL 0-1 ONTWERBAARHEIDSRÉSULTATEN VAN MONSTERS C EN D

Monster	Ontwaterbaarheid (%)
Inoculum 1	20.77%
Inoculum 2	21.54%
Inoculum 3	20.00%
Blanco 1	16.19%
Blanco 2	21.17%
Blanco 3	15.23%
Monster C1	18.49%
Monster C2	16.40%
Monster C3	16.54%
Monster D1	17.89%
Monster D2	18.21%
Monster D3	16.26%

Uit de resultaten van de ontwaterbaarheidstest (Tabel 0-1) blijkt dat voor eenzelfde monster een grote variatie in ontwaterbaarheid gemeten wordt. Aangezien een klein verschil in percentage al een grote invloed op de financiële haalbaarheid heeft, kunnen de resultaten niet gebruikt worden om de financiële haalbaarheid te onderbouwen.

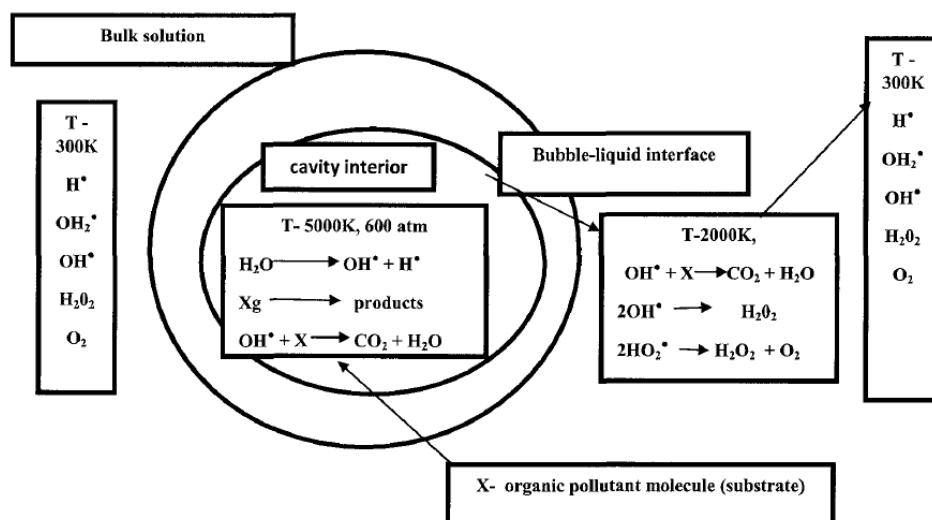
Bijlage V Alternatieve toepassingen actieve hydrodynamische cavitatie

Mogelijk kan cavitatie ook toegepast worden voor andere doelen, zoals effectieve destructie van organische microverontreinigingen of desinfectie van gecontamineerde waterstromen.

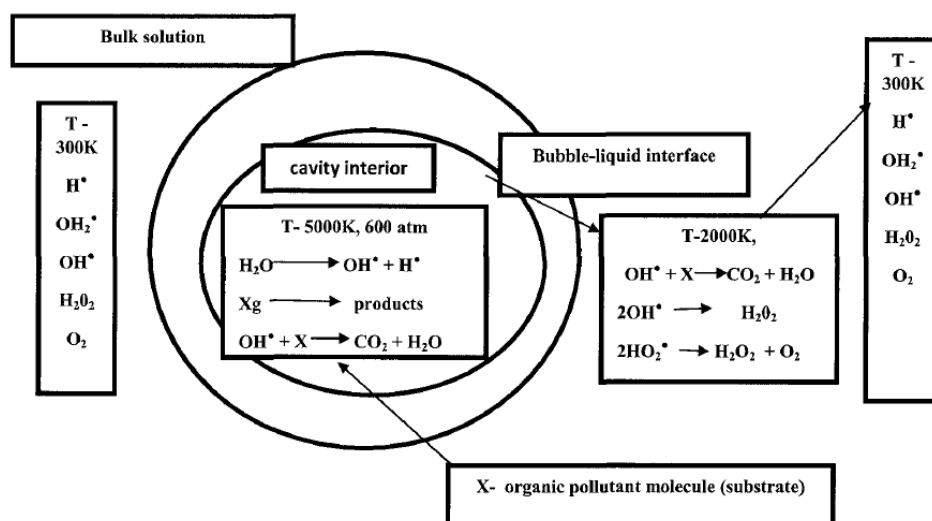
Er is de laatste jaren steeds meer aandacht gekomen voor de aanwezigheid van organische microverontreinigingen in oppervlaktewater. Vooral de aanwezigheid van geneesmiddelen staat de laatste tijd steeds meer in de belangstelling, ook internationaal gezien. Geneesmiddelen komen in het oppervlaktewater terecht via RWZI's, die niet zijn ontworpen om dergelijke verbindingen uit het afvalwater te verwijderen. De omzetting van organische microverontreinigingen in RWZI effluent is vrij kostbaar, doordat het effluent in de regel ook een hoge concentratie natuurlijk organisch materiaal bevat.

Cavitatie-processen, waarbij de gevormde bellen imploderen, genereren lokaal hoge drukken en temperaturen. Hierdoor kunnen stoffen ontleden, en dat maakt dergelijke processen interessant voor de omzetting van organische microverontreinigingen als ibuprofen (Madhavan, Grieser et al. 2010), orange-C (Madhavan, Grieser et al. 2010), carbamazepine (Braeutigam, Franke et al. 2012, Zupanc, Kosjek et al. 2013), ibuprofen, naproxen, ketoprofen, diclofenac (Zupanc, Kosjek et al. 2013), imidacloprid (Patil, Patil et al. 2014), en p-nitrofenol (Capocelli, Prisciandaro et al. 2014). Net als bij veel andere AOPs, blijkt ook hierbij de pH van belang te kunnen zijn voor de effectiviteit van de omzetting. Onder zure omstandigheden werd bijvoorbeeld een hogere omzetting van orange-G gemeten, wat resulteerde in de vorming van aniline, fenol en een aromatisch hydroxylamine (Madhavan, Grieser et al. 2010).

Cavitatie kan op verschillende manieren worden opgewekt. Bij hydrodynamische cavitatie wordt vloeistof met hoge snelheid door een vernauwing geleid, maar het meest wordt in de literatuur toch wel ultrasoon geluid toegepast om cavitatie op te wekken (Tijani, Fatoba et al. 2014). Bij het imploderen van de gevormde bellen ontstaan plaatselijk temperaturen tussen 3000 en 5000 K en drukken tussen 500 en 10.000 atm., wat vergelijkbaar is met wat er tijdens hydrodynamische cavitatie gebeurt. Doordat onder deze omstandigheden water ontleedt worden er hydroxylradicalen gevormd, maar het blijkt dat er ook zuurstof- en waterstofradicalen worden gevormd. Dat laatste kan dan weer verder reageren met zuurstof, waarbij peroxide radicalen ($\text{HO}_2\cdot$) en waterstofperoxide (H_2O_2) worden gevormd. Dat op deze manier organische micro's (als ibuprofen) en pesticiden ((thiabendazool, acetamiprid en imazalil) kunnen worden omgezet is door meerdere auteurs beschreven (Méndez-Arriaga, Torres-Palma et al. 2008, Madhavan, Grieser et al. 2010, Rivas Ibáñez, Esteban et al. 2015). Het voordeel van US ten opzichte van UV is dat het ook toepasbaar is in troebel water en water met een lage UV-T. Het reactiemechanisme is weergegeven in Figuur 0-3.



Figuur 0-3



FIGUUR 0-3: REACTIEMECHANISMEN TEN GEVOLGE VAN CAVITATIE IN US-AOPS (TIJANI, FATOBA ET AL. 2014)

Ook allerlei combinaties van US-AOP met andere technieken worden beschreven voor de omzetting van organische microverontreinigingen, als elektrohydraulische ontlading, heterogene fotokatalyse door TiO_2 of homogene catalyse met behulp van Fe^{2+} (Madhavan, Grieser et al. 2010, Madhavan, Grieser et al. 2010, Tijani, Fatoba et al. 2014), toevoeging van ozon (Gogate 2007, Matilainen and Sillanpää 2010, Gogate, Mededovic-Thagard et al. 2014, Gogate and Patil 2014), van H_2O_2 voor de afbraak van neonicotinoïden (Raut-Jadhav, Saharan et al. 2013, Raut-Jadhav, Saharan et al. 2013) en combinatie met UV (Madhavan, Grieser et al. 2010, Xu, Chu et al. 2015). Ook wordt US-AOP wel bestudeerd in combinatie met een nageschakelde biologische omzettingsschap, maar dergelijke technieken worden voornamelijk zeker niet op grote schaal toegepast. Hoewel er allerlei literatuur te vinden is over US-AOPs, worden dergelijke technieken voorlopig meestal op kleine, laboratorium- en eventueel pilotschaal, toegepast.

Hydrodynamische cavitatie is iets minder ver ontwikkeld dan cavitatie gebaseerd op US, maar komt ook voor in de literatuur. Capocelli et al. (Capocelli, Prisciandaro et al. 2014) beschrijven de omzetting van p-nitrofenol met behulp van hydrodynamische cavitatie, opgewekt met behulp van een Venturi-buis. Prisciandaro et al. (Prisciandaro, Capocelli et al. 2014) combineerden hydrodynamische cavitatie met een Fenton-proces of met toevoeging van persulfaat, om op die manier een AOP te verkrijgen voor de omzetting van p-nitrofenol. Dular et al. hebben het effect van cavitatie onderzocht op de afbraak van organische microverontreinigingen, en de inactivatie van bacteriën en virussen. Zij concluderen dat hydrodynamische cavitatie relatief eenvoudig is op te schalen, een robuuste techniek is die continu kan worden bedreven, en in veel gevallen efficiënter werkt dan cavitatie gebaseerd op US (Dular, Griessler-Bulc et al. 2016).

Mogelijk kan hydrodynamische cavitatie dus ook worden toegepast bij de zuivering van afvalwater (Dular, Griessler-Bulc et al. 2016, Liu, Zhu et al. 2016, Tao, Cai et al. 2016), of in drinkwaterzuivering. Volgens enkele recente publicaties zou hydrodynamische cavitatie ook geschikt zijn om water te desinfecteren (Badve, Bhagat et al. 2015) (Zhou, Zhao et al. 2016) (Chen, Dong et al. 2016, Gaikwad and Ranade 2016, Liu, Zhu et al. 2016, Zhang, Dong et al. 2016). Jyoti c.s. combineerden cavitatie met de toevoeging van H_2O_2 of O_3 om desinfectie te bewerkstelligen (Jyoti and Pandit 2004, Jyoti and Pandit 2004). Dergelijke combinaties lijken succesvol, maar de kosten vormen nog een belemmering voor implementatie in de praktijk. Wellicht dat door verdere ontwikkelingen cavitatie in de toekomst (kosten)efficiënter ingezet kan worden, wat het economisch rendabeler maakt.

In deze artikelen gaat het echter om de inactivatie van bacteriën, maar virussen zijn natuurlijk nog kleiner, en daardoor mogelijk minder gevoelig voor cavitatie. Dular et al. hebben vastgesteld dat bacteriën goed kunnen worden geïnactiveerd door middel van hydrodynamische cavitatie, maar zij hebben ook bestudeerd wat er met het Rotavirus gebeurt tijdens hydrodynamische cavitatie (Dular, Griessler-Bulc et al. 2016). Deze auteurs vonden dat in hun opzet 75% van het virus kon worden verwijderd, en dat het dus mogelijk een heel interessante techniek is voor desinfectie. Zij geven aan dat verdere experimenten moeten worden uitgevoerd om de invloed van een dergelijk proces op virussen goed te kunnen vaststellen.

Daarnaast zou hydrodynamische cavitatie wellicht gebruikt kunnen worden voor het verwerken van algen. Algen kunnen efficiënt ingezet worden in de afvalwaterzuiveringsbehandeling. Algen kunnen ook interessante en waardevolle producten produceren: caroteen, eiwitten, vetten en dergelijke. Momenteel is de techniek om algen in te zetten voor de productie van deze componenten al ver ontwikkeld, maar het lukt nog niet goed om deze producten kostenefficiënt uit algen te winnen. Algen kunnen producten maken die kunnen worden toegepast in de voedingsmiddelen- of farmaceutische industrie. Voorbeelden hiervan zijn *Spirulina* (die o.a. proteïne, koolhydraten, caroteen, pigmenten, vitamine B12 en E, en Omega 3 & 6 produceert), en *Chlorella* (met een hoog proteïne- en vetgehalte, en vitamine en omega 3 & 6 vetzuren). Door de algen met behulp van vibrocavitatie open te breken, kunnen deze producten, en met name caroteen, mogelijk veel effectiever worden gewonnen, waardoor de productie zal toenemen.