

PILOTONDERZOEK HYDROTHERMALE BEWERKING VAN ZUIVERINGSSLIB MET TORWASH[®]



RAPPORT

2020
26

PILOTONDERZOEK HYDROTHERMALE BEWERKING VAN
ZUIVERINGSSLIB MET TORWASH®

RAPPORT

2020

26

ISBN 978.90.5773.887-6



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS P. Nanou (TNO)
F. Sebastiani (TNO)
L.J. de Legé (TNO)
J.R. Pels (TNO)
W.J.B.M. Driessen (Paques)
H. Kuipers (Waterschap Zuiderzeeland)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Ad de Man (Waterschapsbedrijf Limburg)
George Zoutberg (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Jack Jonk (Jack Jonk Advies Water)
Leon Korving (Aiforo)
Merle de Kreuk (Technische Universiteit Delft)
Rob van De Sande (Waterschap Aa en Maas)
Willy Poiesz (Waterschap Noorderzijlvest)
Yede van der Kooij (Wetterskip Fryslân)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2020-26
ISBN 978.90.5773.887.6

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

TEN GELEIDE

Veelbelovende resultaten pilotonderzoek Torwash. De techniek realiseert een grote reductie van het af te voeren slibvolume en vraagt bovendien, in tegenstelling tot gangbare technieken, geen hulpstoffen (poly-elektrolyt) meer voor de ontwatering.

De Nederlandse waterschappen werken hard aan het terugwinnen van energie en grondstoffen op de rioolwaterzuiveringen en aan het verlagen van hun milieu-impact. Daarnaast hebben de ervaringen in de afgelopen jaren laten zien dat zekerheid over de afzetmogelijkheden van zuiveringsslib van groot belang is.

In dit kader kan de TORWASH® techniek een rol van betekenis spelen.. Het eindproduct van TORWASH® is een pellet die bruikbaar is voor bijstook in biomassa energiecentrales of cementovens. TORWASH® vertoont overeenkomsten met bestaande technieken voor thermische drukhydrolyse of hydrothermale carbonisatie van slib, maar wijkt van deze technieken af door een hele specifieke keuze van de procescondities en uitvoering van de reactor. Deze condities leiden tot een interessante combinatie van slibreductie en ontwaterbaarheid.

Het huidige rapport presenteert de resultaten van pilot onderzoek op de awzi Almere. Dit onderzoek is geïnitieerd door TNO (voorheen ECN) in samenwerking met waterschap Zuiderzeeland. Het project is gefinancierd door een subsidie van de Topsector Energie van het ministerie van Economische Zaken en een bijdrage van STOWA. De resultaten van dit onderzoek geven inzicht in de massa- en energiebalansen en geven op basis daarvan een eerste inschatting van de economisch potentie en duurzaamheidsvoordelen. Deze evaluatie laat zien dat er potentie is voor deze techniek. Een integrale vergelijking met andere slibbehandelingstechnieken is echter nog niet uitgevoerd, maar dit rapport bevat wel de informatie die hiervoor nodig is. Aangetoond is dat het eindproduct van TORWASH® bruikbaar is als brandstof. Hoewel de TORWASH® behandeling een verbetering van de brandstofeigenschappen realiseert, zal de afzet van de TORWASH® pellets vermoedelijk grotendeels vergelijkbaar zijn met de huidige afzet van thermisch gedroogd slib. De haalbaarheid van deze afzet zal bepalend zijn voor de marktpotentie van TORWASH® in de Nederlandse slibmarkt.

Inmiddels zijn er plannen voor een verdere opschaling van TORWASH® door de realisatie van een demonstratiefaciliteit. De huidige onderzoeksresultaten en inzichten zijn belangrijk bij de voorbereiding van deze plannen en het formuleren van de onderzoeksdoelen. Langere duurtesten, een integrale vergelijking met andere technieken en de afzetbaarheid van de TORWASH® pellets zullen daar in ieder geval onderdeel van moeten zijn.

Deze verdere stappen dragen bij aan een verdere verduurzaming van de huidige slibafzet van de Nederlandse waterschappen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Dit rapport geeft de resultaten weer van het project waarbij de TORWASH®-technologie op pilot-schaal is gedemonstreerd als bewerkingstechnologie voor zuiveringsslib.

TORWASH® is een door Energie Onderzoek Centrum Nederland (ECN) thans TNO ontwikkelde technologie om natte biomassa stromen geschikt te maken als biobrandstof. Deze technologie wordt door STOWA in 2011 in een studie slibketen II omschreven als een veelbelovende technologie. In de periode 2015 – 2017 hebben Waterschap Zuiderzeeland en ECN deze technologie veelvuldig beproefd op laboratoriumschaal met verschillende soorten zuiveringsslib. Deze proeven lieten zien dat deze technologie een flinke bijdrage zou kunnen leveren om de hoeveelheid zuiveringsslib te reduceren en meer duurzame energie uit zuiveringsslib te produceren. Ook het terugwinnen van fosfaat uit zuiveringsslib kon mogelijk door TORWASH® worden vergroot. Dit onderzoek heeft aan de basis gestaan van het in dit rapport beschreven pilotonderzoek.

Het project bestond uit voorbereidende laboratoriumtesten om de optimale omstandigheden te bepalen en een serie pilottesten in mobiele TORWASH®-installaties. Het pilotonderzoek is uitgevoerd op de afvalwaterzuiveringsinstallatie Waterschap Zuiderzeeland te Almere. De TORWASH®-pilotinstallatie met een capaciteit van 25-50 liter ingedikt zuiveringsslib per uur, is van september 2018 tot en met mei 2019 gebruikt voor diverse proeven. Ook zijn verschillende proeven gedaan met pilot membraanfilterpersen van Boskalis en Limburg Filter om te bepalen wat de ontwateringsgraad is van zuiveringsslib bewerkt met de TORWASH®-technologie. Het filtraat na ontwatering is gebruikt voor proeven met een pilotinstallatie van Paques. Het filtraat is onderzocht op de vergistbaarheid, de stikstofverwijdering en fosfaat terugwinning.

Vorbereidende laboratoriumproeven zijn uitgevoerd op twee soorten zuiveringsslib: vergist en niet vergist slib. Laboratoriumresultaten toonden aan dat alle geteste varianten zuiveringsslib na de TORWASH®-behandeling ontwaterd konden worden tot een vaste koek met een droge-stofgehalte van 50-65% zonder toevoeging van poly-elektrolyt (PE) om de ontwateren te verbeteren. Ook voor het indikken van zuiveringsslib als voorstap voor het voeden de TORWASH®-behandeling is geen poly-elektrolyt gebruikt. Dit is in overeenstemming met de eerder behaalde resultaten op laboratoriumschaal. Het filtraat na ontwatering van zuiveringsslib behandeld met TORWASH® is ook op laboratoriumschaal beproefd. Deze proeven lieten een anaerobe afbreekbaarheid van de opgeloste organische droge stof zien van 60-75%. Deze resultaten vormden het uitgangspunt voor de pilottesten.

De pilotproeven zijn uitgevoerd met twee soorten zuiveringsslib, namelijk niet vergist slib van de AWZI Almere en vergist slib van de AWZI Dronten. Het slib voor de TORWASH®-installatie had een gemiddelde droge-stofgehalte van ca. 6%. De temperatuur in de TORWASH®-installatie zat tussen de 190-210°C in de hete zone van de reactor. De duurtesten tijdens het pilotonderzoek hebben meer dan 200 uur continue gedraaid. Het uitgaande product, na de TORWASH®-behandeling, had een droge-stofgehalte van ca. 3%. De omzetting van de vaste stof naar opgeloste stof was ruim 50%. Een succesvolle proef was direct zichtbaar omdat de vaste stof in de uitgaande stroom na een TORWASH®-behandeling direct bezinkt. De ontwatering van het uitgaande slib na de TORWASH®-behandeling is uitgevoerd door eerst het heldere superna-

tant, na bezinking, te decanteren en vervolgens het ingedikte zuiveringsslib met behulp van een membraanfilterpers uit te persen tot een helder filtraat en een vaste koek met een drogestofgehalte van gemiddeld 50% drogestof. Voor het persen is geen gebruik gemaakt van polyelektrolyt of andere hulpstoffen. De pilot-installatie bleek in staat om de resultaten van de laboratoriumproeven te reproduceren.

Proeven met de afvalwaterbehandelingspilot van Paques BV hebben aangetoond dat het afvalwater middels UASB/IC reactoren anaerob kan worden behandeld en CZV-verwijderingsrendementen van ~75% haalbaar zijn. Het hierbij geproduceerde biogas bevat gemiddeld 75 vol% methaan (CH₄). Verdunning van het afvalwater (1:1) leidde tot een hoger CZV-verwijderingsrendement. Na anaerobe zuivering bevat het afvalwater relatief hoge concentraties ammonium (NH₄) en mogelijk ook fosfaat (PO₄). Het gehalte aan fosfaat is onder meer afhankelijk van de in de hoofdstroom gebruikte methode voor defosfatering (biologische P-verwijdering zal eerder hogere fosfaatconcentraties in het rejectiewater tot gevolg hebben). Indien gewenst is het mogelijk om via een PHOSPAQ-reactor fosfaat uit het anaerob behandelde effluent te verwijderen en struviet te winnen uit het afvalwater. Verwijdering van ammonium uit het rejectiewater is mogelijk met het ANAMMOX[®] proces. Vanwege technische tegenslagen bij de pilotinstallaties zijn de rendementen van het anammox proces gebaseerd op kortdurende laboratorium experimenten (waarbij er geen inhibitie werd aangetoond) en op ervaring van succesvol draaiende ANAMMOX[®] full-scale installaties op TDH-rejectiewater.

Op basis van de gegevens die tijdens dit project zijn verzameld zijn massabalansen en Sankey diagrammen opgesteld. Deze geven aan waar de vaste stof en vloeistof van het zuiveringsslib voor de TORWASH[®]-behandeling naar toe gaan. Op basis van deze resultaten zijn berekeningen voor twee TORWASH[®]-business cases gemaakt, waaruit geconcludeerd kan worden dat de bewerking van en zuiveringsslib met de TORWASH[®]-technologie een verwachte kostenreductie van 47% kan opleveren ten opzichte van de huidige gangbare praktijk. Dit heeft met name te maken met het hoge droge stofgehalte van de slibkoek waardoor deze nuttig kan worden ingezet als brandstof in een biomassaenergiecentrale (BEC) of cement oven. Daarnaast wordt bij de TORWASH[®]-behandeling een flink deel van het organisch droge-stofgehalte van het zuiveringsslib opgelost. Dit deel kan omgezet worden naar biogas. Wanneer het TORWASH[®]-proces wordt gecombineerd met een voorafgaande vergisting van het zuiveringsslib kan een verwachte kostenreductie van 37% worden bereikt.

De overall conclusie is dat TORWASH[®]-technologie met succes is opgeschaald. Deze technologie die in 2011 door STOWA omgeschreven werd als veelbelovend, lijkt ook voor de Waterschappen veelbelovend om de hoeveelheid zuiveringsslib te verminderen, met een gunstigere CO₂ footprint door verdergaande mechanische ontwatering en geen gebruik te maken van hulpstoffen bij de ontwatering van zuiveringsslib. Dit is in de periode 2018-2019 tijdens een pilotonderzoek op AWZI Almere van waterschap Zuiderzeeland aangetoond.

Op basis van dit onderzoek wordt aanbevolen met een breder, door de waterschappen gedragen consortium een volgende fase van de doorontwikkeling van de TORWASH[®]-technologie te onderzoeken. Een voorbereiding voor een demonstratie installatie is inmiddels in gang gezet. Aandacht voor de afzetbaarheid van het TORWASH[®]-product is daarbij van belang evenals een uitgebreidere duurzaamheidsvergelijking met andere slibverwerkingstechnieken.

LEESWIJZER

RAPPORTINDELING

Het rapport is de openbare verslaglegging van het project EnCORE (Efficiënte Cascadering en Opwerking Zuiveringsslib voor Energie-neutrale bedrijfsvoering). Het is opgebouwd uit de volgende hoofdstukken:

1. Inleiding met korte uitleg over wat voorafging aan het EnCORE project, de onderliggende TORWASH®-technologie en de projectdoelen.
2. Beschrijving en resultaten van de laboratorium werkzaamheden. Deze vormen een afgerond geheel, inclusief conclusies die gebruikt zijn als voorbereiding en uitgangspunt voor de proeven met de pilot-installatie.
3. Beschrijving en resultaten van de proeven met de pilot-installatie in Almere.
4. Massabalansen over twee situaties, waarbij de resultaten van dit project gebruikt zijn om aan te geven wat het verschil is tussen de toepassing van TORWASH® voor vergist en niet-vergist slib.
5. Business cases, waarin voor twee situaties (niet vergist en vergist slib) uitgerekend is wat het economisch effect is.
6. Discussie op basis van de resultaten en doelstellingen van het project, aangevuld met een reeks specifieke punten.
7. Conclusies en aanbevelingen.

DOELGROEP

Het rapport is bedoeld om waterschappen inzicht te geven in de technische prestaties en economische perspectieven die van de TORWASH®-technologie en de voordelen ten aanzien van duurzaamheid in algemene zin verwacht mogen worden.

DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

PILOTONDERZOEK HYDROTHERMALE BEWERKING VAN ZUIVERINGSSLIB MET TORWASH®

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	LEESWIJZER	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Projectdoelen	2
1.2	TORWASH® technologie	2
1.3	BIOPAQ®IC-technologie	3
1.4	PHOSPAQ™ technologie	4
1.5	ANAMMOX® technologie	5
1.6	Achtergrond zuiveringslibben	5
2	VOORBEREIDEND LABORATORIUMONDERZOEK	7
2.1	Overzicht van experimenten	7
2.2	TORWASH® in de autoclaaf	7
2.3	Filtreren en persen van de slurry met een Carver Die	8
2.4	Vaste stoffen, gas- en afvalwateranalyses	9
2.5	Behandeling van filtraat van ontwatering	10
2.6	Resultaten en discussie	11
2.6.1	Optimale TORWASH®-omstandigheden	11
2.6.2	Verdeling van elementen	12
2.6.3	Karakterisering van filtraat op organische en stikstofverbindingen	14
2.6.4	Behandeling van filtraat van ontwatering	14
2.7	Aanvullende testen	15
2.8	Conclusies uit de voorbereidende experimenten	15
3	PILOTEXPERIMENTEN OP AWZI ALMERE	17
3.1	TORWASH®-pilot	17
3.2	Membraanfilterpersen	19
3.2.1	De DRTU-unit van Boskalis	19
3.2.2	De membraanfilterperseenheid van Limburg Filter B.V.	20
3.3	Proefinstallatie voor afvalwaterbehandeling	20
3.4	Pilot-experimenten met niet vergist zuiveringslib (AWZI Almere)	22
3.4.1	TORWASH®-testen	22
3.4.2	Filtraat- en gasanalyses	24
3.4.3	Behandeling filtraat van ontwatering	24
3.4.4	Ontwateringstesten	26
3.4.5	Massaopbrengst, energieopbrengst en verdeling van elementen	28

3.5	Pilot-experimenten met vergist zuiveringsslib van (AWZI Dronten)	29
3.5.1	TORWASH® experimenten	29
3.5.2	Effluent- en gasanalyses	30
3.5.3	Behandeling filtraat van ontwatering	30
3.5.4	Ontwateringstesten	32
3.5.5	Massaopbrengst, energieopbrengst en verdeling van elementen	32
3.6	Ephyra®-slib en vergist zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden	33
4	TOTALE MASSABALANSEN	35
4.1	Niet vergist zuiveringsslib (AWZI Almere)	35
4.2	Vergist zuiveringsslib (AWZI Dronten)	38
4.3	Effect rejectiewater op de werking van de RWZI	40
4.4	Nadroging van de TORWASH® slibkoek	41
4.5	Energiebalansen	42
5	TECHNISCH-ECONOMISCHE ANALYSE	44
5.1	Inleiding	44
5.2	Aannames	44
5.3	Investeringskosten	45
5.4	Operationele kosten	46
5.5	Business case	47
5.6	Duurzaamheid	49
6	DISCUSSIE	51
6.1	Algemene discussie	51
6.2	Specifieke zaken	52
6.2.1	Droge stof-gehalte, warmteoverdracht en roerbaarheid	52
6.2.2	Elementenverdeling	52
6.2.3	Tussentijds indikken	53
6.2.4	Meting biogasproductie	54
6.2.5	Metastabiel filtraat	54
6.2.6	Ammonium na beluchting	54
6.2.7	Fe, Ca en P verdeling	54
6.2.8	Het nut van PE	54
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	56
7.1	Conclusies technische vooruitgang	56
7.2	Conclusies businesscase	56
7.3	Conclusies en aanbevelingen voor opschaling	57
	REFERENTIES	59
BIJLAGE I	ANALYSE VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP LABORATORIUMSCHAAL – SLIB ALMERE	60
BIJLAGE II	ANALYSE VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP LABORATORIUMSCHAAL – SLIB LEEUWARDEN	62
BIJLAGE III	SUIKERANALYSE VAN EFFLUENTEN VERKREGEN UIT TORWASH®-PROEVEN OP PILOTSCHAAL	64
BIJLAGE IV	ANALYSES VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP PILOTSCHAAL – SLIB ALMERE	65
BIJLAGE V	ANALYSES VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP PILOTSCHAAL – SLIB DRONTEN	67
BIJLAGE VI	RESULTATEN TORWASH® OP LAB-SCHAAL	69

1

INLEIDING

Communaal zuiveringsslib is een afvalstroom die in rioolwaterzuiveringsinstallaties van de waterschappen wordt geproduceerd en die na transport grotendeels wordt verwerkt door verbranding. Circa de driekwart van al het geproduceerde zuiveringsslib wordt nog vergist voordat het wordt afgevoerd voor de eindverwerking ervan. De huidige situatie in Nederland rond de eindverwerking van zuiveringsslib laat zien dat er een tekort aan capaciteit is, ofwel er is te veel slib. Het is de verwachting dat dit tekort de komende jaren nog zal blijven bestaan. Reden temeer om in te zetten op verdergaande reductie van de hoeveelheid zuiveringsslib.

Met de bestaande ontwateringstechnologieën kan zuiveringsslib ontwaterd worden tot een droge-stofgehalte van 22-25%. Hierdoor wordt er veel water over de weg vervoerd en zal eerst dit water grotendeels uit het slib moeten worden verdampt voordat het verbrand kan worden. Ook worden voor de ontwatering flocculanten gebruikt. Deze flocculanten, polyelektrolyten (PE), worden gemaakt uit aardolie. Het gebruik van PE staat daarom steeds meer onder druk mede gezien de doelstellingen van de waterschappen rond duurzaamheid en klimaat. TNO heeft de hydrothermale slibbehandelingstechnologie TORWASH® ontwikkeld, die dankzij het gebruik van een innovatief reactor concept de potentie heeft de ontwatering te verbeteren zonder gebruik van flocculatiemiddel en tevens de kwaliteit van zuiveringsslib als brandstof te verbeteren. De milde thermische behandeling zorgt ervoor dat het filtraat van ontwatering goed vergistbaar is en maakt terugwinning van fosfor mogelijk. TORWASH® biedt het perspectief dat een natte afvalstroom omgezet wordt in gasvormige en vaste biobrandstoffen die geschikt zijn voor de opwekking van warmte en elektriciteit.

In 2015 zijn de eerste experimenten op laboratoriumschaal gedaan. In de periode tot 2018 zijn diverse experimenten uitgevoerd gericht op verbreding van de scope. Zo is TORWASH® bijvoorbeeld getest op meerdere soorten zuiveringsslib van verschillende AWZI/RWZI's. Op basis van die resultaten is besloten een consortium te vormen voor de doorontwikkeling van de technologie. Als eerste fase van deze doorontwikkeling is pilotonderzoek uitgevoerd met een kleinschalige mobiele TORWASH®-reactor.

Het onderzoek van de afgelopen jaren heeft geleid tot een versie van TORWASH® die specifiek is aangepast voor zuiveringsslib. Samen met Waterschap Zuiderzeeland en Paques BV heeft TNO het EnCORE project (Efficiënte Cascadering en Opwerking Zuiveringsslib voor Energie-neutrale bedrijfsvoering) uitgevoerd. Daarin is de werking van TORWASH® op pilotschaal verder onderzocht. Het project is financieel ondersteund door de partners, RvO en STOWA. Dit document beschrijft de resultaten van het vooronderzoek en het pilotonderzoek.

De pilotfase van het onderzoek naar TORWASH® voor zuiveringsslib is uitgevoerd in 2018-2019 op de AWZI Almere van het Waterschap Zuiderzeeland. TNO heeft een mobiel hydrothermaal reactorsysteem gemaakt op pilot-schaal. Voor het behandelen van het vrijgekomen filtraat is gebruik gemaakt van een mobiele pilot vergister van het type UASB (Upflow Anaerobe Slib

Bed) reactor in combinatie met een PHOSPAQ-struvietreactor en een ANAMMOX-reactor van Paques. Beide installaties zijn elk in een 20-voets container geplaatst bij de AWZI Almere. In de eerste runs is een deelstroom van gedeeltelijk ingedikt surplus slib zonder PE gebruikt (niet vergist). Vervolgens is ook vergist slib gebruikt van AWZI Dronten, RWZI Leeuwarden en Ephyra®-slib uit Tollebeek.

1.1 PROJECTDOELEN

In het EnCORE project (Efficiënte Cascadering en Opwerking Zuiveringsslib voor Energie-neutrale bedrijfsvoering) en het daarbij behorend onderzoek is het doel geweest om op pilotschaal de toepasbaarheid van een TORWASH®-behandeling in continue bedrijfsvoering van zuiveringsslib aan te tonen. Daarbij ligt de focus op: (1) een efficiënte mechanische ontwatering van het zuiveringsslib, (2) productie van biogas uit het filtraat, voldoende om tenminste de benodigde energie voor het TORWASH®-proces op te wekken, (3) terugwinning van fosfor uit de vloeistoffase als struviet, (4) geen gebruik van additieven (poly-elektrolyt) voor de ontwatering van zuiveringsslib na TORWASH®, (5) efficiënte omzetting van het vrijgekomen ammonium door middel van het Anamnox-proces, (6) inpassing van het totale concept op een bestaande afvalwaterzuiveringsinstallatie.

Overall is het doel het realiseren van een aanzienlijke vermindering van het volume af te voeren slib. Dit resulteert niet alleen in een aanzienlijke kostenverlaging, maar ook in de productie van twee biobrandstoffen, biogas en droog zuiveringsslib. Wanneer beide biobrandstoffen als zodanig ingezet worden, kan de totale CO₂-uitstoot van een afvalwaterzuivering lager uitvallen.

In 2018 is het TORWASH®-proces als mobiele pilotinstallatie gebouwd voor toepassing in het EnCORE project. De TORWASH®-pilotinstallatie heeft een maximale verwerkingscapaciteit van 50 liter slib per uur. Het hele traject - van basisengineering tot constructie en de eerste functionele testen - vond plaats bij TNO. Deze pilot is vervolgens in juli 2018 getransporteerd naar de AWZI Almere. In de periode juli 2018 tot oktober 2019 is daar onderzoek uitgevoerd. Aanvullende zijn meerdere soorten zuiveringsslib onderzocht. Ook zijn enkele aanpassingen aan het TORWASH®-reactorconcept onderzocht. In de periode oktober 2018 tot juli 2019 is onderzoek uitgevoerd naar de productie van biogas uit het filtraat, de terugwinning van fosfaat en de verwijdering van stikstof met behulp van de pilot van Paques. Ook zijn verschillende testen gedaan met ontwateringsapparatuur van Boskalis, Alfa Laval en Limburg Filter om de ontwaterbaarheid aan te tonen.

1.2 TORWASH® TECHNOLOGIE

Het TORWASH® principe is sinds 2004 bij ECN (inmiddels TNO) in ontwikkeling om vaste biobrandstof te maken uit zouthoudende, natte biomassa voor de vervanging van steenkool als brandstof. TORWASH® is een hydrothermale behandeling van biomassa met als oogmerk om dezelfde veranderingen te bewerkstelligen als torrefactie. Het voornaamste verschil ten opzichte van torrefactie is dat bij TORWASH® het proces in water en onder druk wordt uitgevoerd om te voorkomen dat het water gaat koken. Het is dus niet nodig om bij TORWASH® vooraf de biomassa te drogen en daarom aantrekkelijk voor natte biomassastromen. Het effect van TORWASH® op bijvoorbeeld gras is dat de cellulose bros wordt en diverse anorganische ionen, vooral K⁺ en Cl⁻ oplossen in de waterfase. Het vrije water met daarin opgeloste ionen kan mechanisch worden verwijderd, terwijl de brosse structuur samengedrukt wordt.

Biomassa wordt daardoor niet alleen ontwaterd, maar raakt ook een groot deel van de zouten kwijt. De juiste behandeling resulteert erin dat er kleine kanaaltjes overblijven in de perskoek waardoor het water weg kan stromen. TORWASH® kan een perskoek opleveren met een droge-stofgehalte van 50% tot 65% droge stof.

In de uitgeperste vloeistof, het filtraat, is een substantiële hoeveelheid organisch materiaal opgelost, waaronder (afbraakproducten van) vetzuren en suikers. Dit organisch materiaal is goed vergistbaar. De gehanteerde procestemperatuur in het TORWASH®-proces bepaalt in welke mate het materiaal vergistbaar is, waarbij geldt dat hoe hoger de temperatuur is, hoe minder goed vergistbaar het filtraat is. Afhankelijk van de grondstof liggen de optimale condities tussen 150-250°C met een verblijftijd van 10 tot 60 minuten.

In de periode 2015-2017 is onderzoek gedaan waaruit bleek dat TORWASH® ook goed toegepast kan worden op zuiveringsslib. Het eerste onderzoek [1] bevestigde dat perskoeken met 50-65% droge stof haalbaar waren en dat kalium en chloor ionen grotendeels met het filtraat werden afgevoerd [1]. Ook is in de periode 2016-2017 onderzoek gedaan naar de vergistbaarheid van het geproduceerde filtraat. Hierbij is aangetoond dat de vergistbaarheid afneemt bij toenemende reactietemperatuur [2,3] voor zowel niet vergist als vergist slib.

Bij behandeling van zuiveringsslib bij optimale TORWASH®-condities gaat ongeveer 50% van de organische stof vanuit de vast fractie zuiveringsslib in oplossing. Afhankelijk van het asgehalte zal 50-70% van de vaste stof in de perskoek achterblijven. De anorganische stoffen gaan gedeeltelijk in oplossing, maar dit varieert voor de diverse elementen. Door manipulatie van TORWASH®-condities (tijd, temperatuur en pH) is het mogelijk om tot op zekere hoogte de oplosbaarheid van fosfaat uit het zuiveringsslib te bepalen.

Door TORWASH® toe te passen op zuiveringsslib, kan biogas als brandstof uit zuiveringsslib worden geproduceerd. Het filtraat van de ontwatering bevat naast kalium veel organische stof, stikstof en fosfaat en zal nabehandeld moeten worden om de waterlijn van de betreffende zuivering niet over te belasten. Ook kan het opgeloste fosfaat als struviet worden teruggewonnen door het doseren van een magnesium. Het ontwaterde zuiveringsslib na TORWASH® kan als vast brandstof worden toegepast.

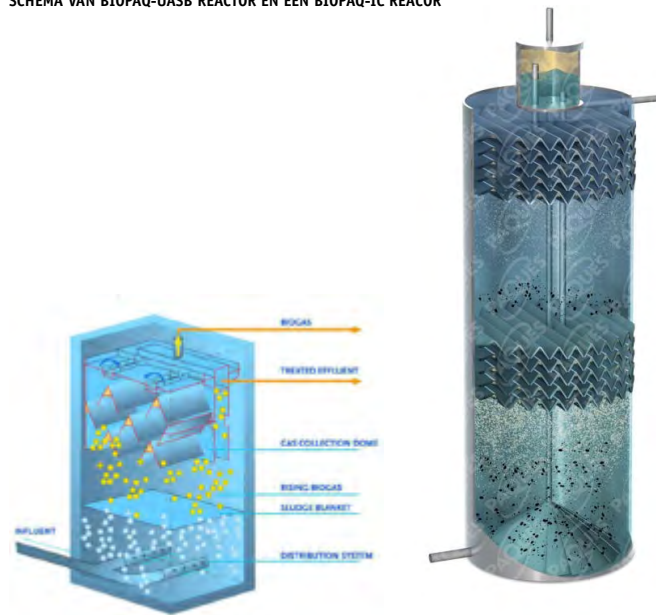
De TORWASH®-technologie is gebaseerd op twee innovaties. Ten eerste de keuze om te opereren in een specifiek, maar smal temperatuurgebied (180-210°C), heter dan thermische druk hydrolyse (TDH), kouder dan hydrothermale carbonisatie (HTC). Onder deze omstandigheden vindt naast ontsluiting ook milde torrefactie plaats van het slib, maar geen inkoling. Slib wordt daardoor minder hydrofiel, op een zodanige wijze dat diepe ontwatering zonder hulpstoffen mogelijk is. Hiermee onderscheidt TORWASH® zich van TDH. Anderzijds is de temperatuur zo mild dat opgelost organisch materiaal vrijwel volledig vergistbaar is tot biogas. Hiermee onderscheidt TORWASH® zich van HTC. De tweede innovatie is gelegen in het unieke reactorontwerp, die ook het toevoegen van een katalysator overbodig maakt. Voor de reactor en de onderliggende principes is een octrooi aangevraagd.

1.3 BIOPAQ®IC-TECHNOLOGIE

De anaerobe BIOPAQ®IC-technologie is een anaerobe vergistingstechnologie waarbij in feite twee UASB (Upflow Anaerobe Slab Bed) reactoren op elkaar geplaatst zijn en waarbij op basis van een interne circulatie (IC) het aanwezige korrelslib intensief gemengd wordt met het afval-

water (Figuur 1). De interne circulatie wordt aangedreven via een gaslift welke automatisch wordt geïntensiveerd bij hogere CZV-belastingen en verminderd bij lagere CZV-belastingen.

FIGUUR 1 SCHEMA VAN BIOPAQ-UASB REACTOR EN EEN BIOPAQ-IC REACOR

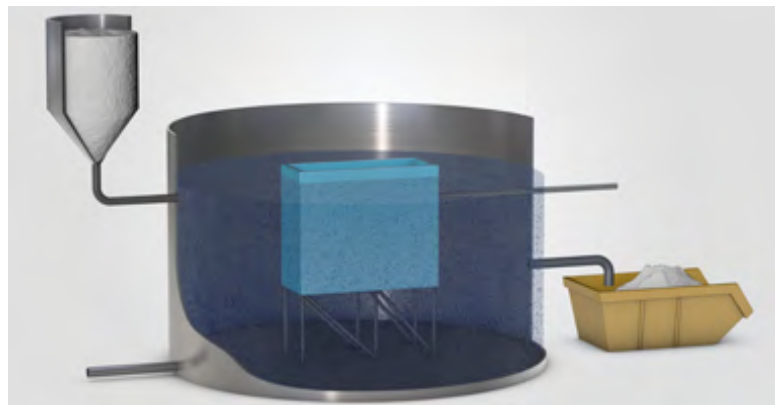


Het gebruik van anaerobe korrelslibreactoren op thermisch behandeld zuiveringsproces (Zimpro-proces) werd reeds succesvol toegepast op de AWZI Nieuwveer [4].

1.4 PHOSPAQ™ TECHNOLOGIE

PHOSPAQ is een technologie ontwikkeld voor de verwijdering en terugwinning van fosfaat (PO_4) uit waterstromen. De PHOSPAQ-reactor bestaat uit een beluchte reactor waarin magnesiumhydroxide wordt gedoseerd en er struvietkristallen (magnesium-ammonium-fosfaat - $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) worden gevormd (Figuur 2). De beluchting zorgt naast de menging van de struvietdeeltjes gelijktijdig ook voor de oxidatie van aanwezige BZV. In de reactor bevindt zich een speciale afscheider die het struviet scheidt van het behandelde afvalwater. Het gevormde struviet kan worden geoogst en afhankelijk van de toepassing worden opgewaardeerd tot meststof. De eerste PHOSPAQ-reactor is gebouwd in 2006 door Waterstromen bij energiefabriek Olburgen, waarbij het struviet van industrieel afvalwater wordt opgewerkt tot een hoogwaardige meststof [5].

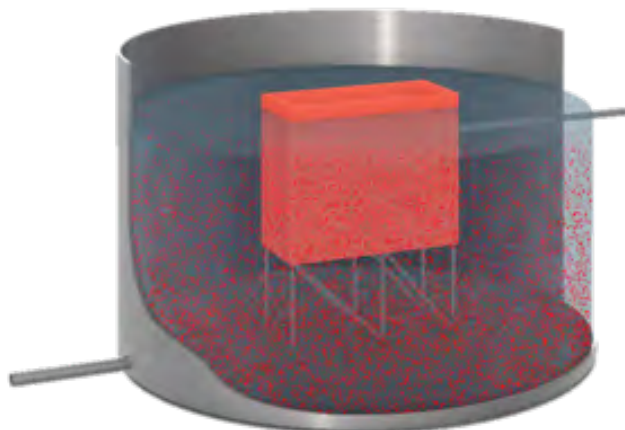
FIGUUR 2 SCHEMA PHOSPAQ™ REACTOR



1.5 ANAMMOX® TECHNOLOGIE

De ANAMMOX-technologie is een door Paques in samenwerking met de TU Delft ontwikkelde technologie voor de biologische verwijdering van ammonium uit waterstromen zonder gebruik te maken van een CZV-bron. De ANAMMOX®-reactor bestaat uit een beluchte tank waar met behulp van Anammox korrelslib via simultane partiële nitritatie ($\text{NH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$) en het anammox-proces ($\text{NH}_4 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2$) ammonium via nitriet direct wordt omgezet naar stikstofgas. $\text{NH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2$). In de reactor bevindt zich een biomassa-afscheider die het korrelslib scheidt van het gezuiverde afvalwater (Figuur 3).

FIGUUR 3 SCHEMA ANAMMOX® REACTOR



De ANAMMOX-reactor is inmiddels succesvol toegepast op rejectiewater van thermisch behandeld (TDH) zuiveringsslib bij energiefabriek Tilburg [6].

1.6 ACHTERGROND ZUIVERINGSSLIBBEN

Zuiveringsslib AWZI Almere

AWZI Almere kenmerkt zich door een actiefslibstelsysteem zonder voorbezinking. De verwijdering van fosfaat vindt grotendeels biologisch plaats. Zo nu en dan wordt polyaluminiumchloride gedoseerd ter bestrijding van de drijflaag. Doorgaans gebeurt dit tussen de maanden oktober en april. Een klein deel fosfaat in het zuiveringsslib zal dan ook aan aluminium gebonden zijn. Het surplusslib wordt gebufferd en ingedikd en daarna met centrifuges ontwaterd. In de sliblijn wordt alleen polyelektrolyt gedoseerd voor de slibontwatering.

Zuiveringsslib AWZI Dronten

AWZI Dronten is van het type actiefslib met voorbezinking. De verwijdering van fosfaat vindt deels biologisch plaats en deels chemisch. In de waterlijn wordt daartoe wisselend polyaluminiumchloride en natriumaluminaat gedoseerd. Het primaire slib wordt samen met het surplusslib (secundair slib) op AWZI Dronten vergist. In de gisting wordt ijzerchloride gedoseerd voor de verwijdering van H_2S . Het zuiveringsslib na vergisting wordt gebufferd en ontwaterd met behulp van een zeefbandpers. Naar verwachting zal het fosfaat in het ontwaterde zuiveringsslib voor 50% gebonden zijn aan aluminium en ijzer.

Zuiveringsslib RWZI Leeuwarden

De RWZI Leeuwarden is een actiefslibstelsysteem waarbij geen voorbezinking wordt toegepast. Bijna al het rioolwater komt via persleidingen binnen en een klein deel nog via een gemeentelijke vrij verval riool. De fosfaatverwijdering is zowel biologisch als ook chemisch; voor de

fosfaatverwijdering wordt deels zowel FeClSO_4 als ook Fe_2SO_4 gebruikt. Het retourslib loopt via een selector weer naar de actiefslibtanks. Het surplusslib wordt met behulp van flocculant via een mechanische bandindikker ingedikt tot ca. 6,5% droge stof en vervolgens in een vergistingsinstallatie gevoerd met een verblijftijd van 60 dagen. Dit vindt plaats in een tweetrapsproces. De eerste stap is een gemengde mesofiele gisting gevolgd door een niet gemengde koude gisting. Het residuslib wordt naar een slibbuffer gepompt en van daaruit per schip naar de centrale slibontwatering (SOI) te Heerenveen gebracht voor verdere verwerking. Op de SOI worden FeCl_3 en flocculant gebruikt voor verdere ontwatering van het slib tot ca. 23% droge stof. Het slib wordt vervolgens verbrand in de monoverbrander van SNB Moerdijk.

2

VOORBEREIDEND LABORATORIUMONDERZOEK

Als voorbereiding op het pilotonderzoek zijn diverse laboratoriumtesten met vergist en niet vergist zuiveringsslib uitgevoerd. Het doel van dit laboratoriumonderzoek was om een schatting te krijgen van de optimale procescondities (verblijftijd en temperatuur) voor het bedrijven van de TORWASH®-pilotreactor en de pilotinstallatie van Paques. De resultaten van het onderzoek zijn gebruikt als startpunt voor het testprogramma voor de TORWASH® pilot-installatie.

2.1 OVERZICHT VAN EXPERIMENTEN

Voorbereidend onderzoek is uitgevoerd op basis van achtergrondkennis en kleinschalige experimenten voor Waterschap Zuiderzeeland in 2015 [1]. Samen met een paar aanvullende experimenten is een experimentele procedure samengesteld voor dit project. Een grote autoclaaf van 20 L is gebruikt om TORWASH®-condities te benaderen, zodat een betrouwbare massaopbrengst bepaald kon worden en tevens voldoende materiaal te verkrijgen voor de vervolgtesten.

Experimentele procedure:

- Voor het laboratoriumonderzoek is vergist zuiveringsslib uit de RWZI Leeuwarden (Wetterskip Fryslân) gebruikt en niet vergist zuiveringsslib uit de AWZI Almere (zie voor achtergrond paragraaf 1.6);
- TORWASH®-testen zijn uitgevoerd bij 180°C, 190°C en 200°C bij 30 min. contacttijd in een 20-liter-autoclaaf;
- De inhoud van de autoclaaf na TORWASH® is gescheiden in een vloeistoffractie en een fractie met vaste stof. Het grootste deel van het vocht in de geproduceerde slurry is door middel van filtratie verwijderd;
- Uit de achtergebleven filterkoek zijn schijven (koekjes) geperst om de ontwaterbaarheid van het behandelde slib te bepalen;
- Het filtraat van de filtratiestap is door Paques gebruikt om de anaerobe afbreekbaarheid te bepalen en om inzicht te krijgen in de verwijdering van stikstof door het anammox-proces.

2.2 TORWASH® IN DE AUTOCLAAF

Voor de experimenten met zuiveringsslib is een roestvrijstalen vat van 20 liter als autoclaaf gebruikt dat indirect wordt verwarmd. Tijdens de testen is de autoclaaf hermetisch afgesloten. Temperaturen van 180°C en 190°C zijn aangehouden als TORWASH®-condities, gebruikt voor de behandeling van niet vergist zuiveringsslib (AWZI Almere) en 190°C en 200°C voor de

behandeling van vergist slib (RWZI Leeuwarden). De maximale druk wordt bepaald door de stoomdruk van de piektemperatuur. De autoclaaf werd 30 minuten stabiel bedreven op de ingestelde temperatuur. Figuur 4 geeft een weergave van de autoclaaf opstelling.

FIGUUR 4 AUTOCLAAF OPSTELLING EN VOORAANZICHT VAN DE 20-L AUTOCLAAF



In ieder experiment werd een hoeveelheid van ongeveer 15 kg ingedikt slib gebruikt. Het niet vergiste slib uit Almere bevatte ongeveer 1,5 kg droge stof (indamprest) en het vergiste slib uit Leeuwarden bevatte 0,6 kg droge stof (indamprest). De output van de autoclaaf na een TORWASH®-run was een bruine slurry. De lichte overdruk die na afkoelen overbleef geeft aan dat er gas gevormd is, voornamelijk CO₂.

2.3 FILTREREN EN PERSEN VAN DE SLURRY MET EEN CARVER DIE

Uit praktische overwegingen wordt de ontwatering in het laboratorium in twee stappen uitgevoerd. Eerst wordt de bulk van het vocht na TORWASH® via vacuümfiltratie onttrokken. De filterkoek wordt vervolgens uitgeperst in een hydraulische pers.

De TORWASH®-slurry werd gefilterd op een 2,7 micron glas-microvezelfilter onder vacuüm. Op het filter bleef een filterkoek achter, die de consistentie heeft van steekvaste pasta. Bij niet vergist slib had de filterkoek een droge-stofgehalte van 30%. In het geval van vergist slib bleef een filterkoek over met een droge-stofgehalte van 21-25%. Deze eerste filtratie verwijdert het grootste deel van de vloeistof. Het filtraat is helder en heeft een bruine kleur die vergelijkbaar is met die van thee.

In elk van de vier runs zijn vier monsters van ongeveer 35-40 gram uit de filterkoek genomen voor perstesten in een Carver Die, zie Figuur 5. Met een statische druk variërend tussen 20 en 65 bar zijn perskoeken geperst met boven en onder een 20 µm nylon filter. De samenstelling van het filtraat uit deze persstap is identiek aan het filtraat dat in de vacuümfiltratie wordt verwijderd.

FIGUUR 5

CARVER DIE (2¼") EN HYDRAULISCHE PERS BIJ TNO



2.4 VASTE STOFFEN, GAS- EN AFVALWATERANALYSES

Van elk ingaande en uitgaande slib of slurry wordt het gehalte droge stof (indamprest) bepaald. Dit wordt gedaan door te drogen in een oven op 105°C en onder atmosferische druk. Om de invloed van de inhomogene aard van de grondstof te minimaliseren, worden monsters van minimaal 50 gram (of een enkele schijf) gebruikt.

Het asgehalte van de vaste stof wordt bepaald door uitgloeien in een oven bij 550°C. Als alternatief kan het asgehalte in een snelle test een deelmonster in een Thermogravimetrische Analyse (TGA) gemeten worden tot er geen gewichtsafname meer meetbaar is. De TGA-methode geeft een grotere onzekerheid als gevolg van de kleinere omvang van het monster (minder representatief).

De massa-opbrengst is gedefinieerd als de hoeveelheid droge stof die na TORWASH® in het vaste product achterblijft, vergeleken met de hoeveelheid droge stof in de grondstof. Het energierendement wordt gedefinieerd als de hoeveelheid verbrandingsenergie die na TORWASH® in de vaste stoffen opgeslagen blijft, vergeleken met de hoeveelheid verbrandingsenergie in het bronmateriaal; beide op basis van droge stof. De hoeveelheid energie is dus gelijk aan de massa droge stof vermenigvuldigd met de calorische waarde op basis van de bovenwaarde (Higher Heating Value = HHV).

De brandstofanalyse (ultimate analysis) van de vaste stoffen wordt gedaan in een CHNO-analyser. Chloor, broom en fluor worden geanalyseerd met behulp van ion-chromatografie (IC). De andere elementen worden geanalyseerd met behulp van Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). Kwik wordt geanalyseerd met behulp van koude-damp atoomfluorescentiespectroscopie (Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectroscopy, AFS). De calorische waarde wordt bepaald door bom-calorimetrie.

Het filtraat van ontwatering van het niet vergiste slib na TORWASH®-behandeling is geanalyseerd met behulp van gaschromatografie, gekoppeld aan een massaspectrometer (GC-MS).

Tijdens de experimenten op pilotschaal, beschreven in Hoofdstuk 3 zijn incidenteel gasmonsters genomen met een gasbemonsteringszak en in het lab in Petten geanalyseerd met een Gaschromatograaf (GC).

2.5 BEHANDELING VAN FILTRAAT VAN ONTWATERING

In eerste instantie zijn watermonsters (na ontwatering van zuiveringsslib na TORWASH®) getest in het laboratorium van Paques met het zogenaamde OxiTop®-testsysteem, afgebeeld in Figuur 6. Met dit systeem kan vrij eenvoudig de anaerobe afbreekbaarheid van het opgelost organische stof (uitgedrukt als COD, Chemische Zuurstof Verbruik) worden bepaald.

Het OxiTop® systeem bestaat uit drie componenten:

1. De meetkopunit met druksensor, die met een interval van 20 min. een drukmeting kan uitvoeren in de kopruimte van een reactievat. Deze metingen worden opgeslagen in het geheugen van de head-unit en de gegevens kunnen worden ingevoerd door middel van een IR-verbinding.
2. De besturing leest de gegevens van de meetkopunit uit en kan deze in diagrammen weergeven, zodat de voortgang van de test kan worden weergegeven.
3. Door de gegevensverwerking via de RS232-verbinding met de besturingseenheid worden de gegevens met het ACHAT-programma geregistreerd en naar een Excel-spreadsheet gekopieerd voor berekening en rapportage.

Bovengenoemde testfaciliteit is gebruikt om (1) de anaerobe afbreekbaarheid te bepalen waarbij over tijd de hoeveelheid geproduceerd biogas wordt gemeten, en (2) de anammox toxiciteit, waarbij de hoeveelheid geproduceerd stikstofgas wordt vastgesteld.

FIGUUR 6 DETAILS VAN DE OXYTOP TESTFLESSEN (LINKER BOVENZIJDJE) MEETAPPARATUUR (RECHTER BOVENZIJDJE) EN DE TEMPERATUURGESTUURDE INCUBATORS (ONDERZIJDJE)



Voor de anaerobe biologische afbreekbaarheidstest is anaeroob korrelslib als inoculum gebruikt. Voor de anammox-toxiciteitstest zijn anammox-korrels gebruikt voor inoculatie. De

testen zijn uitgevoerd in temperatuur-gecontroleerde incubators bij 35°C. Voorafgaand aan het testen, zijn de monsters geneutraliseerd tot een pH van ongeveer 7. Een combinatie van een bicarbonaatbuffer en een voedingsoplossing die alle macro- en micro-elementen bevatte, werd aan de monsters toegevoegd. De testen zijn uitgevoerd op filtraat van (1) TORWASH® op niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere en (2) filtraat van TORWASH® op vergist zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden.

Nat-chemische analyses zijn uitgevoerd volgens de Hach-Lange kuvettentesten voor een snelle bepaling van o.a. CZV.

2.6 RESULTATEN EN DISCUSSIE

2.6.1 OPTIMALE TORWASH®-OMSTANDIGHEDEN

De serie laboratoriumtesten is gebruikt om de optimale temperatuur en andere procesomstandigheden vast te stellen van twee soorten slib.

De optimale omstandigheden worden bepaald aan de hand van drie criteria:

- a. **Opbrengst van vaste massa (solids yield).** Dit wordt gedefinieerd als de fractie van de droge stof die nog over is na de hydrothermale behandeling en filtratie.
- b. **Vochtgehalte / vaste stofgehalte van perskoeken.** De mate van ontwatering van het product is het belangrijkste criterium, zowel voor de reductie van het volume af te voeren slib als voor de netto energieopbrengst bij verbranding ervan. In de geperste schijven moet bij succesvolle TORWASH®-testen een gehalte van minstens 50% aan vaste stof zitten.
- c. **Look & feel van ontwaterd materiaal.** Hoewel enigszins subjectief, kan het door een ervaren persoon worden gebruikt om optimale TORWASH®-condities te identificeren. Typerend hiervoor is dat boven een bepaalde temperatuur het uitpersen van de hydrothermaal behandelde slurry opmerkelijk soepel gaat. Een andere aanwijzing is als de productslurry spontaan uitzakt. De vaste delen bezinken in een paar minuten en er ontstaat een duidelijke scheiding tussen vloeistof en slib.

De optimale temperatuur voor het gehele TORWASH®-proces is een compromis tussen twee trends; bij stijgende temperaturen kan de productslurry gemakkelijker mechanisch worden ontwaterd (hoger droge-stofgehalte in perskoek), wat wordt aangeduid door de aanzienlijke verhoging van het droge-stofgehalte van de geperste slibben. Anderzijds moet de temperatuur zo laag mogelijk zijn om goed anaeroob afbreekbaar filtraat te verkrijgen.

De resultaten van de laboratoriumexperimenten zijn weergegeven in Bijlage VI. Kort samengevat: na TORWASH® van niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere is het zuiveringsslib ontwaterbaar tot 51-54% droge stof. Voor vergist slib van RWZI Leeuwarden varieerde dit tussen de 64-66% droge stof. Het verschil wordt voornamelijk bepaald door het verschil in asgehalte. Het verschil in massaopbrengst als gevolg van variaties in temperatuur is niet groot. Ook de drogestofgehalten van de filterkoek vertonen weinig verschillen. Daarentegen zijn de verschillen in droge-stofgehalte van de perskoek wel groot. Voor niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere is vastgesteld dat een minimale behandelingstemperatuur van 190°C vereist is en voor het vergiste zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden 200°C. Deze waardes dienden als uitgangspunt voor de pilotexperimenten.

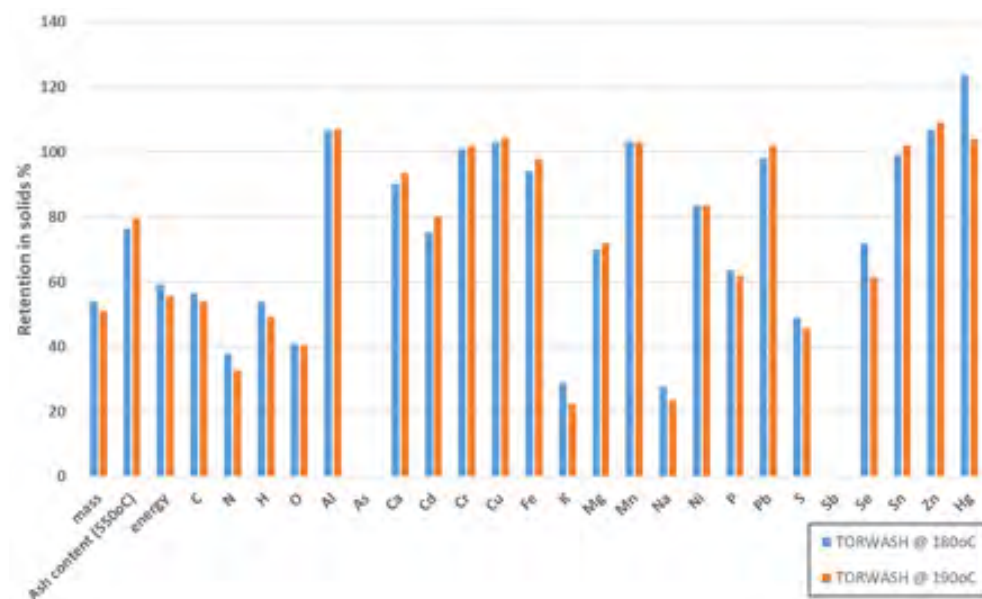
2.6.2 VERDELING VAN ELEMENTEN

De uitgangsmaterialen, ontwaterd zuiveringsslib en producten filterkoek en filtraat na TORWASH® zijn gewogen en geanalyseerd. Aan de hand daarvan zijn de massaopbrengst en de calorische energieopbrengst in de vaste stof berekend, alsmede de verdeling van afzonderlijke elementen over de producten. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7 voor de TORWASH®-testen met niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere en in Figuur 8 voor de resultaten met vergist zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden. In deze grafieken is 100% de hoeveelheid die oorspronkelijk in het uitgangsmateriaal zat. De grafieken geven aan welke fractie daarvan in de vaste stof (filterkoek) is terechtgekomen. Het ontbrekende deel is naar het filtraat gegaan en zal als filtraat in de nabehandeling (UASB, etc.) terecht komen. Een kleine hoeveelheid van voornamelijk C en O is in gasfase terechtgekomen. De gedetailleerde analyses die ten grondslag liggen aan deze grafiek zijn opgenomen in Bijlage II.

Voor zowel vergist als niet vergist slib geldt dat er geen opmerkelijke verschillen zitten tussen de resultaten van hetzelfde slib behandeld op de twee verschillende TORWASH®-reactietemperaturen. Tussen de verschillende slibsoorten zitten beperkte verschillen.

De resultaten van niet vergist zuiveringsslib van Almere geven aan dat 51-54% van de totale massa in de vaste stof is gebleven, zie ook Tabel VI 1. Van de calorische energie die in het droge slib zit is 55-60% in de vaste stof achtergebleven. De rest (40%) is in het filtraat terecht als opgeloste organische stoffen. Dit wordt ook weerspiegeld in de verdeling van koolstof (C).

FIGUUR 7 FRACTIE VAN MASSA, AS, ENERGIE EN ELEMENTEN VAN HET UITGANGSMATERIAAL, DIE TERECHT GEKOMEN IS IN HET VASTE PRODUCT NA TORWASH®-BEHANDELING VAN NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB UIT ALMERE IN EEN 20-L AUTOCLAAF



Een beperkt aantal elementen lijkt ruim boven de 100% in de vaste stof te blijven. Dit is het resultaat van onzekerheden in de analyses, die vooral verstorend werkt bij elementen die in zeer lage concentraties aanwezig zijn, zoals kwik (Hg).

De elementen kobalt (Co) en wolfram (W) zijn niet opgenomen in de grafiek, omdat de maalapparatuur die wordt gebruikt om de monsters voor analyses te malen deze elementen bevat. Hierdoor lijken de concentraties van deze elementen kunstmatig hoger. Deze elementen zijn

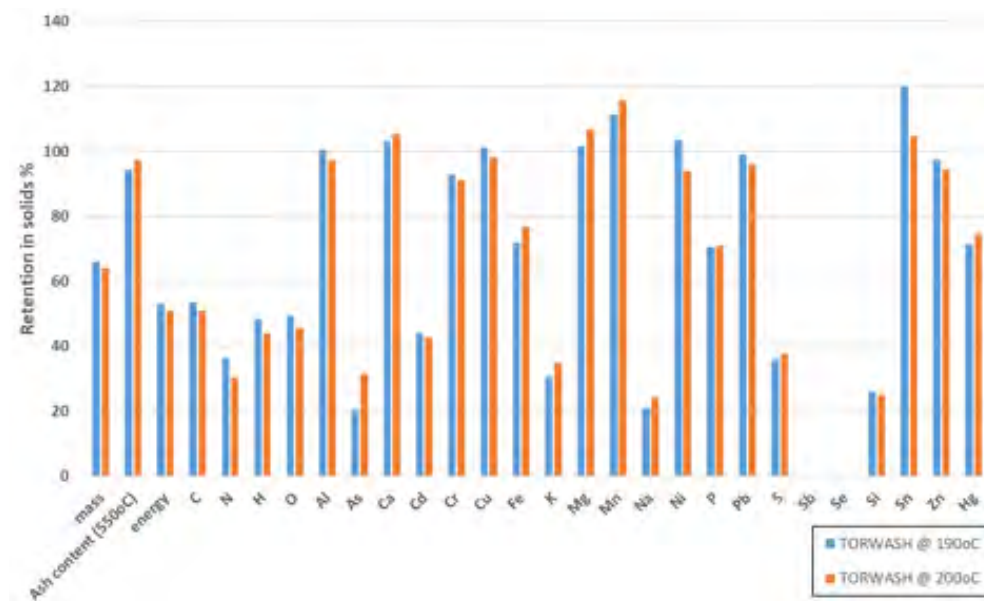
niet relevant voor de interpretatie van de resultaten.

Van kalium (K) en natrium (Na) lost het grootste deel op in de vloeistof en blijft slechts ca. 20% in de vaste stof achter. Zware metalen waaronder lood (Pb), nikkel (Ni), koper (Cu) en zink (Zn) worden grotendeels in de vaste stof vastgehouden (> 80%). De concentraties van arseen (As) en antimoon (Sb) zaten onder de detectielimiet. De rest van de zware metalen zoals ijzer (Fe), kwik (Hg), lood (Pb), cadmium (Cd) en tin (Sn) blijven ook grotendeels in de vaste fractie (> 80% retentie).

Naast koolstof (C) wordt ook zwavel (S) gelijkmatig verdeeld tussen de vaste stof en de vloeistof in dezelfde verhouding als de totale massa. Fosfor wordt voor 60% vastgehouden in de vaste stof. Van stikstof (N) blijft maar 30-35% achter in de vaste fractie.

FIGUUR 8

FRACTIE VAN MASSA, AS, ENERGIE EN ELEMENTEN VAN HET UITGANGSMATERIAAL, DIE TERECHT GEKOMEN IS IN HET VASTE PRODUCT NA TORWASH®-BEHANDELING VAN VERGIST ZUIVERINGSSLIB UIT LEEUWARDEN IN EEN 20-L AUTOCLAAF



De resultaten voor vergist slib van RWZI Leeuwarden, zie Figuur 8, zijn in grote lijnen vergelijkbaar met die van niet vergist slib van AWZI Almere. Toch zijn er belangrijke verschillen afgezien van de hogere totale massa-opbrengst. Het belangrijkste verschil is dat cadmium (Cd), ijzer (Fe) en kwik (Hg) voor een groter gedeelte in de vloeibare fase kan worden opgelost. Magnesium (Mg) is juist meer verschoven richting vaste stof.

De concentraties voor antimoon (Sb) en selenium (Se) zaten onder de detectielimiet en daarom zijn deze elementen niet in de grafiek opgenomen.

De resultaten, zoals weergegeven in Figuur 7 en Figuur 8 komen overeen met de eerder op laboratoriumschaal verkregen resultaten voor vergist zuiveringsslib van AWZI Dronten en niet vergist zuiveringsslib uit Lelystad [1].

2.6.3 KARAKTERISERING VAN FILTRAAT OP ORGANISCHE EN STIKSTOFVERBINDINGEN

Monsters van het filtraat na TORWASH®-behandeling van niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere zijn geanalyseerd op specifieke organische en stikstofverbindingen. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage VI (Tabel VI 3). Azijnzuur en mierenzuur zijn de enige organische verbindingen die in het filtraat kunnen worden gedetecteerd, evenals ammonium en nitraat. De andere stoffen waarop geanalyseerd is vielen onder de detectielimiet. Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) konden niet worden gedetecteerd (naftaleen, fenantreen en pyreen).

2.6.4 BEHANDELING VAN FILTRAAT VAN ONTWATERING

Op het filtraat van de ontwatering van de slibben na TORWASH® tijdens de laboratoriumexperimenten, zoals beschreven in sectie 2.6.1, zijn aanvullende analyses uitgevoerd door middel van natte chemische analyse. Ook is een test uitgevoerd op anaerobe biologische afbreekbaarheid (na meer dan 20 dagen) en een test op eventuele toxiciteit voor Anammox. Naast de anaerobe biologische afbreekbaarheidstest werd een parallelle referentietest uitgevoerd om eventuele structurele fouten in de test-opstelling te corrigeren. De toxiciteit op het Anammox proces is getest aan de hand van de slibactiviteit bij 3 voedingen met nitriet en vergeleken met het gemiddelde van de activiteiten die in referentiegevallen werden gevonden (typisch bereik: 0,1-0,4 g N/gODS.d). De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Bijlage VI.

De chemische samenstelling (zie Tabel VI 4 in Bijlage VI) wordt niet echt beïnvloed door een verschil van 10°C in bedrijfstemperatuur van het TORWASH®-proces op niet vergist zuiveringsslib.

Ondanks dat substantiële hoeveelheden N en P in de perskoek achterblijven zijn de ammonium- en fosfaatconcentraties in het filtraat hoog. Mogelijk vormt dit filtraat een aanzienlijke belasting voor de AWZI of RWZI, indien het onbehandeld aan de hoofdzuivering zou worden (terug)gevoerd. Een specifieke behandeling van het filtraat wordt daarom aanbevolen in gevallen waarbij de AWZI of RWZI al flink belast is. De hoge CZV en stikstofgehalten wijzen op de noodzaak van verdunning voorafgaand aan de verdere specifieke behandeling in de pilottest.

De anaerobe biologische afbreekbaarheid op de monsters van 190°C en 200°C bedroeg respectievelijk 73% en 67%, wat een vermindering van de biologische afbreekbaarheid met 6 procentiel bij de hogere bedrijfstemperatuur van 200°C laat zien. Dit is op zich niet veel maar past in de overall trend die laat zien dat vergistbaarheid van het filtraat afneemt bij toenemende temperatuur van de hydrothermale behandeling [2]. Wanneer de anaerobe biologische afbreekbaarheid bepaald wordt op basis van de hoeveelheid geproduceerd biogas, dan wijst dat op een hogere CZV-verwijdering (tot 90% voor respectievelijk 190°C en 200°C), wat in tegenspraak is met de bovenstaande data. Omdat de samenstelling van het biogas tijdens de testwerkzaamheden niet is geanalyseerd, is besloten het zuiveringsrendement te baseren op de verwijdering van oplosbaar CZV.

Ook voor vergist slib uit Leeuwarden (zie Tabel VI 5 in Bijlage VI) blijkt dat de chemische samenstelling niet echt beïnvloed is door het verschil in temperatuur van het TORWASH®-proces op vergist zuiveringsslib. En ook hier wijzen een hoge stikstofconcentratie in combinatie met de hoge pH-waarde erop dat verdunning nodig is om biologische remming van het anaerobe proces voor toekomstige continue anaerobe pilottesten te voorkomen.

De anaerobe biologische afbreekbaarheid van de met 190°C en 200°C behandeld zuiverings-slibmonsters was respectievelijk 66% en 62%, met een lagere biologische afbreekbaarheid van 4 procentiel bij de verhoogde temperatuur van 200°C. Het verschil is klein maar past in de overall trend. Ook hier duidde de anaerobe biologische afbreekbaarheid op basis van de hoeveelheid geproduceerd biogas op verschillende CZV-verwijderingsrendementen. De samenstelling van het biogas is tijdens de test niet geanalyseerd.

De Anammox-activiteit van alle vier de verschillende fracties filtraat lagen in het verwachte bereik van 0,1-0,4 gN/gVS.d. en lieten geen significant verschil zien tussen de verschillende temperaturen van het TORWASH®-proces.

De CZV concentratie van het filtraat op basis van het niet vergiste zuiveringsslib (ongeveer 50 g/L) was drie keer zo hoog als de CZV van het filtraat van het vergiste zuiveringsslib (ongeveer 17 g/L). De anaërobie biologische afbreekbaarheid van het filtraat van het niet vergiste zuiveringsslib is 67-73% (bij CZV van ongeveer 50 g/L), wat ongeveer 5-6% hoger was dan de biologische afbreekbaarheid op het vergiste zuiveringsslib bij 62-66% (bij CZV van ongeveer 17 g/L). Dit kan worden verklaard door het feit dat het grootste deel van het biologisch (goed) afbreekbare CZV al tijdens de vergisting van het slib voorafgaand aan de TORWASH®-behandeling wordt omgezet in biogas, waardoor er meer, lastiger biologisch afbreekbare CZV overblijft.

2.7 AANVULLENDE TESTEN

In aanvulling op de uitgebreide testen binnen het EnCORE project, zoals hierboven beschreven, zijn voor diverse monsters Ephyra®-slib uit Tollebeek, zuiveringsslib van de RWZI de Beemster en vergist slib uit Dronten ook TORWASH®-testen gedaan. De reden tot het uitvoeren van deze aanvullende testen is dat het een wens was ook andersoortig zuiveringsslib te testen. Het zuiveringsslib van AWZI Tollebeek is uniek gezien dit vergist is door middel van de Ephyra® technologie (propstroom vergister) en daardoor anders van samenstelling kan zijn. Dit geldt ook voor het slib van RWZI de Beemster: dit bevat flink minder cellulose door het toepassen van fijnzeven.

Deze aanvullende TORWASH®-experimenten leverden wat betreft opbrengsten aan massa en ontwaterbaarheid, zie paragraaf 2.3, dezelfde resultaten als voor de soorten zuiveringsslib die uitgebreid in het EnCORE project zijn getest. Perskoeken van 60-65% droge stof zijn voor deze soorten zuiveringsslib ook haalbaar. De ideale temperatuur ligt rond 190°C. Zuiveringsslib van de RWZI de Beemster ná installatie van de fijnzeef was lastiger. Het resulteerde in een lagere massaopbrengst, een hoog asgehalte en een matige uitpersbaarheid, die door een lichte verhoging van de behandelingstemperatuur weer te herstellen was.

2.8 CONCLUSIES UIT DE VOORBEREIDENDE EXPERIMENTEN

Voor zowel vergist zuiveringsslib uit Leeuwarden als niet vergist zuiveringsslib uit Almere is gevonden dat TORWASH® effectief is. De resultaten bevestigen het beeld dat voortkwam uit het verkennend onderzoek van 2015 [1], namelijk dat TORWASH® een technologie is om slib te behandelen, die hoge ontwaterbaarheid combineert met biogasproductie.

Voor elk van beide soorten slib zijn er weinig verschillen tussen de gekozen temperaturen (range 180-200°C), behalve in ontwaterbaarheid, die significant beter gaat bij de hogere temperatuur. Dit heeft een mindere omzetting van CZV in het filtraat naar biogas tot gevolg.

Tijdens het pilot-deel van het onderzoek zijn de gekozen condities het uitgangspunt voor verdere optimalisatie.

Op grond van de resultaten van het vooronderzoek is gekozen om de pilottesten met niet-vergist zuiveringsslib van de AWZI Almere te starten bij 190°C als eerste benadering van optimale condities. Voor het bepalen van de optimale TORWASH®-condities is de ontwaterbaarheid van de productslurry het leidende criterium. Binnen de mogelijkheden die dan open blijven wordt maximale productie van biogas in de nabehandeling van het filtraat nagestreefd.

Voor de latere experimenten met vergist slib van de AWZI Dronten is gestart met een proces-temperatuur die 10°C hoger ligt.

3

PILOT EXPERIMENTEN OP AWZI ALMERE

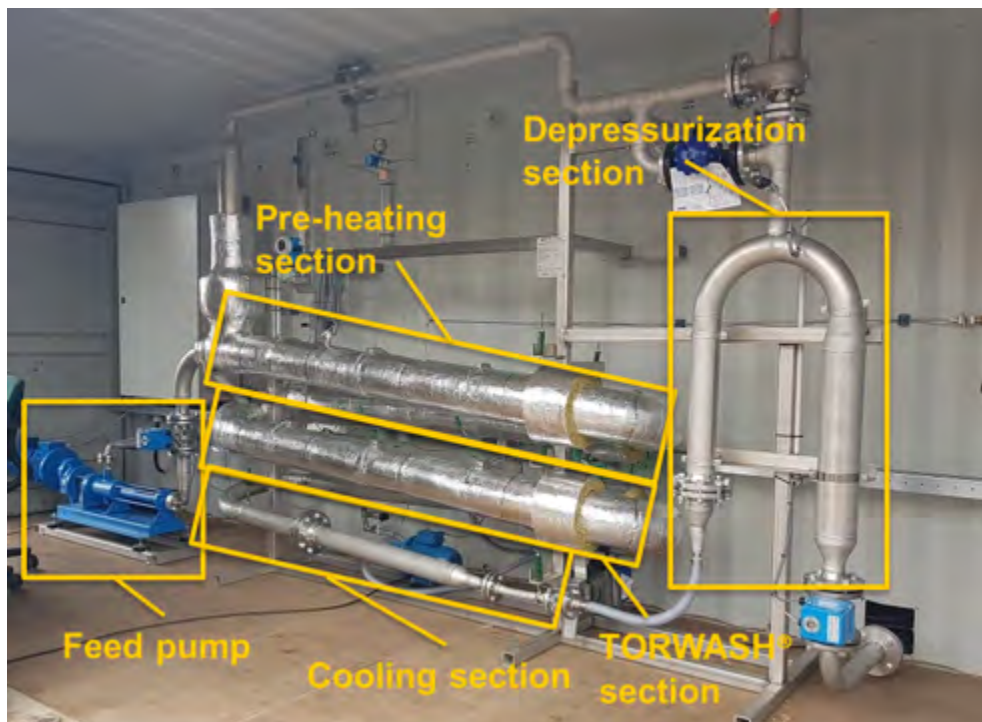
In dit hoofdstuk worden de werkzaamheden beschreven die met pilot-installaties zijn uitgevoerd. Dit betreft de TORWASH®-pilot van TNO die gevoed wordt met ingedikt vloeibaar zuiverings-slib. Ook tijdens het pilotonderzoek zijn zowel vergist als niet vergist slib langdurig getest. De productslurry van de hydrothermale behandeling is na een indikstap door bezinking in een membraanfilterpers van Boskalis en later in het jaar in een membraanfilterpers van Limburg Filter uitgerst tot een perskoek en filtraat. Het supernatant van de indikstap is behandeld in een pilotinstallatie van Paques. Deze installatie bestond uit een UASB vergister, een PHOSPAQ voor de terugwinning van fosfaat en een ANAMMOX-reactor voor de omzetting van stikstof.

3.1 TORWASH®-PILOT

De mobiele TORWASH®-pilotinstallatie is ontworpen in de periode oktober-december 2017 en gebouwd in de periode januari-juni 2018 als een mobiele eenheid. De pomp, de reactor en de drukaflaat staan in een 20-voets container. Voeding en koelwater komen elk uit een continu geroerde IBC-tank. De productslurry wordt opgevangen in een derde IBC-tank (niet geroerd). De installatie is ontworpen voor een verwerkingscapaciteit van 50 kg slib per uur, een maximum temperatuur van 250°C en een maximum druk van 25 bar. De unit is in juli 2018 geïnstalleerd in de slibhal van de AWZI Almere van partner Waterschap Zuiderzeeland. Figuur 9 toont de pilotinstallatie met daarin aangegeven verschillende onderdelen.

FIGUUR 9

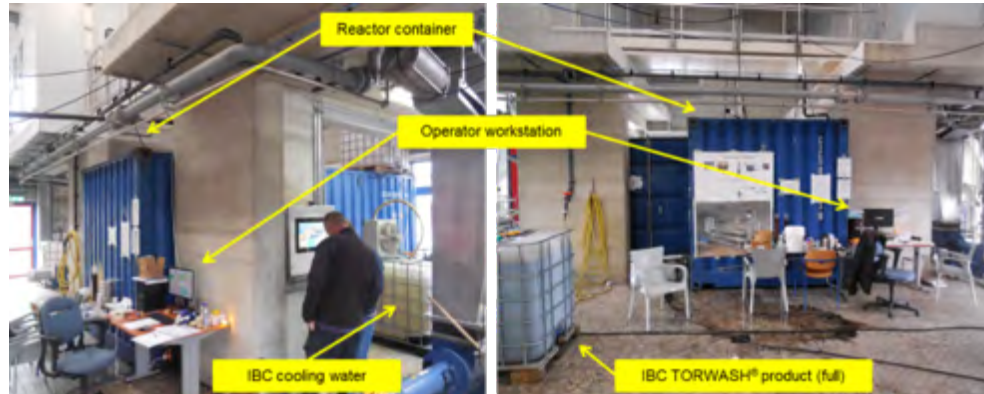
TORWASH®-PILOTINSTALLATIE VAN 50 KG/U IN EEN CONTAINER



Figuur 10 toont de opstelling bij de AWZI Almere. De werkplek van de operator is buiten de container. Tijdens de test mag om veiligheidsredenen niemand de container betreden. De toevoer van het ruwe slib uit de IBC-tank beschikt over een online meetinstrument die het droge-stofgehalte van het slib weergeeft. De afvoer van de reactor loopt ná de drukaflaatklep naar de IBC-tank voor opslag en bevat een klepsysteem en een buis voor bemonsteringsdoel-einden.

FIGUUR 10

ZIJAANZICHTEN VAN DE OPSTELLING IN HET GEBOUW VOOR DE VERWERKING VAN ZUIVERINGSSLIB AAN HET WATERSCHAP ZUIDERZEELAND IN ALMERE



De mobiele TORWASH®-installatie is een continue reactor en wijkt daarmee af van de autoclaaf die gebruikt is in de laboratoriumtesten. Opwarmen en afkoelen gaat veel sneller in de pilotinstallatie. De ingestelde temperatuur is de maximum temperatuur aan de wand, die in een autoclaaf na uren opwarmen bereikt wordt. De autoclaaf is goed geroerd en heeft een homogene inhoud en temperatuur. In de continue reactor is de ingestelde temperatuur de gemeten temperatuur, aan het einde van het reactieve deel van het systeem, vlak voordat de afkoelingssectie begint. De wandtemperatuur tijdens opwarmen en reactie is hoger. De reactor heeft dus niet één temperatuur en zuiveringsslib die langere tijd dicht bij de wand blijft kan dus warmer worden dan de ingestelde temperatuur.

Tijdens het testen met de TORWASH®-pilot zijn monsters genomen van het product na TORWASH®. In eerste instantie is de Carver Die gebruikt voor de ontwateringstesten. Later is overgegaan op testen met een laboratoriumfilterpers, Marecopers, omdat deze snel reproduceerbare testen opleverde en er een goede correlatie bestaat met de resultaten van de Carver Die. Telkens is een slibmonster na TORWASH® gefilterd op een papierfilter in een Büchnertrechter. De filterkoek werd vervolgens uitgeperst met behulp van de Marecopers die op Figuur 11 is afgebeeld. Het droge-stofgehalte van de perskoek geeft de ontwaterbaarheid van het zuiveringsslib na TORWASH® aan. Op die manier zijn de optimale reactieomstandigheden vastgesteld waarbij de ontwateringsresultaten van de Marecopers als indicator zijn gebruikt. Er is gestreefd naar een droge-stofgehalte van 50-55%. Dit is een droge-stofgehalte in perskoeken die 5-10 procentpunten lager ligt dan in de laboratoriumexperimenten. Dat is het gevolg van de beperking in de maximale druk van 12 bar in de Marecopers. In eerder laboratoriumonderzoek is gevonden dat bij goed gelukte TORWASH®-testen met 20 bar statische druk de maximale ontwaterbaarheid bijna wordt gehaald: 60-65% droge stof. Verhoging naar 65 bar levert een paar procentpunten verbetering, o.a. in het tempo waarin ontwaterd wordt. Daarboven is geen meetbare winst meer te behalen.

FIGUUR 11

LABORATORIUMPOTTESTERS (MARECO). 1-DRUKGELEIDINGSAS, 2-KOPS GELEIDINGSAS, 3-DRUKMETER, 4-DRUKS SCHAKELEND REDUCEERVENTIEL, 5-NOODSTOP, 6-TIJDREGLER, 7-DRUKS TOERENTALREGELAAR, 8-STARTSCHAKELAAR



3.2 MEMBRAANFILTERPERSEN

Voor de pilot ontwateringstesten van het met TORWASH® behandelde niet vergiste zuiverings-slib van AWZI Almere werd een filterpers van de firma Boskalis gebruikt. Voor het uitvoeren van ontwateringstesten van het met TORWASH® behandelde vergiste slib van de AWZI Dronten is gebruik gemaakt van een proefinstallatie van Limburg Filter BV.

3.2.1 DE DRTU-UNIT VAN BOSKALIS

Er zijn ontwateringstesten uitgevoerd met de proefinstallatie van Boskalis: de DRTU (Dewatering Research and Test Unit) (Figuur 12). Deze bevat een membraanfilterpers die slibben kan ontwateren tot een druk van 15 bar. Doorgaans wordt deze installatie door Boskalis gebruikt voor ontwateringstesten voor waterbodemslib / baggerspecie. De specificaties en instellingen van de DRTU zijn:

- De maximale vuldruk van de pers is 8 bar;
- Twee perskamers in serie kunnen tot 15 bar drukken;
- De inhoud van de membraanfilterpers is 21,4 liter;
- De perskamerdikte is 32 mm (2 x 16 mm filterplaatdikte). Deze kan verder verbreed worden tot een totaal van 40 mm door het toevoegen van vulstukken van 8 mm;
- De vulsnelheid van de pomp is variabel tussen 20-5000 l/h. Slib dat relatief gemakkelijk te ontwateren is, wordt meestal met 300 l/h in de pers gebracht.
- De filterdoeken hebben een doorlaatbaarheid van 400 l/m² (merk: marsyntex).

FIGUUR 12

DE DRTU-EENHEID VAN BOSKALIS



3.2.2 DE MEMBRAANFILTERPERSEENHEID VAN LIMBURG FILTER B.V.

Er zijn ontwateringstesten uitgevoerd met de membraanfilterpersen van Limburg Filter. De kern van de installatie bestaat uit een serie platen die twee perskamers in een polypropyleen-filter vormen, zodat twee filterkamers tegelijkertijd tot een druk van 16 bar kunnen worden geperst. Het toevoerdeel bestaat uit een tank met het te ontwateren zuiverings-slib, een pomp om het slib in de pers te pompen en een pomp voor de watertoevoer naar de membranen (zie Figuur 13).

FIGUUR 13

MEMBRAANFILTERPERS (LINKS) EN SLIBPOMPSTATION (RECHTS) VAN LIMBURGFILTER B.V.



3.3 PROEFINSTALLATIE VOOR AFVALWATERBEHANDELING

Op de locatie van de AWZI Almere is door Paques diverse pilotreactoren in een container geïnstalleerd voor het behandelen van helder TORWASH®-supernatant. Hiervoor is zuiverings-slib na TORWASH® opgevangen in een 1 m³ IBC-container, waarna de vaste delen konden uitzakken. De bovenlaag bestond uit een bruine, maar heldere vloeistof die kon worden

afgeheveld. De rest van het TORWASH®-effluent bestond uit persvloeistof, zoals die uit de membraanfilters was gekomen. Het TORWASH®-supernatant werd vervolgens in de anaerobe reactor van de 20ft-pilot container gepompt (Figuur 14).

FIGUUR 14

PROEFPROJECT AFVALWATERZUIVERING IN CONTAINERS OP HET TERREIN VAN AWZI ALMERE

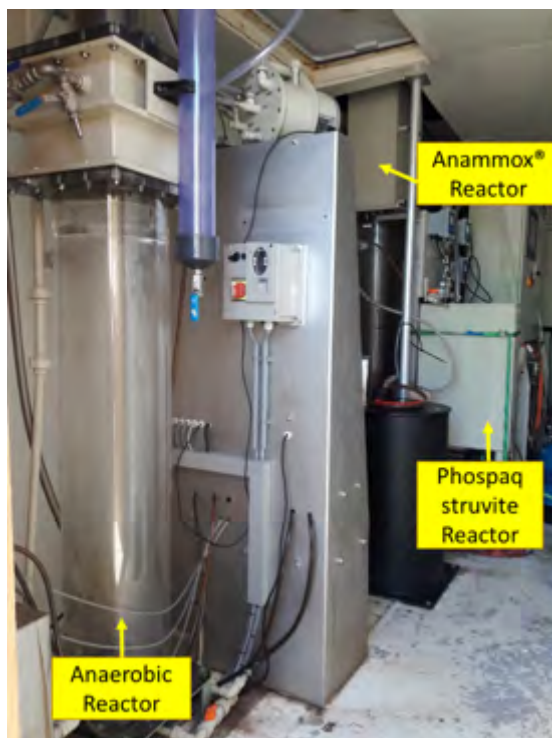


De 20ft-container bestaat uit een reeks verschillende pilot-reactoren, zie Figuur 15:

1. Een conditioneringstank (35 L);
2. BIOPAQ® anaerobe vergistingsreactor (45 L);
3. PHOSPAQ™ struvietreactor (20 L);
4. ANAMMOX®-reactor (30-60 L).

FIGUUR 15

DE REACTOREN IN DE PILOTCONTAINER VAN PAQUES BESTAANDE UIT EEN ANAEROBE REACTOR, PHOSPAQ-REACTOR, BEZINKTANK (NIET ZICHTBAAR) EN ANAMMOX-REACTOR



In de anaerobe reactor wordt met behulp van anaeroob korrelslib de opgeloste CZV in biogas omgezet. CZV-analyses worden uitgevoerd om de CZV-verwijderingsefficiëntie te bepalen. De gasproductie wordt continu gemeten door een gasmeter.

Na anaerobe zuivering van het supernatant wordt het afvalwater naar de PHOSPAQ™ gevoerd, waar de vloeistof water belucht wordt. Tijdens deze voorbeluchting worden eventuele sulfiden en resterende BZV (biologisch zuurstofverbruik) geoxideerd. Bij aanwezigheid van hoge concentraties magnesium (Mg^{2+}), ammonium (NH_4^+) en orthofosfaat (PO_4^{3-}) kan struviet ($MgNH_4PO_4 \cdot H_2O$) worden gevormd. Er is gekozen geen Mg^{2+} in de vorm van magnesiumchloride toe te voegen omdat de concentraties van de genoemde stoffen in het filtraat voldoende hoog zijn.

Het effluent van de PHOSPAQ™-reactor gaat vervolgens in een bezinktank om bezinkbare vaste stof te verwijderen. Uiteindelijk wordt het effluent uit de bezinktank in de ANAMMOX®-reactor gepompt waarbij door beluchting ammoniumstikstof wordt verwijderd zonder dat er CZV nodig is. Het uiteindelijke effluent wordt vanuit de container geloosd op de riolering van de AWZI Almere.

3.4 PILOT-EXPERIMENTEN MET NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB (AWZI ALMERE)

3.4.1 TORWASH®-TESTEN

In september-december 2018 is de proefinstallatie getest met niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere. Het droge-stofgehalte (op basis van indamprest) van de geteste aanvoer bedroeg 3-6%. Het aanvoerdebiet is ingesteld op 25 kg/u. De reactie omstandigheden in de pilot-installatie zijn dusdanig ingesteld dat bij de ontwatering van het behandelde product in de Marecopers een droge-stofgehalte van 50-55% gehaald werd. Ter vergelijking zijn een aantal monsters naar TNO gebracht om in de Carver Die testen te doen die de uitkomsten van de Marecopers en daarmee de bruikbaarheid ervan bevestigden.

Tabel 1 geeft de ontwateringsresultaten van het testen van zuiveringsslib met een droge-stofgehalte van 3% en 5% bij de inlaat. De drogestofgehaltes zijn hoog, zelfs beter dan in de laboratorium experimenten, wat aantoont dat de hydrothermale reacties volledig zijn bij de gekozen temperatuur en verblijftijd in de reactor. De resultaten van de Carver Die en de Marecopers komen overeen.

TABEL 1

ONTWATERINGSRESULTATEN VAN ZUIVERINGSSLIB NA TORWASH®-BEHANDELING MET BEHULP VAN VERSCHILLENDE ONTWATERINGSMETHODEN.

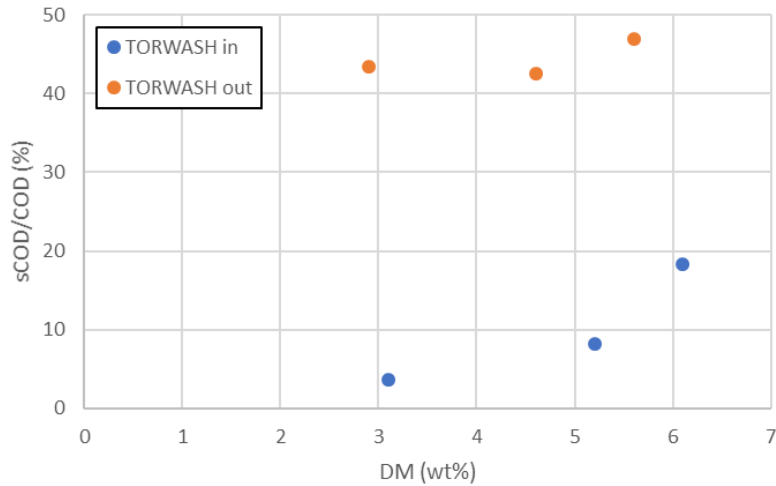
Slibtoevoer droge stof (indamprest)	3%	5%
Filterkoek tussenproduct (na vacuümfiltratie), droge stof	36%	-
Carver Die (klein), droge stof	-	62%
Marecopers slib, droge stof	60-77%	64%

Een opmerkelijk detail is dat bij de eerste testen het tussenproduct, de filterkoek die bij vacuümfiltratie overblijft en die gebruikt wordt in de perstesten van de Marecopers, al een droge-stofgehalte van 36% haalde. Dit is significant hoger dan tijdens de voorbereidende laboratoriumexperimenten. Dit geeft aan dat de behandelingstemperatuur in de reactor verlaagd moest worden ten opzichte van de autoclaafexperimenten.

De CZV analyses (totaal en oplosbaar CZV) zijn door Waterschap Zuiderzeeland uitgevoerd door middel van Hach Lange kuvettentesten, en door het laboratorium Aqualysis. Het zuiveringsslib is zowel voor als na TORWASH® geanalyseerd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 16. Dit toont duidelijk aan dat TORWASH® veel oplosbaar CZV oplevert die later weer voor de productie van biogas gebruikt kan worden.

FIGUUR 16

DE VORMING VAN OPLOSBAAR CZV NA TORWASH®-BEHANDELING VAN NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB



Om van het product na TORWASH®-behandeling van zuiveringsslib een helder effluent af te scheiden is een unieke eigenschap van het behandelde product gebruikt: het gemak waarmee de vaste slibdelen bezinken. Dit effect wordt duidelijk weergegeven in Figuur 17. In het rechter maatglas is goed te zien dat de TORWASH®-behandeling de fysische eigenschappen van de vaste stoffen in het zuiveringsslib substantieel veranderd heeft. Het bezinken van vaste delen is binnen een minuut zichtbaar.

Het zuiveringsslib na TORWASH® is in IBC-tanks bewaard om verder te laten bezinken. Het supernatant (de bovenliggende heldere vloeistof) is door Paques gebruikt voor het uitvoeren van experimenten met het filtraat, zoals beschreven in paragraaf 3.4.3. De gebruikte vloeistof is een mengsel van filtraat afkomstig van experimenten met slib met 3% droge stof en 5% droge stof. Het onderste deel, de neergeslagen vaste stoffen uit het zuiveringsslib met nog een aanzienlijke hoeveelheid vloeistof ertussen, is gebruikt voor de ontwateringstesten.

FIGUUR 17 MAATCILINDERS DIE HET GEDRAG VAN VASTE STOFFEN IN ZUIVERINGSSLIB DEMONSTREREN. LINKS: RUW SLIB VÓÓR TORWASH®; RECHTS: SLIB NA TORWASH®. DE ORANJE KLEUR VAN DE VLOEISTOF IS NIET REPRESENTATIEF – HET VOCHT IS BIJNA ALTIJD BRUIN – MAAR DEZE FOTO MAAKT HET EFFECT WEL EXTRA GOED ZICHTBAAR



3.4.2 FILTRAAT- EN GASANALYSES

Een monster van het filtraat is gebruikt voor analyse op suikers, rhamnose, arabinose, galactose, glucose, xylose, mannose, fructose en cellobiose. Alle concentraties lagen onder de detectielimiet. Details staan in Bijlage III van dit rapport.

Bij sommige experimenten zijn onder stabiele condities gasmonsters van het reactorspui genomen met behulp van een gaszak. Dit betreft het gas wat in de TORWASH®-reactor wordt gevormd. Het gasmonster dat op 22 oktober 2018 genomen is wordt geacht het meest representatief te zijn omdat de testomstandigheden langere tijd stabiel waren. Het opgevangen gas bleek voornamelijk te bestaan uit CO₂ met daarin ca. 1 vol% H₂S, beide afbraakproducten van de gedeeltelijke ontleding van slib.

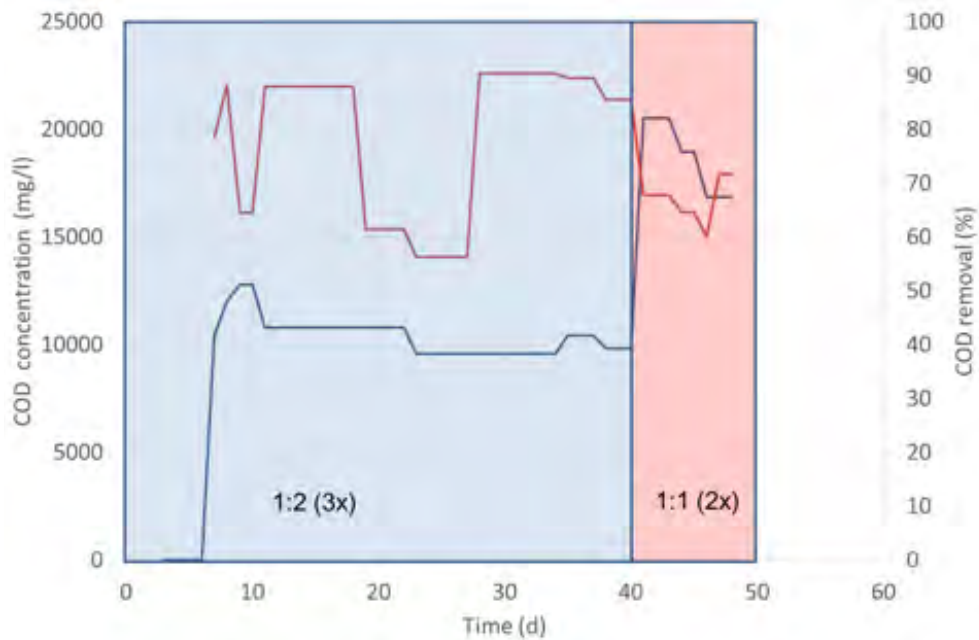
3.4.3 BEHANDELING FILTRAAT VAN ONTWATERING

De heldere vloeistof die ontstaat na bezinking van de vaste delen van zuiveringsslib na TORWASH®-behandeling (supernatant) is als influent gebruikt voor experimenten in de pilotinstallatie van Paques. Het influent werd verdund met water om eventuele toxiciteit te beperken en de bacteriën gelegenheid te geven om te adapteren aan de relatief hoge concentratie CZV, zout en andere potentieel storende stoffen. Op 6 november 2018 zijn de experimenten met de anaerobe reactor gestart. Op 21 december is de reactor stopgezet.

Gedurende een periode van 45 dagen is de anaerobe reactor bedreven. Gemiddeld is eens per vijf dagen de samenstelling van het influent en effluent bepaald of als er nieuw influent werd aangemaakt. Ook zijn door Aqualysis (het laboratorium wat voor Waterschap Zuiderzeeland alle analyses doet) meerdere controle analyses uitgevoerd. De samenstelling van het biogas is in totaal 3 maal gemeten. Voor een goede bedrijfsvoering van de anaerobe reactor zijn dagelijks metingen uitgevoerd. Zo werd de pH dagelijks gemeten evenals de biogasproductie en de reactor temperatuur.

Figuur 18 toont de CZV-concentratie van het verdunde influent van de anaerobe reactor en de CZV-verwijdering bepaald op basis van een CZV-analyse van het influent en het effluent van de anaerobe reactor.

FIGUUR 18 CZV-CONCENTRATIE VAN HET VERDUNDE AFVALWATER (BLAUWE LIJN) EN DE ANAEROBE CZV-VERWIJDERING (RODE LIJN). 1:2 (BLAUWE ZONE) EN 1:1 (RODE ZONE) GEVEN VERDUNNINGSFACOR AAN



Bij een stabiele bedrijfsvoering van de anaerobe reactor is een CZV-verwijdering voor 1:2 verdund influent (het blauwe stuk in de figuur) tot 85-90% bereikt met een CZV-concentratie van het influent van circa 10 g/L. Bij een 1:1 verdunning (rode zone) daalde de CZV-verwijdering naar circa 72% bij een concentratie CZV in het influent van circa 18 g/L. Deze test duurde echter niet langer dan 10 dagen omdat er geen filtraat meer beschikbaar was. De spreiding van de CZV-verwijdering is voor beide verdunningen gelijk en er kan gesteld worden dat binnen de beperkingen van de experimenten beide verdunningen hetzelfde effect op CZV-verwijdering hebben.

Een samenvatting van resultaten voor het niet vergiste zuiveringsslib is opgenomen in Tabel 2.

TABEL 2 RESULTATEN, ALS GEMIDDELDEN VOOR DE BEHANDELING VAN FILTRAAT VAN NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB, WELKE GEBRUIKT IS ALS INFLUENT VOOR DE ANAEROBE REACTOR

Geanalyseerd component	1:2 verdunning	1:1 verdunning
	mg/l	mg/l
Totaal CZV	10382	18740
Ammonium (NH ₄ -N)	246	370
Orthofosfaat (PO ₄ -P) ¹	155	346
Sulfaat (SO ₄ 2-)	70	-
CH ₄ , vol%	78	70
CO ₂ , vol%	21	25
H ₂ S, vol%	1,0	0,1
CZV-verwijdering (%)	85-90	72*

*CZV verwijdering na 10 dagen

Het verdunnen van het supernatant dat als influent werd gebruikt lijkt gunstig te zijn omdat het de anaerobe biologische afbreekbaarheid verhoogt en het ongecontroleerde neerslagpotentieel van fosfaat-zouten vermindert.

Door verschillende aanloopproblemen (veelal technische aard) werd een stabiele bedrijfsvoering van de anaerobe reactor vertraagd en is de PHOSPAQ veel later opgestart dan gepland. Hierdoor heeft de PHOSPAQ-reactor uiteindelijk maar een aantal dagen gedraaid. Besloten is voor de betrekkelijk korte periode geen magnesium te doseren.

In Tabel 3 zijn de resultaten weergegeven voor de verwijdering van fosfaat en ammonium alsmede verwijdering van CZV door beluchting van de PHOSPAQ-reactor. Een verdunning van het influent van 1:2 verdunning is hierbij van toepassing.

TABEL 3

KARAKTERISTIEKEN VAN DE AEROBE BEHANDELING VAN TORWASH®-EFFLUENT VAN NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB MET EEN VERDUNNING VAN 1:2

Ruw zuiveringsslib	1:2 verdunning	Ingaand	na anaerobe behandeling	na beluchting
Geanalyseerd component		mg/l	mg/l	mg/l
Totaal CZV		10382	2198	862
Ammonium (NH ₄ -N)		246	504	158
Orthofosfaat (PO ₄ -P)		155	104	66

In de betrekkelijk korte periode van enkele dagen is geconstateerd dat de rest hoeveelheid CZV na anaerobe behandeling nog verder kan worden verwijderd door beluchting in de PHOSPAQ-reactor. Verdere verwijdering van CZV, NH₄ en PO₄ is te verwachten, maar kon echter niet tijdens de korte proefperiode worden aangetoond.

Door de eerdergenoemde aanloopproblemen en het verkrijgen van een stabiele bedrijfsvoering van de anaerobe reactor was er onvoldoende tijd om het anammox proces te testen. De ANAMMOX-reactor heeft dan ook niet gedraaid op het Torwash supernatant van niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere.

3.4.4 ONTWATERINGSTESTEN

Met de TORWASH®-pilot is in totaal een hoeveelheid van 2000 liter bezonken zuiveringsslib geproduceerd van niet vergist zuiveringsslib. Dit bezonken zuiveringsslib, na TORWASH® is gebruikt voor de ontwateringstesten met de Boskalis pilotinstallatie. Het bezonken zuiveringsslib na TORWASH® had een gemiddelde droge stof gehalte van 6%.

Uit experimenten met de membraanfilterpers van Boskalis is gebleken dat wanneer het vullen van de membraankamers op een relatief lage snelheid gebeurt, dit tot verstopping leidt. Dit komt doordat er een te snelle indikking wordt verkregen. Om die reden is een hoger vulsnelheid gekozen en daarmee kon uiteindelijk een redelijke test worden uitgevoerd. De vuldruk bereikte 7,5 bar. Dit resulteerde in twee koeken met een droge-stofgehalte van 23%, die niet homogeen ontwaterd waren. De koek zag eruit als twee afzonderlijke dichtere lagen met een dunne slurry ertussen (zie Figuur 19). De dichtere, vast-aanvoelende buitenlaag had een droge-stofgehalte 49%. Dit betekent dat de koek het potentieel heeft om nog verder te ontwateren, maar de juiste procedure en/of instellingen van de membraanfilterpers nog niet waren gevonden. Mogelijk zijn de perstesten uitgevoerd bij te lage druk. Ook werd verondersteld dat het droge-stofgehalte in het zuiveringsslib voor ontwatering mogelijk te laag was.

FIGUUR 19 KOEK VAN DE TWEEDE PERSING (LINKS) EN HET NATTE STUK (RECHTS)



Gedurende de laboratoriumexperimenten met zowel de Marecopers als de Carver Die filterpers werd het te persen zuiveringsslib na TORWASH® eerst gefiltreerd. Dit leverde een filterkoek op met een droge stof percentage van meer dan 20%.

Voor de pilot testen is daarom besloten om eveneens het product na TORWASH® in te dikken met een decanteercentrifuge van Alfa Laval. Verondersteld werd dat hiermee het slib na TORWASH® verder ingedikt kon worden tot circa 10% droge stof en dat mogelijk hierdoor een beter ontwateringsrendement kon worden bereikt. De decanter liet echter veel vaste stof meegaan met het centraat en daardoor kan deze niet gezien worden als de juiste tussenstap. Uit eerdere laboratoriumproeven was al naar voren gekomen, dat bij mechanische ontwatering van TORWASH®-product in principe geen indikking nodig is om een bepaald droge-stofgehalte te halen, maar dat het wel de perstijd kan verkorten.

FIGUUR 20 DECANTEERCENTRIFUGE VAN 300 L/H VAN ALFA LAVAL

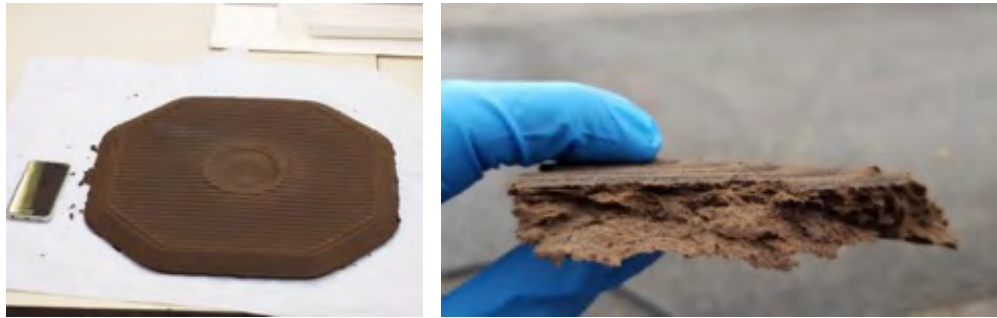


Met het verder ingedikte zuiveringsslib door de decanteercentrifuge is één ontwateringsexperiment uitgevoerd met de membraanfilterpers van Boskalis. Met een vuldruk van 10 bar en de persdruk opgevoerd tot 15 bar in de membraanfilterpers zijn homogene koeken geperst met een droge-stofgehalte van 49-51%. Deze perskoeken waren ook aan de binnenkant droog. Hiermee is aangetoond dat het in de praktijk ook mogelijk is zuiveringsslib na TORWASH® verdergaand te ontwateren.

In geen van de testen is een flocculatiemiddel gebruikt. Ook zijn er een paar testen uitgevoerd met alleen de decanteercentrifuge. Deze hebben laten zien dat het niet mogelijk is om met een decanteercentrifuge het zuiveringsslib na TORWASH® verdergaand te ontwateren. Een droge-stofgehalte van rond de 22% is haalbaar en daar blijft het bij. Een ander probleem is dat in het centraat van deze decanter ook nog een aanzienlijke hoeveelheid zwevend stof zit, terwijl het centraat van de membraanfilterpers alleen opgeloste stoffen bevat. In Figuur 21 is goed te zien dat de geperste koek volledig homogeen droog is.

FIGUUR 21

GEPERSTE KOEK MET VOORGECESTRIFUGEERD SLIB (LINKS) EN KOEKDOORSNEDE (RECHTS)



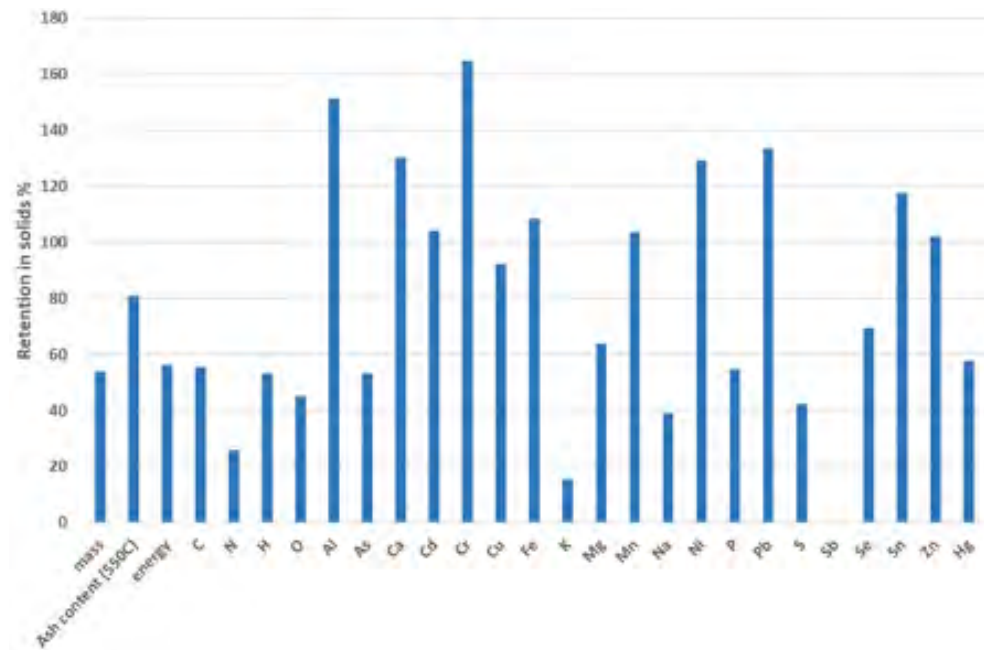
Na de testen met de membraanfilterpers van Boskalis is er nog geen goed beeld ontstaan over de maximale ontwaterbaarheid van zuiveringsslib na TORWASH®. Na evaluatie van de situatie tijdens de experimenten door een aantal experts is besloten in de vervolgfase van het pilotonderzoek waarbij vergist slib is gebruikt ook ontwateringstesten uit te voeren met een andere membraanfilterpers. Deze waren aanvankelijk niet gepland. Hiervoor is de kennis en testapparatuur van Limburg Filter gebruikt.

3.4.5 MASSAOPBRENGST, ENERGIEOPBRENGST EN VERDELING VAN ELEMENTEN

De perskoeken, gemaakt bij TORWASH® experimenten met niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere in de Boskalis pers, zijn geanalyseerd op dezelfde wijze als de vaste zuiveringsslibben verkregen tijdens de laboratoriumexperimenten. De massa- en energieopbrengst en de verdeling van afzonderlijke elementen zijn weergegeven in Figuur 22. De resultaten tonen in grote lijnen dezelfde trends als de laboratoriumresultaten met behulp van de 20-L autoclaaf (Figuur 7). Opvallend is wel dat de fractie N die achterblijft in de koek lager is dan bij de laboratoriumexperimenten. Of dit het gevolg is van meer onzekerheid in de resultaten, vanwege de vele handelingen en de minder goed gecontroleerde omstandigheden bij de pilotexperimenten of dat dit een verschil is tussen batch- en continubedrijf is niet duidelijk.

FIGUUR 22

VASTE STOFFEN NA TORWASH®-BEHANDELING VAN NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB VAN AWZI ALMERE. DE GEDETAILLEERDE ANALYSES ZIJN OPGENOMEN IN BIJLAGE IV. *SB WERD NIET GEDETECTEERD. OPBRENGST DROGE-STOFGEHALTE BIJ 54% VAN HET GEWICHT



Ruim 50% van de vaste stof wordt teruggevonden in de perskoeken. De calorische energie is iets hoger. C, P en S zitten ook rond 50-60%. Zware metalen, Al, Fe en Ca zijn bijna volledig terug te vinden in de perskoek.

In Figuur 22 is Si niet opgenomen. Het bleek namelijk dat zand sterk verstrendend werkt omdat het sneller uitzakt dan de rest van de vaste stof, wat het nemen van een monster met een representatief Si-gehalte bijzonder lastig maakt. Het is overigens aannemelijk dat Si in de vorm van zand volledig in de vaste stof achterblijft.

3.5 PILOT-EXPERIMENTEN MET VERGIST ZUIVERINGSSLIB VAN (AWZI DRONTEN)

3.5.1 TORWASH® EXPERIMENTEN

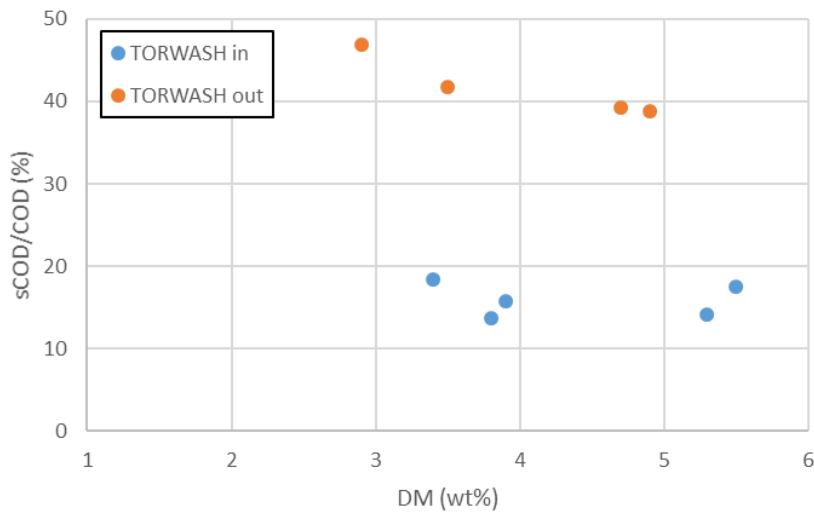
In januari 2019 zijn enkele aanpassingen aan de pilot-installatie gedaan. De experimenten zijn voortgezet in de periode februari-maart 2019 met vergist slib van AWZI Dronten. Het slib werd per vrachtwagen aangevoerd en is vooraf over een grof filter geleid omdat het stukjes glas en kleine stenen bevatte die de ontluichtingsklep makkelijk kunnen verstoppen. Vermoedelijk hebben deze vaste delen al in de vrachtauto gezeten voordat deze gevuld werd met slib. Het droge-stofgehalte (indamprest) van het ingaande slib van de TORWASH®-reactor was 3,5% of 5,5% bij 25 kg/u. Gedurende een periode van 260 uur is de TORWASH®-reactor continu bedreven met een input van 3,5% droge stof. Daarna is een periode van 72 uur in continubedrijf gedraaid met een input van 5,5% droge stof.

Met behulp van de Marecopers is de ontwaterbaarheid van het zuiveringsslib na TORWASH® bepaald. De resultaten gaven een perskoek met een droge-stofgehalte van 50-52%.

De analyses op totaal CZV en oplosbaar CZV zijn door Aqualysis uitgevoerd op het zuiveringsslib vóór en na TORWASH®. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 21, als verhouding opge-

lost CZV versus totaal CZV. Door TORWASH® wordt er CZV uit het slib vrijgemaakt. Dit resultaat is vergelijkbaar met dat voor slib van AWZI Almere.

FIGUUR 23 OPLOSBARE CZV-VORMING NA TORWASH®-BEHANDELING VAN VERGIST ZUIVERINGSSLIB



3.5.2 EFFLUENT- EN GASANALYSES

Gedurende de experimenten zijn een aantal gasmonsters genomen met behulp van een gaszak. Dezelfde procedure en methodologie zijn gevolgd als beschreven in paragraaf 3.4.2. Het volume van de gasproductie is gemeten met een online massastroommeter en bedroeg ongeveer 25 liter per uur onder stabiele omstandigheden. Uit analyse van het gas is gebleken dat voor meer dan 90% uit CO₂ bestaat. Het gas bevat ook 1 vol% H₂S en sporen van CH₄, CO en diverse andere zwavelverbindingen.

3.5.3 BEHANDELING FILTRAAT VAN ONTWATERING

Tabel 4 geeft de resultaten weer van de anaerobe behandeling van het supernatant na de TORWASH®-behandeling van vergist zuiveringsslib uit de AWZI Dronten. Hiervoor is een verdunning met proceswater aangehouden van 1:1.

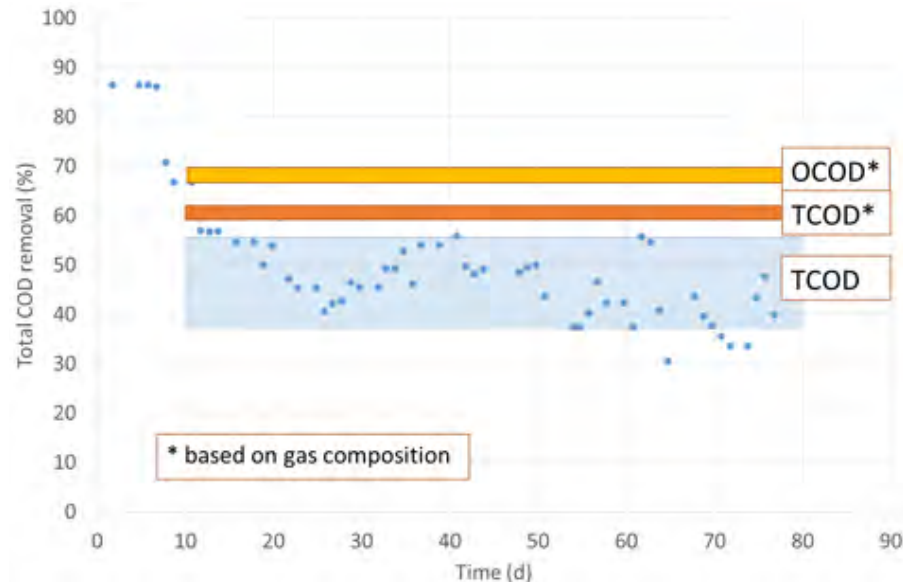
TABEL 4 RESULTATEN VAN HET ANAEROOB BEHANDELEN VAN TORWASH SUPERNATANT VAN VERGIST ZUIVERINGSSLIB VAN AWZI DRONTEN

Geanalyseerd component	Eenheid	1:1 verdunning
		hoeveelheid
Totaal CVZ	mg/l	7035
Opgelost CVZ	mg/l	6011
Ammonium (NH ₄ -N)	mg/l	776
Orthofosfaat (PO ₄ -P)	mg/l	36
Sulfaat (SO ₄ ²⁻)	mg/l	-
CH ₄	vol%	76
CO ₂	vol%	23
H ₂ S	vol%	0,9
CZV-verwijdering		
- gebaseerd op een CVZ-analyse	%	40 - 55
- op basis van biogasproductie		60 - 70

De exact gemeten biogasproductie is 0,62 L/g verwijderd totaal-CVZ en 0,71 L/g oplosbare verwijderd CVZ. Deze waarden waren aanzienlijk hoger dan kon worden berekend op basis van de gemeten biogassamenstelling, die werd geschat op 0,46 L/g verwijderde CZV. Er kon geen precieze verklaring worden gevonden van deze discrepantie in de resultaten. De CVZ-verwijderingsefficiëntie op basis van de biogasproductie is weergegeven in Figuur 24. De gemeten biogasproductie met behulp van een analoge biogasmeter (liters biogas) wijkt af van de berekende productie op basis van de omzettingen van zowel totaal- als opgelost CZV.

FIGUUR 24

GRAFISCHE WEERGAVE VAN DE TOTALE CZV-VERWIJDERING OP BASIS VAN CZV-ANALYSE EN BIOGASPRODUCTIE



Theoretisch wordt de specifieke biogasproductie als volgt berekend:

$$SGP = SMP/fCH_4$$

SGP: specifieke biogasproductie

SMP: specifieke methaanproductie (0,35 LCH₄/g standaardomstandigheden).

fCH₄: fractie CH₄ (bijv. 0,8 bij 80 volumeprocent)

De lagere anaerobe biologische afbreekbaarheid van het filtraat van het met TORWASH® behandelde vergiste zuiveringsslib ten opzichte van het niet vergiste zuiveringsslib ligt in lijn met de verwachtingen. Door het vergisten van zuiveringsslib blijft er een minder groot deel biologisch afbreekbaar CZV achter in het zuiveringsslib, dat door TORWASH® vrij kan worden gemaakt.

TABEL 5

GEMIDDELDE RESULTATEN VAN HET ANAEROOB BEHANDELEN VAN VERGIST ZUIVERINGSSLIB BIJ EEN VERDUNNING VAN 1:1 NA DE PHOSPAQ-REACTOR (NA BELUCHTING)

Vergist zuiveringsslib	1:1 verdunning	Influent	Anaerobe	Na beluchting
Geanalyseerd component		mg/l	mg/l	mg/l
Totaal CZV		7035	3791	1832
Ammonium (NH ₄ -N)		776	914	838
Orthofosfaat (PO ₄ -P) ¹⁾		36	28	53

Het gehalte ammonium, aanwezig in het filtraat na een TORWASH® behandeling van zuiveringsslib, zowel vergist als niet vergist, kan door toepassing van het ANAMMOX-proces norma-

liter verwijderd worden tot minder dan 100 mg/l. Door technische storingen aan de pilotinstallatie en gebrek aan tijd heeft de ANAMMOX-reactor tijdens de pilot-experimenten helaas niet gedraaid. Uit een kort, separaat uitgevoerd labonderzoek van 8 dagen bleek het afvalwater uit de PHOSPAQ echter geen remming op het Anammox proces te vertonen.

3.5.4 ONTWATERINGSTESTEN

Het vergiste zuiveringsslib van AWZI Dronten is na de TORWASH®-behandeling in een IBC-tank opgeslagen om de vaste delen te laten bezinken. Het bezinksel is gebruikt voor de ontwateringstesten met de membraanfilterpers van Limburg Filter. Het ingaande materiaal (bezinksel) had een droge-stofgehalte van ca. 7% (indamprest). De pers werd gevuld met slib tot een druk van 8 bar. Een verdere drukverhoging werd in drie stappen bereikt: eerst werd de druk op 8 bar gehouden, daarna werd de druk verhoogd tot 16 bar en op 16 bar gehouden. Dit resulteerde in een koek van 8 mm dikte met een droge-stofgehalte van 52-53% (Figuur 25). Dit resultaat kwam overeen met de resultaten van de experimenten verkregen met de Marecopers bij een persdruk van 12 bar. In geen van deze testen is een flocculatiemiddel gebruikt.

Bij wijze van experiment zijn een aantal testen gedaan met een flocculatiemiddel. Dit gaf geen verbetering van het ontwateringsresultaat.

Vanuit eerdere laboratoriumexperimenten is aangetoond dat in geval van vergist zuiveringsslib het persen na de TORWASH® behandeling lastiger is vergeleken bij het gebruik van niet vergist slib met verder gelijke omstandigheden. Dit leidt tot lagere drogestofgehaltes dan voor niet-vergist slib na een TORWASH® behandeling. Het maken van perskoeken met een droge-stofgehalte van 52-53% uit vergist slib geeft aan dat met deze pilot-installatie ook een goed resultaat behaald kan worden voor niet-vergist slib.

FIGUUR 25

GEPERSTE KOEK, BEVESTIGD AAN FILTERMEDIUM (LINKS) EN DOORSNEDE VAN DE GEPERSTE KOEK (RECHTS)

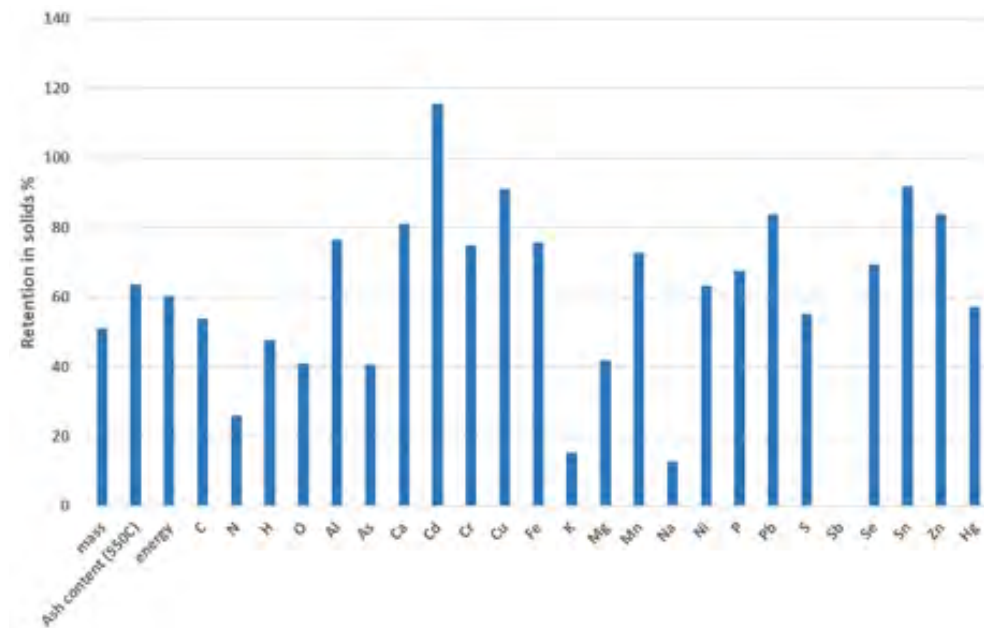


3.5.5 MASSAOPBRENGST, ENERGIEOPBRENGST EN VERDELING VAN ELEMENTEN

De verkregen filterkoek (na filtratie) en perskoek (na persing) zijn geanalyseerd en de massa- en energieopbrengst en de verdeling van de afzonderlijke elementen zijn berekend ten opzichte van de oorspronkelijke droge stof in het oorspronkelijke zuiveringsslib. In Figuur 26 zijn de resultaten weergegeven van de TORWASH®-proeven met vergist zuiveringsslib van AWZI Dronten. De getallen bevestigen de trends uit laboratoriumproeven (zie Figuur 8). Goed oplosbaar K en Na wordt in hoge mate afgevoerd met het filtraat. De meeste andere elementen, waaronder zware metalen, S en P blijven preferent achter in de filterkoek. Cadmium is de uitzondering. Het is opvallend dat voor geen enkel element, zelfs niet voor Fe en de zware metalen, 100% in de filterkoek achterblijft. Hier wordt later verder op ingegaan (zie discussie in paragraaf 6.2.7).

FIGUUR 26

MASSAOPBRENGST, ENERGIEOPBRENGST EN VERDELING VAN ELEMENTEN NA DE TORWASH®-BEHANDELING VAN VERGIST ZUIVERINGSSLIB VAN AWZI DRONTEN



3.6 EPHYRA®-SLIB EN VERGIST ZUIVERINGSSLIB VAN RWZI LEEUWARDEN

Na afloop van de uitgebreide experimenten met niet vergist zuiveringsslib van Almere en vergist zuiveringsslib van AWZI Dronten in het kader van het EnCORE project zijn er twee aanvullende experimenten gedaan in de TORWASH®-pilot met twee andere soorten slib. Dit betreft het Ephyra® vergist zuiveringsslib van AWZI Tollebeek en vergiste zuiveringsslib van de RWZI Leeuwarden (in de voorbereiding al gebruikt om optimale startcondities voor TORWASH® van vergist slib te vinden).

Bij de test met Ephyra®-slib is een ingangsmateriaal gebruikt met 3.8% droge stof en een voedingsdebiet van 25 liter per uur. Het zuiveringsslib van de TORWASH®-behandeling is opgevangen in een IBC om de vaste delen te laten bezinken. Van het bezinksel zijn na filtratie met de Marecopers ontwateringsexperimenten uitgevoerd. Deze experimenten hebben laten zien dat ontwatering bereikt kan worden tot 48-52% droge stof. Dit komt goed overeen met resultaten van zuiveringsslib van AWZI Almere en AWZI Dronten. Van het filtraat zijn twee keer een totaal CZV-waarde bepaald, respectievelijk 17240 en 13710 mg/l. Dit komt eveneens overeen met concentraties totaal CZV welke in het filtraat zijn gemeten van vergist slib van AWZI Dronten na een TORWASH® behandeling.

Bij het experiment met vergist zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden is gewerkt met een ingangsmateriaal van 4.3% droge stof. Het zuiveringsslib na een TORWASH®-behandeling is eveneens opgevangen in een IBC om de vaste delen te laten bezinken. Met behulp van de Marecopers zijn na filtratie perskoeken gemaakt met 46% droge stof en 59% droge stof. Niet-geoptimaliseerde instellingen van de TORWASH®-reactor lijken debet te zijn geweest aan het eerste experiment. De instellingen van de TORWASH®-reactor voor het tweede experiment waren goed. Ook het vergiste zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden is verregaand te ontwateren na een TORWASH®-behandeling. Bij deze test is een totaal CZV gemeten in het zuiveringsslib voor de TORWASH®-behandeling van 650 mg/l, en na de TORWASH®-behandeling een totaal CZV-concentratie tussen 18 en 19 g/l in het filtraat.

Er zijn bij de experimenten met Ephyra® vergist zuiveringsslib van AWZI Tollebeek en vergist zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden geen verdere analyses gedaan. Ook zijn er geen ontwateringstesten op pilotschaal uitgevoerd of waterbehandeling door Paques. Echter, gezien de grote overeenkomst in gedrag tijdens de testen, ontwatering en CZV met de eerdere experimenten (niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere en vergist zuiveringsslib van AWZI Dronten) kan in redelijkheid worden aangenomen dat er voor deze beide soorten slib geen afwijkende resultaten verwacht mogen worden.

Voor een eerste inschatting wat het effect is van een TORWASH®-behandeling op een bepaalde soort zuiveringsslib is het genoeg om een set eenvoudige analyses te doen, die kengetallen voor de samenstelling opleveren. Daarmee kunnen inschattingen gemaakt worden van de massabalansen en de economische evaluaties. Deze aanvullende experimenten geven aan dat resultaten en conclusies die voor de beide zuiveringsslibben die in het EnCORE project uitgebreid zijn getest (niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere en vergist zuiveringsslib van AWZI Dronten) waarschijnlijk ook van toepassing zijn op een hele reeks andere soorten zuiveringsslib.

4

TOTALE MASSABALANSEN

In dit hoofdstuk worden de totale massabalansen gepresenteerd op basis van de resultaten van de pilottesten en berekend voor een grootschaliger toepassing.

4.1 NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB (AWZI ALMERE)

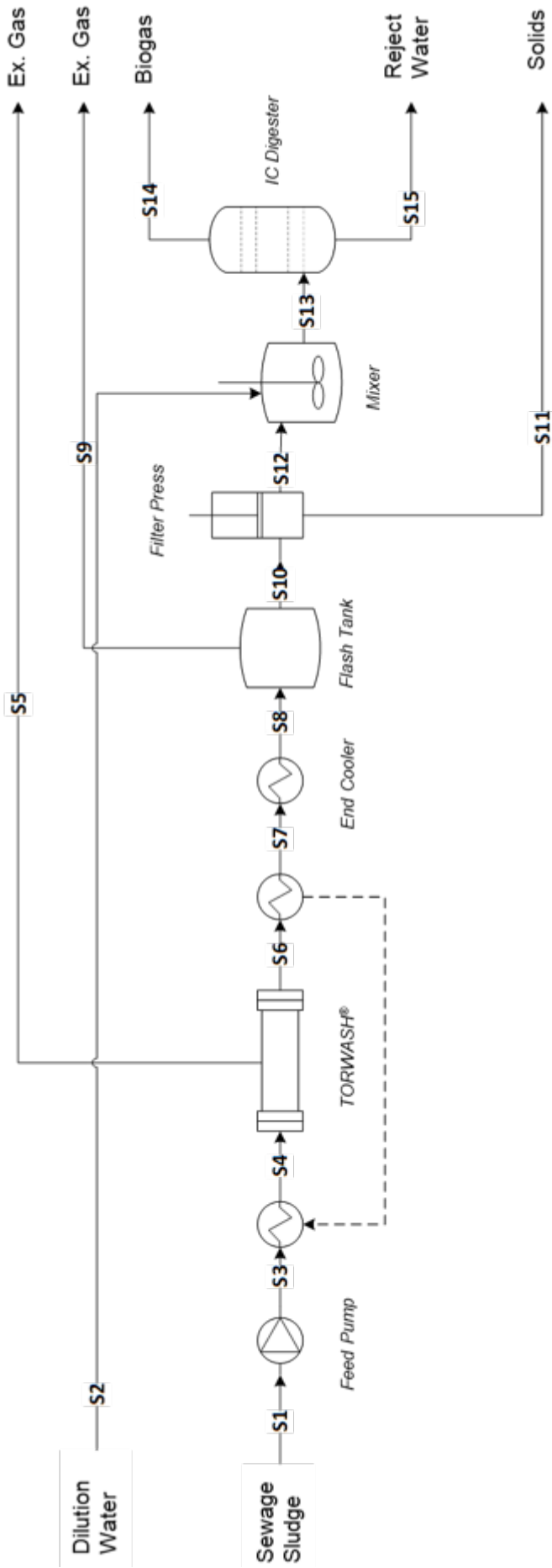
In Figuur 27 staat schematisch weergegeven hoe een opgeschaalde TORWASH®-installatie eruit zou zien op basis van de expertise van TNO, met aanvullende informatie van het TDH-proces. In Tabel 6 staat de berekende massabalans als samenvatting wanneer deze installatie toepast wordt op de behandeling van niet vergist zuiveringsslib van AWZI Almere.

Omdat niet in elke zuiveringsinstallatie het slib hetzelfde droge-stofgehalte heeft, is als basis voor de getallen in Tabel 6 een ingaande stroom (S1) met 100 kg droge stof per uur genomen (op basis van indamprest). Op die manier is het relatief eenvoudig om de situatie van een specifieke waterzuivering te berekenen.

De berekeningen zijn gebaseerd op de volgende aannames:

- Het ingaande zuiveringsslib gaat heeft 5,2 % droge stof (indamprest). Dit kan verkregen worden door indikking zonder flocculatiemiddel in een centrifuge.
- Er gaat geen CZV verloren in de vorm van CH_4 in de TORWASH®-gasuitlaat (dit lijkt bij metingen verwaarloosbaar te zijn).
- Er zit geen CZV in het verdunningswater ten behoeve van het verdunnen van het filtraat voor de anaerobe behandeling (productie van biogas) (stroom S2).

FIGUUR 27 STROOMDIAGRAM VAN EEN OPGESCHAALDE TORWASH®-INSTALLATIE



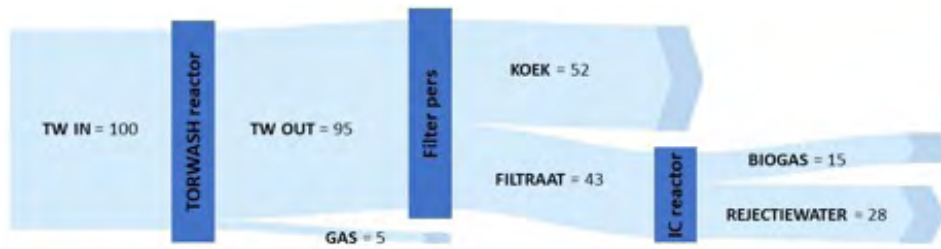
TABEL 6 OVERALL MASSABALANS VOOR NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB (ALMERE). CELLEN IN GROEN IS OPGELOSTE FRACTIE

Eigenschap	Eenheid	S1	S2	S4	S5	S10	S11	S12	S13	S14	S15
		Pomp inlaat	Verdunnings water	TORWASH IN	TORWASH gas	TORWASH UIT	Filter koek	Filteraat	Filteraat 1:1 verdund	Biogas	Rejectie Water (alleen IC)
H2O	kg/u	1823	1771	1823		1823	52	1771	3542		3542
CO2	kg/u				5					7	
CH4	kg/u									9	
Indamprest	kg/u	100		100		95	52	43	43		28
Organische droge stof	kg/u	82		82		77	42	35	35		20
As	kg/u	18		18		18	10	8	8		8
CZV	kg/u	117		117		117	69	48	48	35	13
Totaal P	kg/u	3,5		3,5		3,5	1,7	1,8	1,8		1,8
Ortho-P	kg/u	0,9		0,9		1,2	0,0	1,2	1,2		0,8
Totaal N	kg/u	8,6		8,6		8,6	2,0	6,6	6,6		6,6
Ammonium-N	kg/u	0,6		0,6		1,4	0,2	1,2	1,2		2,4
Totaal S	kg/u	0,7		0,7		0,7	0,3	0,4	0,4		0,4
Totale massaastroom	kg/u	1923	1771	1923	5	1918	104	1814	3586	16	3570
Indamprest	wt%	5,2				5,0	50				
Organische droge stof	wt% (db)	82				80	80				
As	wt% (db)	18				20	20				
CZV	mg/l	61100				61260		26550	13430		3770
Totaal P	mg/l	1800				1800		1000	500		510
Ortho-P	mg/l	480				650		660	330		220
Totaal N	mg/l	4460				4470		3620	1830		1840
Ammonium-N	mg/l	297				710		670	340		670
Totaal S	mg/l	350				350		220	110		110
Totaal P	mg/kg (db)						31894				
Totaal N	mg/kg (db)						38767				
Totaal S	mg/kg (db)						6671				

In Figuur 28 worden de balansen weergegeven in de vorm van Sankey diagrammen.

FIGUUR 28 SANKEY DIAGRAMMEN VOOR DE MASSABALANSEN VAN DROGE STOF, CZV, FOSFOR EN STIKSTOF VOOR NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB

INDAMPREST



CZV



FOSFOR



STIKSTOF



4.2 VERGIST ZUIVERINGSSLIB (AWZI DRONTEN)

Voor een opschaling volgens Figuur 27, in geval van vergist zuiveringsslib van de AWZI Dronten is de berekende massabalans weergegeven in Tabel 7.

De berekeningen zijn gebaseerd op de volgende aannames:

- Toevoer van 100 kg droge stof (indamprest) per uur vergist zuiveringsslib (droog) met een concentratie van 3,4 % (stroom S1). Dit zodat elk waterschap de berekening kan doen voor de eigen situatie.
- Het ingaande zuiveringsslib is beschikbaar bij 3,4% droge stof (indamprest) zonder dat verdunning nodig is. Hier wordt uitgegaan van gravitaire indikking.
- Er gaat geen CZV verloren in de vorm van CH_4 in de TORWASH®-gasuitlaat (dit lijkt verwaarloosbaar bij metingen).
- Er zit geen CZV in het verdunningswater dat nodig is voor het verdunnen van het supernatant voor de anaerobe behandeling.

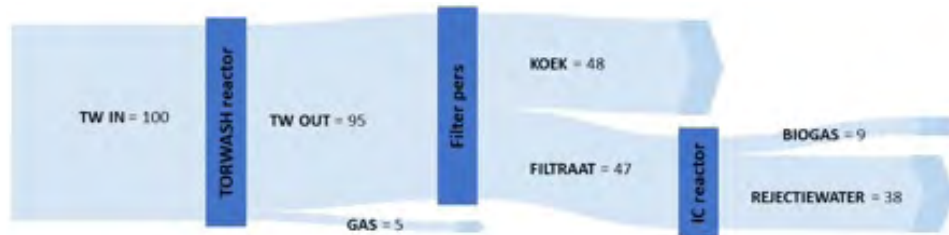
TABEL 7 OVERALL MASSABALANS VOOR VERGIEST ZUIVERINGSSLIB (AWZI DRONTEN). CELLEN IN GROEN IS OPGELOSTE FRACTIE

Eigenschap	Eenheid	S1	S2	S4	S5	S10	S11	S12	S13	S14	S15
		Pomp inlaat	Verdunnings water	TORWASH IN	TORWASH gas	TORWASH UIT	Filter koek	Filteraat	Filteraat 1:1 verdund	Biogas	Rejectie Water (alleen IC)
H2O	kg/u	2843	2800	2843		2843	43	2800	5600		5600
CO2	kg/u									4	
CH4	kg/u				5					5	
Indamprest	kg/u	100		100		95	48	47	47		37
Organische droge stof	kg/u	62		62		57	20	37	37		27
As	kg/u	38		38		38	28	10	10		10
CZV	kg/u	80		80		80	41	39	39	20	20
Totaal P	kg/u	4,4		4,4		4,4	4,0	0,4	0,4		0,4
Ortho-P	kg/u	0,7		0,7		0,3	0,1	0,2	0,2		0,1
Totaal N	kg/u	7,2		7,2		7,2	1,2	6,0	6,0		6,0
Ammonium-N	kg/u	3,1		3,1		3,7	0,2	3,5	3,5		5,2
Totaal S	kg/u	1,3		1,3		1,3	0,3	1,0	1,0		1,0
Totale massastroom	kg/u	2943	2800	2943	5	2938	91	2848	5648	9	5639
Indamprest	wt%	3,4				3,2	53	1,6	0,8		0,7
Organische droge stof	wt% (db)	62				80	41	79	79		80
As	wt% (db)	38				20	59	21	21		20
CZV	mg/l	27300				27350		13820	6970		3490
Totaal P	mg/l	1500				1500		130	70		70
Ortho-P	mg/l	250				130		80	40		30
Totaal N	mg/l	2440				2440		2090	1060		1060
Ammonium-N	mg/l	1040				1250		1210	610		920
Totaal S	mg/l	440				440		340	170		170
Totaal P	mg/kg (db)						83315				
Totaal N	mg/kg (db)						25180				
Totaal S	mg/kg (db)						15575				

In Figuur 29 worden de balansen weergegeven in de vorm van Sankey diagrammen.

FIGUUR 29 SANKEY DIAGRAMMEN VOOR DE MASSABALANSEN VAN DROGE STOF, CZV, FOSFOR EN STIKSTOF VOOR VERGIST ZUIVERINGSSLIB

INDAMPREST



CZV



FOSFOR



STIKSTOF



4.3 EFFECT REJECTIEWATER OP DE WERKING VAN DE RWZI

Het rejectiewater na ontwatering van het TORWASH® slib zal teruggevoerd worden naar het influent van de rioolwaterzuivering. Voor de stikstof en fosfaatvracht die retour gaat is in het project voorzien dat deze worden gereduceerd door een ANAMMOX installatie en terugwinning van struviet. Fosfaat kan mogelijk ook naar de vaste fractie worden gestuurd (hiervoor is meer onderzoek nodig). Het is echter ook belangrijk om eventuele andere effecten af te wegen.

Gedurende het pilotonderzoek is de nitrificatieremming bepaald van een gemiddelde samenstelling van het filtraat na ontwatering van het vergiste slib van AWZI Dronten na TORWASH en behandeling door de IC. Uit deze meting is gebleken dat bij een verdunning van 70 maal er geen remming meer optreedt van de nitrificatie. Als er dus in de biologie in de rwzi voldoende ruimte is, kan de stikstof in het retourwater goed in de rioolwaterzuivering worden verwijderd. In de specifieke situatie voor de AWZI Almere zou er sprake van zijn van een verdunning van 204 maal en zou er dus geen effect van een eventuele nitrificatieremming zijn. Dit

kan anders zijn wanneer TORWASH® wordt gerealiseerd op een rioolwaterzuivering met een centrale slibverwerking waarbij het rejectiewater minder wordt verdund.

Een andere parameter die van belang is, is de vracht aan CZV die retour gaat. Van onder andere thermische druk hydrolyse processen is bekend dat minstens een deel hiervan inert is en niet afgebroken wordt in de rioolwaterzuivering. De laatste weken van de pilot waar ook de PHOSPAQ en ANAMMOX draaide is er een restconcentratie CZV gemeten na ANAMMOX van 1830 mg CZV/l (opgelost, na filtratie). Stel dat dit inert CZV is en uiteindelijk leidt tot een verhoging van de CZV-concentratie in het effluent, dan zou dit voor de situatie van Almere leiden tot een toename van de effluent concentratie van 9 mg/l (uitgaande van een verdunningsfactor van 204). Het effluent van AWZI Almere zal hierdoor een CZV-concentratie bevatten van 33 mg/l + afgerond 9 mg/l = 42 mg/l. Dit is ruim onder de vergunningseis van 125 mg/l. Voor deze situatie is dit effect dus beperkt. Ook hier geldt dat dit anders kan zijn bij een rioolwaterzuivering met een centrale slibverwerking. Ervaringen met thermische druk hydrolyse laten dan zien dat dit effect niet altijd verwaarloosbaar is.

Omgekeerd kan ook worden gesteld dat als dit rest CZV wel biologisch afbreekbaar is, dit een effect heeft op de waterlijn van een zuivering. Op de AWZI Almere zou dit leiden tot een toename van de zuurstofvraag met 284 kg/dag, hetgeen verwaarloosbaar is ten opzichte van de zuurstofvraag van het influent.

4.4 NADROGING VAN DE TORWASH® SLIBKOEK

Door TORWASH® wordt een zeer droge slibkoek verkregen die als zodanig zou kunnen worden afgezet. Het gebruik als energiedrager ligt het meest voor de hand van de TORWASH® slibkoek en een hoge brandstofwaarde is dan cruciaal. Hoewel dit niet onderzocht is in het proefonderzoek gaat de business case die in het volgende hoofdstuk besproken wordt uit van nadroging en pelletisering van de TORWASH® slibkoek tot pellets met een droge stof gehalte van 90%. Hierdoor wordt de afzetbaarheid van de pellets vergroot en dit is gunstig voor de business case.

Doordat bij de mechanische ontwatering van de TORWASH® slibkoek een droge stof gehalte bereikt wordt van 50% zijn de effecten op de massabalans beperkt. De massabalans in Tabel 6 laat zien dat voor de case Almere er 1771 kg/h aan water naar het filtraat gaat (stroom S12) terwijl er nog slechts 52 kg/h aan water in de ontwaterde TORWASH® slibkoek aanwezig is (stroom S11). Als deze koek gedroogd wordt tot 90% droge stof betekent dit dat dan nog maar 46 kg/h water verdampt en eventueel gecondenseerd moet worden. De extra afvalwaterproductie is dan minimaal. Voor de case Dronten is het effect nog kleiner.

De effecten op de energiebalans zijn echter niet verwaarloosbaar en zijn daarom meegenomen in de berekeningen van de energiebalans in de volgende paragraaf. In vergelijking met de droging van ontwaterd slib is er wel een groot energievoordeel. Ontwaterd slib bevat gemiddeld 23% droge stof en dus 3,3 kg water per kg droge stof. TORWASH® slibkoek heeft een droge stof gehalte van 50% en bevat dus nog slechts 1 kg water per kg droge stof. Dit betekent dus dat er 70% minder water verdampt hoeft te worden bij de nadroging van TORWASH® slibkoek dan wanneer normaal ontwaterd slib wordt gedroogd.

4.5 ENERGIEBALANSEN

In deze berekeningen is uitgegaan van de slibvolumes die ook in het volgende hoofdstuk dienen als uitgangspunt voor de economische analyse (zie ook paragraaf 5.2). Er is uitgegaan van een case waarbij onvergist slib wordt verwerkt, vergelijkbaar aan de huidige situatie op de AWZI Almere. De slibproductie bedraagt dan 5.100 ton droge stof per jaar. In de tweede case is uitgegaan van een situatie met slibgisting. Daarvoor is de slibproductie berekend voor de situatie dat Almere een voorbezinking en slibgisting zou hebben. In die situatie is de slibproductie na gisting 4.505 ton droge stof per jaar.

Er is steeds gerekend met een voeding van 6 % droge stof (indamprest) en voor de balansen zijn de massa verdelingen gehanteerd zoals beschreven in de voorgaande paragrafen. Voor de berekening van de energie balansen zijn verder de volgende aannames gemaakt:

- Het verwarmingsmedium voor de TORWASH®-reactor is thermische olie, die wordt rondgepompt door de buitenmantel om de reactor. Voor het eerste deel van de verwarming van het slib (tot 150°C) wordt gebruik gemaakt van maximale warmteterugwinning uit de koelsectie van de reactor. De energie voor het restant van de verwarming (tot 200-210°C) wordt aangevuld door verbranding van het biogas (efficiëntie van de olieverwarming is 90%) dat wordt gevormd in de TORWASH®-effluentzuivering.
- In het geval van de combinatie vergisting en het TORWASH®-proces kan het tekort aan warmte worden aangevuld met warmte van biogas uit de vergister (de theoretische biogasopbrengst in deze case is genoeg voor deze toepassing: 1,6 miljoen Nm³/j, 65% methaanhalte, energie-inhoud 40.000 GJ/j).
- Zonder een slibvergisting wordt een eventueel warmtetekort aangevuld vanuit aardgas. In de business case uit het volgende hoofdstuk is aangenomen dat in beide gevallen aardgas wordt gebruikt.
- De verbrandingswaarde van biogas is 25,1 MJ/Nm³.
- De effluentzuivering en de membraanfilterpers gebruiken geen warmte.
- Voor de eenvoud van de berekening is geen onderscheid gemaakt tussen de warmtecapaciteit van water en die van de droge stof in het slib en is voor de volledige stroom de warmtecapaciteit van water gebruikt. In werkelijkheid is de warmtecapaciteit van de droge stof lager dan die van water en dit is dus een conservatieve aanname.

Na uitpersen in de membraanfilterpers wordt de filterkoek gedroogd tot een droge-stofgehalte van 90% (zie ook paragraaf 4.4). Er is van uitgegaan dat de thermische olie na verwarming van het TORWASH®-proces, wordt gebruikt in de droger. Deze olie komt met ongeveer 150°C uit de TORWASH®-reactor, hetgeen hoog genoeg is om in te zetten voor het droogproces van de koek. In het geval van drogen van onvergist zuiveringsslib lijkt er net genoeg warmte over te blijven in de thermische olie voor het droogproces. Wanneer de TORWASH®-reactor na een vergister wordt geplaatst zal het biogas uit de vergister gebruikt worden voor levering van warmte aan zowel de reactor als voor de nadroging. In deze massabalans wordt verder niet ingegaan op het exacte ontwerp van het droogproces. Dit zal één van de onderzoeksvragen worden voor het installatieontwerp binnen het demonstratieproject.

Voor het elektriciteitsverbruik is een extrapolatie gemaakt van het verbruik van de Wangenpomp die in de pilot-installatie is gebruikt. Deze pomp verbruikt op volle capaciteit (90 kg/u) 0,55 kW of wel 6,1 kW per ton slib. Voor de AWZI Almere zal per jaar 85.000 ton slib door de TORWASH®-reactor worden gepompt, wat neer komt op 519 MWh (1870 GJ/j) stroomverbruik. Een indicatie voor het verbruik van de membraanfilterpers is gevonden in ref [7]: 65 kWh/kg droge stof. Er is aangenomen dat de TORWASH®-effluentbehandeling een gelijke hoeveelheid

elektriciteit verbruikt als de membraanfilterpers. Het elektriciteitsgebruik in de huidige situatie (dus ontwateren met een centrifuge) is ingeschat op van 2520 GJ/j (700MWh).

In Tabel 8 wordt de energiebalans voor het conventionele ontwateringsproces en het TORWASH®-proces weergegeven.

TABEL 8 ENERGIEBALANS

Energiebalans	Ontwateren met PE niet vergist slib 5.100 t ds/jaar bij 6% ds	Torwash® niet vergist slib 5.100 t ds/jaar bij 6% ds	Torwash® vergist slib 4.505 t ds/jaar bij 6% ds	eenheid
Energieopbrengst warmte				
biogas productie		887.443	462.219	Nm3/j
Warmteopbrengst uit biogas		22.239	11.583	GJ/j
Energieverbruik warmte				
verbruik tbv TORWASH-proces		-16.779	-14.821	GJ/j
verbruik tbv nadrogen		-5.886	-4.318	GJ/j
WARMTEBALANS		-426	-7.555	GJ/j
Energieverbruik elektriciteit*				
verbruik TORWASH®-proces		-4.779	-4.206	GJprim/j
verbruik waterlijn		-1.587	-1.395	GJprim/j
verbruik membraanfilterpers		-1.587	-1.395	GJprim/j
verbruik ontwateringscentrifuge	-6.440			GJprim/j
ELEKTRICITEITSBALANS	-6.440	-7.953	-6.997	GJprim/j

* uitgedrukt in primair energieverbruik (9,2 GJprim/kWh)

De berekening laat zien dat de warmtebalans voor de TORWASH® behandeling binnen de onzekerheid van de berekening waarschijnlijk net wel of net niet sluit voor de situatie dat niet vergist slib wordt verwerkt. Bij de behandeling van vergist slib is er een warmtetekort. Deze kan aangevuld worden door een deel van het biogas uit de vergisting ook in te zetten voor de TORWASH® behandeling. In deze case is dan ongeveer 19% van de biogas productie van de bestaande gisting nodig voor de TORWASH®-behandeling. Het elektriciteitsverbruik van de TORWASH® behandeling is iets hoger dan in de bestaande situatie.

Een belangrijk voordeel van de TORWASH® behandeling is dat het slib zonder PE kan worden ontwaterd. Daarom is het ook interessant om te zien welk energievoordeel dit oplevert. De productie van kationisch PE heeft een primaire energiebehoefte van 133,7 MJ/kg actief (66,7 MJ/kg emulsie, zie ook STOWA rapport 2012-06). In de situatie zonder gisting en TORWASH® behandeling vertegenwoordigt het PE verbruik een energiewaarde van 7484 GJprim/jaar (bij een PE verbruik van 11 g/kg ds) en in de situatie met gisting 4207 GJprim/jaar (bij een PE verbruik van 7 g/kg ds).

Een ander belangrijk energie aspect van de TORWASH® behandeling is de energiewaarde van de geproduceerde TORWASH® pellets. Na droging vertegenwoordigen deze een stookwaarde (LHV) van respectievelijk 22.000 GJ/jaar (vergist slib) en 54.000 GJ/jaar (ongegist slib). Opvallend is dat de stookwaarde analyses laten zien dat de TORWASH® behandeling de stookwaarde (LHV) van de organische stof verhoogt tot ca. 25 MJ/kg organische stof (27 MJ/kg op basis van HHV), terwijl die voor normaal ontwaterd slib 21 MJ/kg organische stof is. Dit duidt op een verdichting van de chemische energie in de vaste fractie.

5

TECHNISCH-ECONOMISCHE ANALYSE

5.1 INLEIDING

De resultaten uit de voorgaande hoofdstukken zijn gebruikt als input voor de voorlopige business case voor de TORWASH®-behandeling van zuiveringsslib. Niet alleen de technische prestaties, maar ook het economische perspectief is nodig om te bepalen of TORWASH® een kansrijke behandelingstechnologie is voor zuiveringsslib.

De economische analyse omvat de investeringskosten en de operationele kosten. Eventuele inkomsten uit verkoop van bijproducten zijn niet mee genomen in de business case.

De uitkomsten zijn vergeleken met gangbare processen die het meest worden toegepast voor de voorbehandeling en verwerking van zuiveringsslib. In deze vergelijking is voor twee types zuivering een vergelijking gemaakt, te weten:

- ontwateren van niet vergist zuiveringsslib met PE door een centrifuge, transport naar een mono-slibverbrandingsinstallatie (SVI) en verbranding versus TORWASH®, transport naar een Bio-Energie Centrale (BEC) en verbranding; voor verdere uitleg zie paragraaf 5.2
- ontwateren van vergist zuiveringsslib met PE en centrifuge, transport naar SVI en verbranding versus TORWASH®, transport naar cementproducent en verbranding; voor verdere uitleg zie paragraaf 5.2.

5.2 AANNAMES

Gedurende het EnCORE-project zijn er gegevens verzameld en gecombineerd tot een voorlopige business case voor toepassing van het TORWASH®-proces op AWZI Almere. Omdat het hier gaat om experimenten op pilotschaal (verhouding 1:400 ten opzichte van de volle RWZI schaal), is de projectie van de gegevens naar een volle schaal onnauwkeurig en zullen leiden tot een grote marge van de getallen binnen deze business case. Hier komt nog bij dat de opschalingsrisico's nog niet volledig bekend zijn. Om deze redenen is dan ook besloten om als volgende stap een schalingsfactor van 20 aan te houden om een beter inzicht te krijgen in de processen en mechanismes in de TORWASH® reactor, voordat de stap naar volle schaal gemaakt kan worden.

Voor berekeningen die ten grondslag liggen aan de business case is uitgegaan van de implementatie van het TORWASH®-proces op AWZI Almere (300.000 i.e.) met een productie van 5.100 ton droge stof (ds) niet vergist zuiveringsslib per jaar. Naast deze berekening is ook een simulatie gemaakt van de situatie dat AWZI Almere een voorbezinktank en een slibvergister zou hebben geïnstalleerd. Door aanwezigheid van een voorbezinktank wordt ongeveer 20% meer droge stof afgevangen, waardoor de slibproductie (primair en secundair) voor vergisting zou toenemen tot 6.160 ton droge stof per jaar. Na vergisting en als input voor de TORWASH® reactor is in deze variant uitgegaan van 4.505 ton droge stof per jaar.

In deze business case wordt een voorspelling gemaakt van de benodigde additionele investeringen en operationele kosten voor de toepassing van het TORWASH®-proces voor ontwatering van niet vergist en van vergist zuiveringsslib.

Omdat het TORWASH®-proces het behandelde zuiveringsslib omzet in een droge biobrandstof, is in het kader van deze business case ook onderzocht welke afzetkanalen geschikt zijn om deze te verwerken. Vanwege de afvalstatus van de droge biobrandstof dient de afnemer een vergunning te hebben om het materiaal te mogen verwerken. Hieruit kwam naar voren dat biomassa energiecentrales (BEC's) met een AVI-vergunning (brandstof) en de cementindustrie (brandstof en mineralen) geschikte kandidaten zijn. Gezien de samenstelling (veel mineralen) is de biobrandstof gemaakt uit vergist zuiveringsslib interessant voor de cementindustrie, terwijl een BEC een brandstof wil met zoveel mogelijk organisch materiaal en zo min mogelijk mineralen. Buiten het EnCORE project is onderzocht hoe het slib zich laat drogen, om schimmelvorming op de TORWASH®-koek tegen te gaan en om de waarde als brandstof te verhogen. Daarom wordt in de economische analyse nu uitgegaan van nadroging van de filterkoek tot een droge stof gehalte van 90% (zie paragraaf 4.4). Hierdoor kan worden gerechtvaardigd dat de verwerkingskosten voor de biobrandstof gelijkliggen aan de kosten voor thermisch gedroogd zuiveringsslib (€30 per ton) zoals beschreven in ref [8]. Het is belangrijk te realiseren dat dit tarief sterk afhankelijk kan zijn van vraag en aanbod op de markt.

Er is in deze case geen rekening gehouden met mogelijke inkomsten uit verkoop van struviet als bijproduct.

5.3 INVESTERINGSKOSTEN

Voor de benodigde investeringen is uitgegaan van installatie van het TORWASH®-proces op een bestaande zuivering en zijn de volgende onderdelen meegenomen:

- Aanschaf- en installatiekosten (civiel, werktuigbouwkundig en elektrisch (CWE) van de TORWASH®-reactor en randapparatuur (gaswasser, pomp, thermisch olieverwarming, buffertanks), effluentzuivering, membraanfilterpers voor zover "inside battery limits". Aansluitingen naar en van de zuivering zijn niet in deze kosten opgenomen;
- Opslagfactor van 65% van de bovengenoemde aanschaf- en installatiekosten voor de kosten buiten de installatie, zoals bouwrente, projectkosten, interne uren, vergunningen, BTW, enz.

Voor de bepaling van de investering voor een volle schaal TORWASH®-installatie is gebruik gemaakt van informatie van projectpartners. De kosten voor de TORWASH®-reactor zijn bepaald door TNO, Paques heeft een prijsindicatie gegeven voor de waterlijn en Limburg Filter voor de membraanfilterpers. Voor prijzen van randapparatuur zoals buffervaten, olieverwarming en gaswassing is de literatuur geraadpleegd. Met betrekking tot de capaciteit (en dus de investeringskosten) van de TORWASH®-effluent zuivering moet worden aangetekend dat deze voor de business case maximaal is berekend, omdat er geen rekening is gehouden met eventuele restcapaciteit op de zuivering zelf voor P- en N-verwijdering. Deze is zeker aanwezig, omdat de deelstroombehandeling van de bestaande ontwatering wegvalt. Ook is er van uitgegaan dat alle P en N als resp. fosfaat en ammonium in het TORWASH®-effluent aanwezig zijn.

De basis voor de investeringsraming op grotere schaal zijn de apparaatkosten voor een TORWASH®-reactor met een schaalgrootte van 0,5 m³ slib/uur bij een droge stof gehalte van 6%. Dit is de schaalgrootte van de geplande demonstratie-installatie en het is de verwachting dat in de toekomst modules van deze capaciteit parallel worden geschakeld. Met behulp van de volgende opschalingsformule zijn de beschikbare investeringskosten voor de TORWASH®-reactor vertaald van deze 0,5 t/u demonstratieschaal naar een full-scale TORWASH®-installatie voor de AWZI Almere:

$$Kostprijs_{capaciteit_x} = Kostprijs_{capaciteit_y} \left(\frac{Capaciteit_y}{Capaciteit_x} \right)^n \quad \text{Vergelijking 1}$$

Voor een installatie als de TORWASH®-reactor is de waarde van n bepaald op 0,70. Om een onzekerheidsmarge aan te geven zijn voor de exponent n de volgende waarden gekozen: min 0,60, mid: 0,70 en max: 0,80. Voor de randapparatuur is voor de exponent n 0,60 gekozen, omdat de investering zich meer kwadratisch verhoudt tot het volume. Voor de onzekerheidsmarge voor de randapparatuur zijn de volgende waarden gekozen: min 0,55, mid: 0,60 en max: 0,65.

In de volgende tabel is de totale investering gegeven voor de bouw van de TORWASH®-installatie voor niet vergist en voor vergist zuiveringsslib. Omdat er in het geval van de aanwezigheid van een voorbezinktank en een slibvergister minder droge stof overblijft, wordt de TORWASH®-installatie kleiner en daarom goedkoper.

TABEL 9

UITSPLITSING VAN DE INVESTERINGSKOSTEN

Totaal investeringsbedrag	onvergist slib	vergist slib
	5.100 t ds/jaar bij 6% ds	4505 t ds/jaar bij 6% ds
buffertank	100.000	92.000
TORWASH® reactor	6.045.000	5.538.000
bezinktank	100.000	92.000
waterlijn	4.182.000	3.879.000
filterpers	996.000	924.000
droger	996.000	924.000
Grand Totaal (€)	12.419.000	11.449.000

5.4 OPERATIONELE KOSTEN

Voor bepaling van de kosten van de toepassing van het TORWASH®-proces voor slibontwatering zijn de volgende posten meegenomen:

- Kapitaalskosten;
- Personeel;
- Slibeindverwerking (verbranden in SVI of in een BEC);
- Materiaal consumptie (polyelektrolyt);
- Energieconsumptie, elektriciteit en warmte;
- Onderhoud.

Waar mogelijk zijn bandbreedtes in de berekeningen meegenomen:

- Om de kapitaalskosten te bepalen zijn de volgende parameters toegepast:
 - Afschrijvingsperiode van de investering: 15 jaar;
 - Rentevoet: 2%;
- Voor de integrale personeelskosten wordt € 75.000 gerekend;

- TORWASH® gebruikt haar eigen deelstroombehandeling voor CZV-, P- en N-verwijdering;
- Voor het transport naar de eindverwerking wordt € 10 per ton slib (ontwaterd of gedroogd) gerekend;
- De prijs van polyelektrolyt (PE) is gesteld op € 5/kg actief PE;
- De energiebalans uit het vorige hoofdstuk vormt de basis voor de berekening van de energiekosten van het TORWASH®-proces en de randapparatuur;
- Voor verwarming van het TORWASH®-proces wordt het biogas gebruikt, dat wordt gevormd bij de anaerobe behandeling van het TORWASH®-effluent en wanneer nodig aangevuld met extern aardgas;
- Als bandbreedte voor de energiekosten is een vaste waarde van -25% - +25% gekozen ten opzichte van de berekende kosten;
- De jaarlijkse onderhoudskosten worden gelijkgesteld op 1,5% van de apparaat- en installatiekosten.

Naast deze algemene uitgangspunten zijn per ontwateringsmethode in Tabel 10 de specifieke aannames weergegeven.

TABEL 10 SPECIFIEKE AANNAMES VOOR DE BEREKENINGEN VAN DE BUSINESS CASE

bandbreedte	afname	finale droge-	PE verbruik (kg	eind verwerkings-
	droge stof	stofgehalte	actief/ t ds)	kosten (€/ton)
			min-max	min-mid-max
ontwateren niet vergist zuiveringsslib met PE en decanter	0%	22%	10 - 12	75 - 85 - 105
ontwateren niet vergist zuiveringsslib met TORWASH® en membraanfilterpers	48%	50%		0 - 30 - 60
vergisten primair en secundair zuiveringsslib; ontwateren vergist zuiveringsslib met PE en decanter	27%	24%	6 - 8	75 - 85 - 105
vergisten primair en secundair zuiveringsslib; ontwateren vergist zuiveringsslib met TORWASH® en membraanfilterpers	51%	53%		0 - 30 - 60

Met deze gegevens kan de volgende kostenindicatie voor het TORWASH®-proces worden berekend.

TABEL 11 KOSTENINDICATIE VAN HET TORWASH®-PROCES

KOSTENINDICATIE TORWASH	Niet vergist zuiveringsslib (€/ ton ds)		Vergist zuiveringsslib (€/ ton ds)			
Annuïteit (investeringen)	€ 150	-	€ 234	€ 158	-	€ 242
Onderhoud	€ 18	-	€ 28	€ 19	-	€ 29
Personeel	€ 7	-	€ 29	€ 7	-	€ 22
Energieverbruik	€ 13	-	€ 22	€ 23	-	€ 39
Slibeindverwerking* (incl. transport)	€ 10	-	€ 73	€ 9	-	€ 64
Totaal incl. BTW	€ 199	-	€ 386	€ 216	-	€ 395

*bij een verwerkingstarief van de Torwash pellets van €30/ton

5.5 BUSINESS CASE

Wanneer de kosten van het TORWASH®-proces worden vergeleken met de bestaande ontwateringsmethode, kan een business case worden berekend om de haalbaarheid van deze innovatie te bepalen. In Tabel 12 zijn de voor het TORWASH®-proces berekende (middel)kosten vergeleken met kosten voor de bestaande ontwatering en eindverwerkingsmethodes voor zowel niet vergist (Tabel 12a) als vergist zuiveringsslib (Tabel 12b).

TABEL 12A UITSPLITSING EN VERGELIJKING VAN DE KOSTEN VOOR SLIBVERWERKING VAN NIET VERGIST SLIB UIT DE AWZI ALMERE (5100 TON DS/JAAR), VERMELD ALS TOTAAL JAARLIJKSE KOSTEN EN ALS GENORMALISEERD PER TON DROGE STOF DIE MET DE TORWASH®-INSTALLATIE WORDT VERWERKT

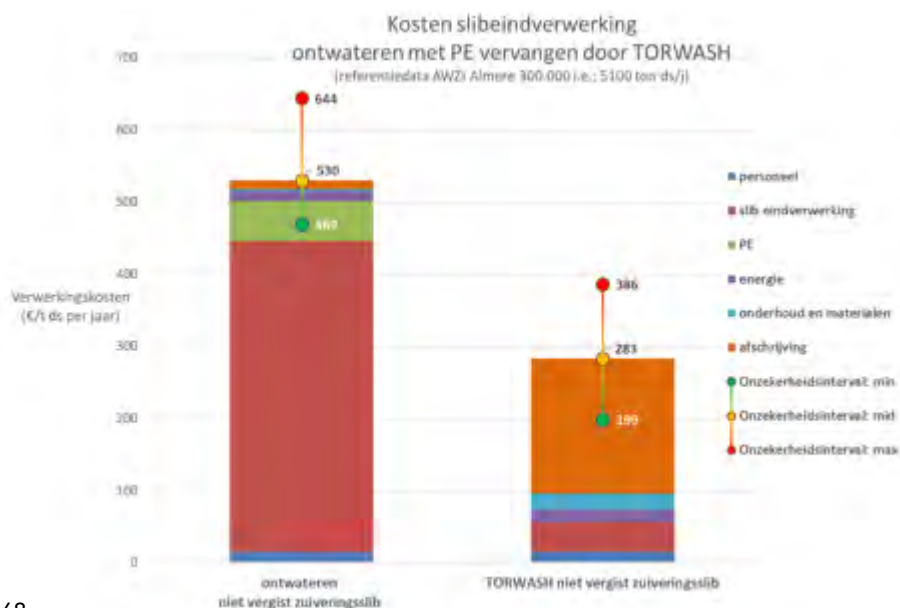
	ontwateren niet vergist zuiveringslib		TORWASH niet vergist zuiveringslib	
	x1000 €/j	€/j/ton ds	x1000 €/j	€/j/ton ds
afschrijving	55	11	828	162
rente	8	2	124	24
personeel	75	15	75	15
slibeindverwerking (incl. transport)	2.202	432	212	42
PE	281	55		
energie	70	14	90	18
onderhoud/materialen	12	2	113	22
totale kosten	2.703	530	1.442	283

TABEL 13B UITSPLITSING EN VERGELIJKING VAN DE KOSTEN VOOR SLIBVERWERKING VAN VERGIST SLIB UIT DE AWZI ALMERE (SIMULATIE, 4505 TON DS/JAAR NA GISTING), VERMELD ALS TOTAAL JAARLIJKSE KOSTEN EN ALS GENORMALISEERD PER TON DROGE STOF DIE MET DE TORWASH®-INSTALLATIE WORDT VERWERKT

	ontwateren vergist zuiveringslib		TORWASH vergist zuiveringslib	
	x1000 €/j	€/j/ton ds	x1000 €/j	€/j/ton ds
afschrijving	55	12	763	169
rente	8	2	114	25
personeel	75	17	75	17
slibeindverwerking (incl. transport)	1.783	395	166	37
PE	158	35		
energie	70	16	139	31
onderhoud/materialen	12	3	104	23
totale kosten	2.161	480	1.361	302

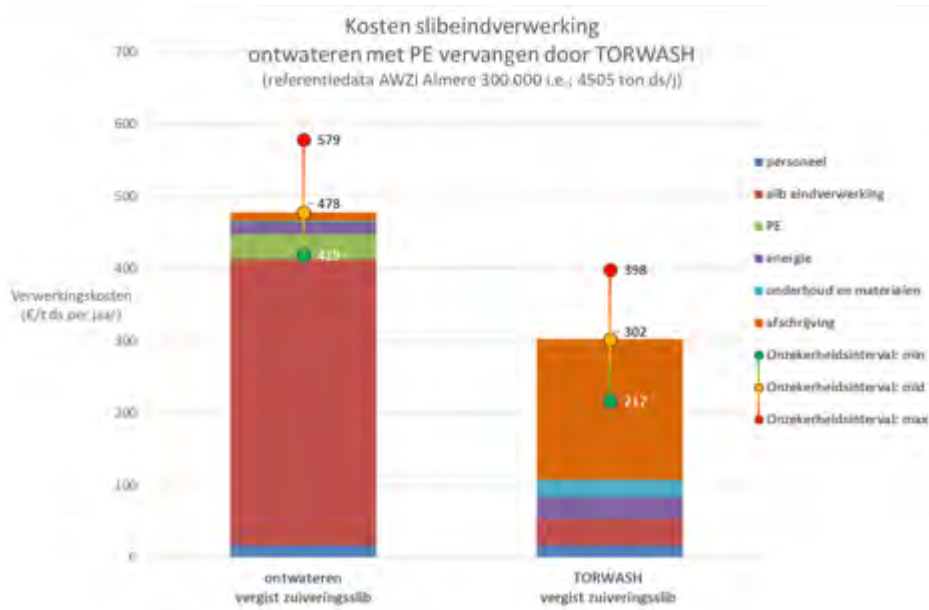
Alle genormaliseerde waarden uit bovenstaande tabellen zijn in de volgende twee figuren weergegeven. Tevens zijn voor alle posten de bandbreedtes gesommeerd en is de onzekerheid in de berekening van de verwerkingskosten (per ton droge stof) weergegeven.

FIGUUR 30 GRAFISCHE WEERGAVE VAN DE KOSTEN VAN HET TORWASH®-PROCES VOOR NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB UIT DE AWZI ALMERE IN VERGELIJKING MET DE BESTAANDE METHODE VOOR EINDVERWERKING



FIGUUR 31

GRAFISCHE WEERGAVE VAN DE KOSTEN VAN HET TORWASH®-PROCES VOOR VERGIST ZUIVERINGSSLIB UIT DE AWZI ALMERE (SIMULATIE) IN VERGELIJKING MET DE BESTAANDE METHODE VOOR EINDVERWERKING



In Figuur 30 en Figuur 31 is duidelijk te zien dat de kosten voor de bestaande ontwateringsmethode vooral bestaan uit uitgaven voor slibeindverwerking in een SVI, terwijl bij het TORWASH®-proces de kapitaalskosten de grootste post vormen. Echter de winst op de kosten voor slibeindverwerking bij het TORWASH®-proces is aanmerkelijk hoger dan de extra kapitaalskosten vanwege de aanschaf van een TORWASH®-installatie en deze marge zal de komende jaren alleen maar gunstiger uitvallen, omdat verwacht wordt dat de tarieven voor slibeindverwerking verder zullen stijgen tot ruim boven €100 per ton slib.

Rekening houdend met de verwachte lagere eindverwerkingskosten voor de TORWASH®-koek, zullen de kosten voor eindverwerking van zuiveringslib met het TORWASH®-proces respectievelijk dalen met 47% voor niet vergist slib en met 37% voor vergist slib ten opzichte van de bestaande techniek van slibeindverwerking. Hierbij moet opgemerkt worden dat het ongegiste slib van Almere in vergelijking met andere ongegistte slibben een zeer lage gloeirest heeft. In 2018 was circa 70% van al het slib dat naar een eindverwerking ging vergist slib.

5.6 DUURZAAMHEID

In het kader van dit onderzoek kon geen volledige analyse van de duurzaamheid worden uitgevoerd. Dit zal in een later fase nog moeten worden gedaan waarbij de TORWASH®-behandeling dan ook vergeleken zou moeten worden met bestaande en in ontwikkeling zijnde ontwateringstechnieken en slibverwerkingstechnieken. In deze paragraaf wordt daarom volstaan met een kwalitatieve beschouwing. Getallen in deze paragraaf hebben steeds betrekking op dezelfde cases als voor de economische analyse.

De TORWASH®-behandeling onderscheidt zich van andere technieken door de sterke focus op de verbetering van de ontwatering en de productie van een de TORWASH®-pellet waarvoor afzet als energiedrager wordt voorzien.

Ten opzichte van de bestaande stand van de techniek van slibontwatering en slibeindverwerking heeft de TORWASH®-behandeling de volgende voordelen:

- Een sterke reductie van het af te voeren slibvolume met 76-80% als een slibkoek van 50% droge stof wordt geproduceerd of 87-89% als ook nog nagedroogd wordt tot 90% droge stof.
- Geen noodzaak meer tot het gebruik van PE (poly-elektrolyt) voor de ontwatering. Dit scheelt ca. 7500 GJprim/jaar voor de behandeling van onvergist slib en ca. 4200 GJprim/jaar voor behandeling van vergist slib.

De TORWASH® behandeling vertoont overeenkomsten met thermische druk hydrolyse (TDH) processen maar onderscheidt zich daarvan door de sterke focus op de betere ontwatering van slib, waardoor een brandstof pellet geproduceerd wordt en er geen nat slib meer wordt verbrand. TDH-processen reduceren ook het af te voeren slibvolume, maar richten zich tegelijk op het maximaliseren van de biogasproductie.

Thermische droging van ontwaterd slib produceert ook een brandstof pellet en het gedroogde slib zal een vergelijkbare afzetroute kennen als TORWASH® pellets. TORWASH heeft ten opzichte van slibdroging het voordeel dat een wezenlijk groter aandeel van het water mechanisch verwijderd kan worden. Hierdoor hoeft 85-90% minder water thermisch te worden verdampt hetgeen leidt tot een grote energiebesparing. Anderzijds levert TORWASH® iets minder energie in de vorm van biogas op en wordt meer organische stof afgebroken die dan niet beschikbaar is als brandstof.

In vergelijking met gedroogd slib hebben TORWASH® pellets het voordeel dat de behandeling de brandstofkwaliteit verbetert. Zo bevatten zij minder zwavel en stikstof doordat een groter deel van de zwavel en stikstof in het rejectiewater terecht komt dan bij normale ontwatering en eventueel gisting. Dit verlaagt de productie van SOx en NOx tijdens de verbranding van het slib. De extra stikstof in het rejectiewater is wel een aandachtspunt. Ook zijn de gehalten van goed oplosbare verbindingen als kalium, natrium en chloride lager doordat verder ontwaterd wordt. Dit zijn verbindingen die een nadelige invloed op de verbranding kunnen hebben. Het kwikgehalte van zuiveringsslib is in het verleden een knelpunt voor meeverbranding van zuiveringsslib geweest. Vanwege de lage concentraties is het maken van een massabalans lastig en de huidige proeven geven nog geen goed inzicht in de massabalans voor kwik.

Of het mogelijk is om de massaverdeling van fosfaat te sturen via het TORWASH®-proces is nog niet zeker. In sommige gevallen wordt fosfaat vrij gemaakt en is het terug te winnen uit het rejectiewater.

6

DISCUSSIE

In dit hoofdstuk wordt teruggekoppeld naar het doel van het EnCORE project en de bereikte resultaten. Een aantal specifieke zaken die wat nadere discussie behoeven worden apart besproken.

6.1 ALGEMENE DISCUSSIE

Het hoofddoel was aan te tonen dat het TORWASH®-proces op pilot-schaal kan werken in een continue reactor. Dit doel is aangetoond voor niet-vergist slib van de AWZI Almere en vergist slib van de AWZI Dronten. Ook is dit doel aangetoond voor een tweetal andere zuiverings-slibben, maar met minder complete onderbouwing. Van ingedikt zuiveringsslib zonder PE van beide AWZI's is een duurproef van ten minste 200 uur uitgevoerd.

De laboratoriumexperimenten die vooraf gingen hebben aanwijzingen voor procescondities (vooral de procestemperatuur) opgeleverd die tijdens de pilotexperimenten bevestigd zijn:

- Op hoofdlijnen is het gedrag van zuiveringsslib onder TORWASH® hetzelfde en daarmee goed voorspelbaar.
- In alle gevallen bleek de optimale reactietemperatuur binnen de verwachte temperatuurrange van 180-200°C te liggen.
- Bij het uitpersen van een zuiveringsslib na een TORWASH®-behandeling op 10 bar statische druk in een Marecopers werd een perskoek gemaakt met 50-60% droge stof.
- In principe is het zuiveringsslib na een TORWASH®-behandeling uitpersbaar zonder voorfiltratie, maar het tempo en daarmee de prestaties worden beter als dit wel plaatsvindt. In het laboratorium werd hiervoor vacuümfiltratie gebruikt; in de pilot-installatie is het decanteren toegepast door middel van een centrifuge. Na optimalisatie van het ontwateringsproces met behulp van een membraanfilterpers, werd bevestigd dat deze stap niet noodzakelijk is.
- Het filtraat is goed vergistbaar en de biogasproductie is aanzienlijk, maar niet volledig. De CZV-omzetting loopt terug bij toenemende TORWASH® behandelingstemperatuur.
- Het filtraat is zo geconcentreerd dat verdunning waarschijnlijk nodig is voor een betrouwbare werking van de anaerobe IC-reactor en de ANAMMOX-reactor.
- Niet vergist slib van AWZI Almere geeft betere resultaten dan vergist slib van AWZI Dronten in de zin van een lagere procestemperatuur en betere ontwaterbaarheid.
- De verdeling van de massa, de verbrandingsenergie en de meeste elementen, tussen vaste fase en vloeistoffase zijn vergelijkbaar, al zijn er bepaalde elementen die hier een uitzondering op maken.

De resultaten van de pilotexperimenten bevestigen dat het TORWASH®-principe voor zuiverings-slib ook opgeschaald naar een continue pilot goed werkt. Toch zijn er wel verschillen:

- Tijdens de laboratoriumexperimenten is gewerkt met een batch reactor, die langzaam opwarmt en afkoelt (elk traject 3 uur), terwijl in de pilot-installatie opwarming en afkoeling elk ca. 15 minuten duurt.
- Druk is een controleparameter geworden in de pilot en niet langer een parameter die de voortgang van de reactie weergeeft en alleen maar gemeten wordt.
- In de batchreactor is dankzij goed roeren sprake van een uniforme temperatuur, die tijdens de reactieperiode constant blijft. De continue reactor heeft een temperatuurprofiel.
- In de pilot bleek warmteoverdracht een lastig punt te zijn, wat voor de doorontwikkeling van het TORWASH®-concept gevolgen zal hebben voor het ontwerp van de reactor.
- In een laboratoriumtest kan de proef slagen met een veel hoger gehalte vaste stof als voeding voor het TORWASH®-experiment (tot boven 10%), zolang het slib maar roerbaar is. In de pilot-installatie moet de viscositeit veel lager zijn en is een concentratie droge stof van 5-6% in de huidige installatie het maximum.
- Het gas dat vrijkomt tijdens de reactie in de pilot stinkt veel meer dan het gas wat na een laboratoriumtest wordt gevonden. Het bevat een concentratie H₂S waarmee tijdens het vervolg, de doorontwikkeling van TORWASH®-technologie rekening mee moet worden gehouden.
- Anaerobe afbreekbaarheid pilot en labtesten lijken vergelijkbaar, maar eventueel langdurige effecten op de biomassa is niet in het onderzoek meegenomen.
- Het terugwinnen van fosfor in de vorm van struviet (fysisch-chemisch proces) lijkt haalbaar. Dit is in dit onderzoek niet uitgevoerd.
- Het omzetten van ammonium in het filtraat door het anammox proces lijkt haalbaar op basis van laboratoriumtesten, maar deze zijn echter vanwege logistiek-technische zaken niet op pilotschaal vastgesteld.

6.2 SPECIFIEKE ZAKEN

Hieronder een aantal specifieke zaken die voor de algehele discussie van de resultaten minder belangrijk zijn, maar die toch de aandacht verdienen.

6.2.1 DROGE STOF-GEHALTE, WARMTEOVERDRACHT EN ROERBAARHEID

In de batch reactor was het droge-stofgehalte van het slib van ondergeschikt belang. De roerder zorgt voor gedwongen convectie en een uniforme temperatuur in de reactor. In de pilot-reactor is geen roerder aanwezig. Bewegende doorvoeren in een druk reactor zijn ongewenst en tijdens langdurige operatie kunnen haren en ander zaken accumuleren. Dit heeft een direct negatief effect op de opwarmingsnelheid, die boven 5% droge stof in het slib snel afnam. Het verhogen van de wand-temperatuur is maar beperkt mogelijk, want daarmee verwarm je vooral de buitenste centimeter van het slib in de buis. Gebleken is dat voordat in de kern van de reactor de ingestelde temperatuur bereikt wordt, de buitenste laag al begint met inkolen, wat niet gewenst is. Vooralsnog lijkt de oplossing te zijn om met een laag gehalte droge stof te werken. Nadelen hiervan zijn, dat er meer warmtebehoefte is en dat de reactor veel groter (langer) moet worden.

6.2.2 ELEMENTENVERDELING

De distributie van elementen vereist een uitgebreide set chemische analyses voor zowel uitgangsmateriaal als producten. Binnen dit project was ruimte om dit te doen voor twee soorten slib in laboratorium- en pilot-omstandigheden. Er is in dit project gekozen voor

vergist slib en niet vergist slib. Er zitten verschillen tussen die twee, die in het onderzoek van 2015 [1] al naar voren zijn gekomen en die door dit onderzoek zijn bevestigd. Het koppelen van een elementendistributie aan het onderscheid vergist of niet vergist slib is niet volledig onderbouwd. Er zijn onvoldoende gegevens om te bepalen of vergisting onderscheidend is of dat het per individueel slib verschilt. Van invloed zijn mogelijk het asgehalte, de vorm waarin fosfaat aanwezig is in het uitgangsmateriaal en de pH voor, tijdens en na TORWASH®. Vooralsnog wordt als werkhypothese gesteld dat er vergelijkbare verdelingen van elementen zijn voor andere soorten vergist en niet-vergist slib. Voor veel elementen is dit een redelijke veronderstelling, maar dit moet wel bevestigd worden. Voor fosfor weten we al dat er verschillen optreden en het is aannemelijk dat er meer factoren een rol spelen bij het gedrag van fosfor dan alleen het feit of het slib wel of niet vergist is. Ook voor stikstof is nader onderzoek dringend gewenst.

Inzicht in de achterliggende mechanismen kan helpen om de verdelingen van de kritische elementen zoals fosfaat en stikstof beter te kunnen voorspellen. Hiervoor is meer onderzoek nodig. Daarbij is het van belang te realiseren dat een continue bedrijfsvoering andere procescondities geeft en dus andere verdelingen kan geven dan batch testen in het lab.

6.2.3 TUSSENTIJDEN INDIKKEN

In de laboratoriumproeven wordt de productslurry van TORWASH® ontdaan van de bulk van filtraat door vacuümfiltratie. De filterkoek met typisch 25% droge stof wordt gebruikt voor perstesten in de Carver Die en de Marecopers. Dit wordt uit praktische overwegingen gedaan omdat de Carver Die en de Marecopers veel minder lekkage geeft bij toepassing van pasta en ook worden de perskoeken dikker, zodat ze beter de toekomstige opgeschaalde situatie benaderen. Dit vooraf indikken is echter niet strikt noodzakelijk. De opbouw van de filterkoek en de perskoek van materiaal na TORWASH® is poreus en maakt het mogelijk dat filtraat te allen tijde door de koek geperst kan worden. De kanaaltjes zijn echter klein en het tempo waarin filtraat erdoor gaat is beperkt. Niet-ingedikte slurry heeft dus veel meer tijd nodig. In het laboratorium is gebleken dat wanneer een vooraf ingedikte product in ca. 2 minuten geperst kan worden, het niet-ingedikte materiaal er iets als 30 minuten over doet. Er wordt dan net zolang op 65 bar geperst tot niet meer merkbaar is dat er vocht uit komt. Het droge-stofgehalte van het eindproduct is in beide gevallen gelijk. Het kost alleen meer tijd.

Voor de productslurry uit de pilotinstallatie is hetzelfde gevonden. In de Marecopers is ingedikte en niet-ingedikte materiaal gebruikt. Ook daar bleek het vooral praktisch te zijn om vooraf een vacuümfiltratie toe te passen om dezelfde redenen.

De perstesten op grote schaal (met name de testen met de Boskalis installatie) ondervonden ook praktische problemen, die o.a. met lange vultijden te maken hadden en daardoor vooraf uitzakken van vaste stof met als gevolg inhomogene perskoeken. In eerste instantie werd de Boskalis installatie gevoed met gravitair bezonken slib (ca. 7% indamprest), maar dat leidde tot inhomogene filterkoeken. Vervolgens is de filterpers gevoed met slib dat tot 11% indamprest was ingedikte met een decanteer centrifuge. Dit verbeterde wel de homogeniteit van de slibkoeken maar het centraat uit de centrifuge bevatte nog ruwweg de helft van de droge stof. Onder gewijzigde vulcondities bleek het later wel mogelijk om homogene koeken te krijgen met de filterpers van Limburg Filter met alleen gravitair ingedikte slib. Bij verdere opschaling zullen de condities voor ontwatering van het TORWASH® slib verder uitgezocht moeten worden.

6.2.4 METING BIOGASPRODUCTIE

De hoeveelheid biogas die in de pilot van Paques gemeten wordt wijkt af van de hoeveelheid biogas die op basis van de CZV-omzetting verwacht mag worden. Bij filtraat van de TORWASH®-behandeling van niet vergist slib van Almere wordt meer biogas gevonden, bij filtraat van de TORWASH®-behandeling van vergist-slib uit Dronten juist minder. De verschillen staan ook grafisch weergegeven, o.a. in Figuur 24. Er kon geen verklaring worden gevonden van deze discrepantie in de resultaten. Het lijkt geen systematisch verschil te zijn, maar het is niet duidelijk of de analyse, de bemonstering, de CZV-verdunning of stroommeting en -analyse op biogas gecompromitteerd was. Wel kan gesteld worden dat de pilotinstallatie waarmee de biogasproductie gemeten is geplaagd werd door storingen en dat dit in eerste instantie tot fouten in de meting van de hoeveelheden geproduceerd biogas heeft geleid. De CZV-bepalingen zijn gedaan door een Sterlab™ en volgen de trends die eerder door TNO gevonden zijn bij eerder onderzoek.

6.2.5 METASTABIEL FILTRAAT

Op basis van de resultaten in Tabel 2 (paragraaf 3.4.3) is geconstateerd dat de verdunning van het afvalwater gunstig lijkt te zijn omdat het de anaerobe biologische afbreekbaarheid verhoogt en het ongecontroleerde neerslagpotentieel van fosfaat-zouten vermindert. Hieruit zou verder de conclusie getrokken kunnen worden dat de oplossing metastabiel is. Dit zou voor het vervolg uitgezocht moeten worden. Als er inderdaad na verloop van tijd meer fosfaat naar de vaste fase gaat kan dit effect gebruikt worden om de fosfaat verdeling te sturen.

6.2.6 AMMONIUM NA BELUCHTING

Zoals weergegeven in Tabel 5 (paragraaf 3.5.3) is ammonium na beluchting 838 mg/l. Dit ammonium kan verwijderd worden tot minder dan 100 mg/L door toepassing van het ANAMMOX-proces. Door technische storingen bereikte deze reactor geen stabiele toestand. De extra uitgevoerde partijtest gaf echter geen toxiciteit op korte termijn aan, wat de geschiktheid van het ANAMMOX-proces ondersteunt.

6.2.7 FE, CA EN P VERDELING

De metingen van de pilot-installatie zitten dicht tegen het opgeschaalde systeem aan, maar in de metingen zit wat meer onzekerheid in de resultaten, als gevolg van de vele handelingen en de minder goed gecontroleerde omstandigheden bij de pilot-testen. Dit gebeurt ondanks dat langdurig op stabiele condities is gewerkt. Zo is het bijvoorbeeld bevreemdend dat bij de elementverdeling die berekend is bij de TORWASH®-behandeling van slib uit Dronten in de pilot-installatie, zie Figuur 26, Fe, Ca en diverse zware metalen volgens de berekeningen slechts voor 70-80% in de perskoek blijven, terwijl getallen rond 100% verwacht werden. Vermoedelijk zit er fout in de bepaling van de totale massaopbrengst die voor de normering gebruikt wordt, want er zijn een heel aantal elementen die in Figuur 26 rond 70-80% zitten terwijl ze rond 100% zitten in Figuur 8. Het is ook in tegenspraak met de laboratoriumtesten aan slib uit Dronten zoals in 2015 gemeten [1]. Deze discrepantie vraagt om nader onderzoek.

6.2.8 HET NUT VAN PE

In de reguliere slibontwatering zijn PE en andere flocculatiemiddelen gebruikelijk en bij TDH zijn verhoogde specifieke PE doseringen nodig. TORWASH® claimt geen flocculatiemiddel nodig te hebben. Dit wordt door de proeven aangetoond. Als de juiste TORWASH®-condities gehanteerd worden zakt de productslurry spontaan uit. Het toevoegen van een flocculatiemiddel brengt hierin geen verbetering. Dit uitzakken is bij de pilotinstallatie als een eenvoudige, snelle test beschouwd om te bepalen of de pilotreactor op de gewenste temperatuur was gekomen.

Een verklaring hiervoor is niet wetenschappelijk onderzocht, maar de veronderstelling is dat door TORWASH® het oppervlak van vaste deeltjes veranderd wordt. Geladen functionele groepen verdwijnen. Flocculatiemiddel werkt door de lading te compenseren. Het gevolg is dat de stabiele watermantel om de deeltjes weer mobiel wordt en ze kunnen uitzakken.

PE zal dus geen effect hebben, maar zelf blijven zweven in suspensie. In enkele proeven van TNO is geconstateerd dat slurry na TORWASH® van slib met daarna toegevoegd PE slechter te ontwateren is. Dit geldt zelfs voor slib waarbij voor het indikken PE is toegevoegd. De geladen oppervlaktegroepen verdwijnen en PE komt weer vrij. Het lijkt de hydrothermale behandeling grotendeels te overleven en kan vervolgens bij het ontwateren de filters blokkeren. Flocculatiemiddelen op basis van zouten, zoals Fe-chloride, hebben dit niet. Die zijn eenvoudig als ionen opgelost en blijven opgelost.

7

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De voornaamste conclusie is dat het hoofddoel van het EnCORE project is behaald. Dit was aan te tonen dat het TORWASH®-proces op pilot-schaal werkt in een continue reactor. Er is aangetoond deze technologie in staat geacht mag worden om uit communaal slib zowel biogas als vaste brandstof pellets te maken.

7.1 CONCLUSIES TECHNISCHE VOORUITGANG

De pilot-schaal experimenten hebben aangetoond dat het mogelijk is om met TORWASH® een aanzienlijke vermindering te realiseren van het volume af te voeren communaal slib. Een structuurverandering in het slib die leidt tot sterke toename van de ontwaterbaarheid is het voornaamste effect. Het resulteert in perskoeken van behandeld slib met meer dan 50% vaste stof en een waterstroom met daarin diverse opgeloste organische stoffen en zouten. Dit filtraat kan gebruikt worden om middels anaerobe vergisting in een UASB-type reactor biogas te maken waarbij ca. 75% van de CZV omgezet wordt. Na fosfaat- en stikstofverwijdering o.a. met struviet precipitatie en ANAMMOX kan het nabehandeld worden op de AWZI/RWZI.

Uitgebreide pilot-testen met vergist slib van de AWZI Dronten en niet vergist slib van de AWZI Almere geven vergelijkbare resultaten. Met zuiveringsslib van RWZI Leeuwarden, AWZI Tollebeek (vergist door middel van de Ephyra®-technologie) en RWZI Beemster (voor en na installatie van een fijnzeef) zijn aanvullende experimenten gedaan die aangeven dat de gevonden resultaten ook voor diverse andere typen zuiveringsslib toepasbaar zijn.

Toepassing van het TORWASH®-proces resulteert in een aanzienlijke kostenverlaging voor de afvoer van ontwaterd zuiveringsslib, maar ook in de productie van twee mogelijke biobrandstoffen: biogas en perskoeken. Deze laatste kunnen verwerkt worden tot brandstofpellets. Het biogas is nodig om te voorzien in de energiebehoefte van de TORWASH®-installatie. De massabalansen zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 4 bieden de mogelijkheid om voor twee soorten waterzuivering, met en zonder vergister, in te schatten hoeveel perskoeken en biogas er geproduceerd kan worden bij toepassing van een TORWASH®-installatie.

7.2 CONCLUSIES BUSINESSCASE

Op basis van de berekeningen van de TORWASH®-business case kan worden geconcludeerd dat toepassing van het TORWASH®-concept op niet vergist zuiveringsslib jaarlijks tot een verlaging van de kosten voor de slibeindverwerking met 47% kan leiden. Wanneer het TORWASH®-proces in combinatie met een slibvergister wordt gebruikt voor de ontwatering van het vergiste slib, kunnen deze kosten met 37% dalen. Vanwege de stand van de techniek van deze ontwikkeling zit hier nog wel een zekere bandbreedte om heen.

Binnen de scope van deze studie is geen integrale afweging gemaakt van de duurzaamheid in vergelijking met andere technieken. In vergelijking met andere technieken heeft het TORWASH®-proces een sterke focus op zo ver mogelijke mechanische slibontwatering zonder gebruik van hulpmiddelen als poly-elektrolyet. Bovendien is het doel een brandstof pellet te maken voor bijstook in biomassa-energiecentrales of cementovens. Door de verdergaande ontwatering hoeft uiteindelijk 85-90% minder water verdampt te worden. Bovendien wordt hierdoor een sterke reductie in het slibvolume bereikt waardoor minder transportbewegingen nodig zijn.

7.3 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR OPSCHALING

Met de huidige stand van techniek wordt de potentie van TORWASH® als aantrekkelijke vorm van de voorbehandeling van communaal zuiveringsslib bevestigd. De overgang van batch in een 20-L autoclaaf naar een continue reactor van 25 liter per uur is succesvol gedemonstreerd. Er blijven uiteraard wel verschillen en onzekerheden en zijn niet alle zaken duidelijk. Dit betreffen vooral de business case en bepaalde zaken in de waterbehandeling die nog wel bevestigd moeten worden, zoals de noodzakelijke verdunning voor de Anammox reactor. De overall resultaten zijn echter voldoende en open eindjes kunnen prima in een vervolg uitgezocht worden. Doorontwikkeling in de vorm van een demonstratie-installatie lijkt dan ook een volgende stap. Hieronder een aantal aanbevelingen voor het vervolg.

In het algemeen is de aanbeveling om bij de volgende stap op te schalen naar een demonstratie in een continue reactor met een capaciteit van ca 0,5 m³ per uur. Verder zouden op grond van de resultaten van het onderzoek de volgende zaken uitgezocht moeten worden:

- In de batchreactor is dankzij goed roeren sprake van een uniforme temperatuur, die tijdens de reactieperiode constant blijft. In de pilot bleek warmteoverdracht een lastig punt te zijn, wat voor een vervolg gevolgen zal hebben voor het ontwerp van de reactor.
- In aansluiting op het voorgaande punt is het nodig om de koppeling tussen warmteoverdracht coëfficiënten, het droge-stofgehalte van slib en de viscositeit van de slurry te bepalen. Dit is van bijzonder belang als in de continue reactor geen roerder aanwezig is. Het zal dan ook duidelijk worden in hoeverre de ingaande slibstroom ingedikt moet worden.
- In het afgelaten gas van de reactor zijn naast CO₂ ook zwavelverbindingen aanwezig, waaronder rond 1 vol% H₂S. Dit geeft een verhoogde gevaarstelling. Bij het ontwerp van een grotere TORWASH®-installatie zal hier speciale aandacht aan besteed moeten worden.
- Orthofosfaat kan zoals aangegeven in paragraaf 3.4.3 worden verlaagd tot minder dan 25 mg/l door magnesiumhydroxide te doseren. Dit deel van het onderzoek heeft plaatsgevonden op filtraat van het slib van AWZI Dronten na TORWASH®. Het slib van AWZI Dronten bevat veel chemisch vastgelegd fosfor. Hierdoor zal er na TORWASH® minder opgelost fosfaat beschikbaar zijn. In een vervolg moet erop gelet worden onder welke omstandigheden fosfaatterugwinning gemaximaliseerd kan worden.
- Ammonium na beluchting, zoals weergegeven in Tabel 5 kan verwijderd worden tot minder dan 100 mg/l door toepassing van het ANAMMOX-proces. Door technische storingen bereikte deze reactor geen stabiele toestand, waardoor er geen tijd meer was om de ANAMMOX op te starten. Een extra uitgevoerde test gaf echter geen toxiciteit op korte termijn aan, wat de geschiktheid van het ANAMMOX-proces lijkt te bevestigen. Momenteel bestaan er succesvol draaiende ANAMMOX-installaties op TDH-rejectiewater (o.a. energiefabriek Tilburg) [6]. In de literatuur wordt echter ook verwezen naar mogelijke inhibitie van TDH-rejectiewater [9]. In een vervolgproject moet deze kwestie verder worden onderzocht waarbij ook alternatieven voor ANAMMOX overwogen moeten worden. Door de ho-

gere temperatuur van het effluent uit de TORWASH®-reactor ontstaan wellicht mogelijk kansen voor stripping van het ammoniak.

- In het onderzoek zijn duurtesten van ca. 200 uur gedaan. Voor een vervolg zal het gedrag van nog langere termijn bepaald moeten worden, zoals de stabiliteit van biogasproductie, stikstofverwijdering en fosfaatprecipitatie, maar ook of er sprake is van adapteren van micro-organismen aan de specifieke filtraatsamenstelling, die gekenmerkt wordt door inert CZV.
- Met TORWASH® wordt ongeveer 50% van de vaste stof in het slib in oplossing gebracht. Het rejectiewater van de ontwatering bevat dus een hoge vuilvracht en deze dient effectief in een deelstroombehandeling gezuiverd te worden. Uiteindelijk zal een deel van de vuilvracht op de waterlijn geloosd worden. Andere testen (niet in dit project) gaven aan dat de resterende CZV-belasting en het effect van de remming op de nitrificatie van het effluent geen probleem vormt voor de belasting van de afvalwaterzuiveringsinstallatie en de wettelijk toegestane emissies naar oppervlaktewater. In een vervolgproject zal het nuttig zijn als deze claim kan worden onderbouwd met openbare meetdata.
- In de proeven met de pilot-installatie is wel aankoeien van vaste stof aan de wand door inkoling gevonden, maar geen scaling met anorganische depositen of corrosie. Deze trends zijn het gevolg van het reactorontwerp, maar de risico's op scaling en inkoling moeten nog steeds bij opschaling onderzocht worden.
- De massabalansen in Hoofdstuk 4 moeten in een volgende versie worden aangevuld met energiebalansen. Dit kan echter pas meer dan een ruwe schatting worden als er meer details van het procesontwerp vastgelegd worden en o.a. verbruik van apparatuur betrouwbaar in te schatten is. Het bepalen van deze kentallen moet dan ook meegenomen worden bij de projectopzet voor de demonstratie installatie.
- Cruciaal voor de business case van het TORWASH® concept is een goede afzet van de pellets. Er is al interactie met de markt geweest over de afzet van de pellets en bij de demonstratie installatie is de mogelijke afzet van de pellets een belangrijk demonstratie doel. De huidige slibmarkt laat zien dat continuïteit van de afzet heel belangrijk is en dit kan soms leiden tot hogere afzetkosten. Ook eisen of wensen voor fosfaatwinning uit de as na verbranding kunnen leiden tot hogere afzetkosten dan nu geraamd zijn in de businesscase.
- Binnen de scope van dit onderzoek is de overall milieu-impact van het TORWASH® concept niet vastgesteld. Wel zijn er indicaties dat die positief uit kunnen vallen. In een vervolgtraject wordt aangeraden om dit verder uit te werken en dan ook een vergelijking te maken met alternatieve slibverwerkingstechnieken of andere innovaties op het gebied van slibverwerking. Het huidige rapport reikt daarvoor in ieder geval relevante informatie voor aan.

Tenslotte zal in alle gevallen moeten worden bepaald in hoeverre een TORWASH®-installatie ingepast kan worden in een bestaande waterzuivering. Dit is maatwerk.

REFERENTIES

- [1] Pels, J.R., Meyer, D.F., Kuipers, H., ECN report, TORWASH voor zuiveringsslib, eerste experimenten, ECN-E-15-025, Augustus 2015.
- [2] Pels, J.R., Janssen, A.H.H., Carbo, M.C., Kuipers, H. (2016), Fuel Production from Sewage Sludge using TORWASH for Highly Efficient Dewatering and Salt Removal, Proceedings of the 24th European Biomass Conference & Exhibition, June 6-9, Amsterdam.
- [3] Grootjes, A.J., Pels, J.R., Carbo, M.C., Kuipers, H., Vogelaar, J., Kiel, J.H.A. (2017), TORWASH[®] sewage sludge treatment Increased biogas production, highly-efficient dewatering and phosphate recovery. Proceedings of the 25th European Biomass Conference & Exhibition, June 12-15, Stockholm, Sweden.
- [4] Jonk, J.J., Driessen, W.J.B.M (1996), Optimization of the sludge treatment at the sewage works of Nieuwveer, Proceedings of the EWPCA symposium on sludge treatment and reuse, as part of the 11th IFAT. Munich (Germany), May 7 - 9.
- [5] Fosfaat uit afvalwater van aardappels en huishoudens: Hoogwaardige meststof Vitalphos uit afvalwater van Aviko aardappelfabriek en huishoudelijk afvalwater Olburgen. <https://www.nutrientplatform.org/succesverhalen/waterschap-rijn-en-ijssel/>
- [6] Driessen, W., Van Veldhoven, J.T.A., Janssen, M., Van Loosdrecht, M.C.M. (2019), Treatment of sidestream dewatering liquors from thermally hydrolyzed and anaerobically digested biosolids. Proceedings of the IWA AD16 Anaerobic Digestion Conference, Delft, The Netherlands, 23-27 June. 6p
- [7] STOWA rapport 2012-46, Trends in slibontwatering.
- [8] STOWA rapport 2018-16, Drogen zuiveringsslib in kassen en in een band-droger met laagwaardige restwarmte.
- [9] Zhang, Q., Vlaeminck, S.E., DeBarbadillo, C., Ahmed Al-Omaria, C.S., Wett, B., Pümpel, T., Shaw, A. Chandran, K., Murthy, S. & De Clippeleir, H. (2018) Supernatant organics from anaerobic digestion after thermal hydrolysis cause direct and/or diffusional activity loss for nitrification and anammox. *Water Research*, **143**, 270-281.

BIJLAGE I

ANALYSE VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP LABORATORIUMSCHAAL – SLIB ALMERE

Samenstelling	Eenheid	Almere zuiveringslib (ruw slib)	Zuiveringslib Almere na TORWASH® bij 180°C (geperste koek)	Zuiveringslib Almere na TORWASH® bij 190°C (geperste koek)
Asgehalte (550°C)	wt% db	15,7	22,2	24,5
Asgehalte (815°C)	wt% db	15,9	21,2	22,3
Vluchtige stoffen	wt% db	70,6	n.d.	n.d.
HHV	MJ/kg db	19,7	21,6	21,5
Br	mg/kg db	< 10	n.d.	n.d.
Cl	mg/kg db	1300	n.d.	n.d.
F	mg/kg db	77	n.d.	n.d.
C	wt% db	44,3	46,4	46,9
N	wt% db	7,0	4,9	4,5
H	wt% db	6,2	6,2	6,0
O	wt% db	27,9	21,2	22,1
Al	mg/kg db	8100	16000	17000
As	mg/kg db	5,0	< 3	< 3
B	mg/kg db	23	20	15
Ba	mg/kg db	120	240	260
Ca	mg/kg db	12000	20000	22000
Cd	mg/kg db	0,56	0,78	0,88
Co	mg/kg db	2,2	4,6	4,3
Cr	mg/kg db	15	28	30
Cu	mg/kg db	230	440	470
Fe	mg/kg db	3500	6100	6700
K	mg/kg db	7500	4000	3300
Li	mg/kg db	1,6	2,6	2,7
Mg	mg/kg db	6100	7900	8600
Mn	mg/kg db	94	180	190
Mo	mg/kg db	6,4	12	13
Na	mg/kg db	1700	870	780
Ni	mg/kg db	11	17	18
P	mg/kg db	28000	33000	34000
Pb	mg/kg db	11	20	22
S	mg/kg db	8600	7800	7700
Sb	mg/kg db	< 3	< 8	< 8
Se	mg/kg db	3,9	5,2	4,7
Si	mg/kg db	11000	15000	15000
Sn	mg/kg db	18	33	36

Samenstelling	Eenheid	Almere zuiveringslib (ruw slib)	Zuiveringslib Almere na TORWASH® bij 180°C (geperste koek)	Zuiveringslib Almere na TORWASH® bij 190°C (geperste koek)
Sr	mg/kg db	59	110	120
Ti	mg/kg db	280	230	250
V	mg/kg db	3,4	7,9	8,5
W	mg/kg db	4,6	58	57
Zn	mg/kg db	430	850	920
Hg	mg/kg ar	0,24	0,55	0,49

BIJLAGE II

ANALYSE VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP LABORATORIUMSCHAAL – SLIB LEEUWARDEN

Samenstelling	Eenheid	Zuiveringslib Leeuwarden (ruw slib)	Zuiveringslib Leeuwarden na TORWASH® bij 190°C (geperste koek)	Zuiveringslib Leeuwarden na TORWASH® bij 200°C (geperste koek)
Asgehalte (550°C)	wt% db	41,2	58,9	62,6
Asgehalte (815°C)	wt% db	39,4	55,7	59,0
Vluchtige stoffen	wt% db	51,1	n.d.	n.d.
HHV	MJ/kg db	13,2	10,6	10,5
Br	mg/kg db	77	n.d.	n.d.
Cl	mg/kg db	4300	n.d.	n.d.
F	mg/kg db	160	n.d.	n.d.
C	wt% db	29,6	24,0	23,6
N	wt% db	4,0	2,2	1,9
H	wt% db	4,5	3,3	3,1
O	wt% db	26,9	20,1	19,2
Al	mg/kg db	9200	14000	14000
As	mg/kg db	16	4,9	7,9
B	mg/kg db	37	20	24
Ba	mg/kg db	200	330	330
Ca	mg/kg db	48000	75000	79000
Cd	mg/kg db	1,5	1,0	1,0
Co	mg/kg db	4,9	8,6	10
Cr	mg/kg db	54	76	77
Cu	mg/kg db	300	460	460
Fe	mg/kg db	45000	49000	54000
K	mg/kg db	11000	5100	6000
Li	mg/kg db	5,7	7,5	7,7
Mg	mg/kg db	7800	12000	13000
Mn	mg/kg db	830	1400	1500
Mo	mg/kg db	6,6	6,7	7,8
Na	mg/kg db	7600	2400	2900
Ni	mg/kg db	30	47	44
P	mg/kg db	45000	48000	50000
Pb	mg/kg db	140	210	210
S	mg/kg db	9800	5300	5800
Sb	mg/kg db	< 3	< 8	< 8
Se	mg/kg db	< 1	9,3	10
Si	mg/kg db	38000	55000	57000
Sn	mg/kg db	110	200	180

Samenstelling	Eenheid	Zuiveringslib Leeuwarden (ruw slib)	Zuiveringslib Leeuwarden na TORWASH® bij 190°C (geperste koek)	Zuiveringslib Leeuwarden na TORWASH® bij 200°C (geperste koek)
Sr	mg/kg db	190	290	300
Ti	mg/kg db	430	1900	2000
V	mg/kg db	23	33	33
W	mg/kg db	9,0	66	110
Zn	mg/kg db	880	1300	1300
Hg	mg/kg ar	0,36	0,39	0,42

BIJLAGE III

SUIKERANALYSE VAN EFFLUENTEN VERKREGEN UIT TORWASH®-PROEVEN OP PILOTSCHAAL

Samenstelling	Eenheid	TORWASH® effluent Almere	TORWASH® effluent Dronten
Arabinose	mg/kg	< 10	< 10
Cellobiose	mg/kg	< 20	< 20
Fructose	mg/kg	< 20	< 20
Galactose	mg/kg	< 10	< 10
Glucose	mg/kg	< 10	< 10
Mannose	mg/kg	< 20	< 20
Rhamnose	mg/kg	< 10	< 10
Xylose	mg/kg	< 10	< 10

BIJLAGE IV

ANALYSES VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP PILOTSCHAAL – SLIB ALMERE

Samenstelling	Eenheid	Zuiveringslib Almere (ruw slib)	Zuiveringslib Almere na TORWASH® (geperste koek)
Asgehalte (550°C)	wt% db	14,3	21,4
Asgehalte (815°C)	wt% db	14,2	20,3
Vluchtige stoffen	wt% db	71,3	65,5
Vochtgehalte	wt% ar	3,8	1,4
HHV	MJ/kg db	20,6	21,4
Br	mg/kg db	21	11
Cl	mg/kg db	706	278
F	mg/kg db	73	< 10
C	wt% db	46,0	47,4
N	wt% db	7,3	3,5
H	wt% db	6,4	6,3
O	wt% db	29,9	25,0
Al	mg/kg ar	4674	13421
As	mg/kg ar	2,8	2,8
B	mg/kg ar	30,9	12,6
Ba	mg/kg ar	93	205
Ca	mg/kg ar	9271	22937
Cd	mg/kg ar	0,4	0,9
Co	mg/kg ar	3	3
Cr	mg/kg ar	11,6	36,4
Cu	mg/kg ar	209	366
Fe	mg/kg ar	2976	6136
K	mg/kg ar	8410	2482
Li	mg/kg ar	1,2	2,7
Mg	mg/kg ar	6156	7451
Mn	mg/kg ar	86	170
Mo	mg/kg ar	5,5	11,7
Na	mg/kg ar	893	661
Ni	mg/kg ar	9	22
P	mg/kg ar	29068	30158
Pb	mg/kg ar	13,1	33,2
S	mg/kg ar	8297	6674
Sb	mg/kg ar	< 3	< 3
Se	mg/kg ar	2,4	3,1
Si	mg/kg ar	9973	19617
Sn	mg/kg ar	15	34

Samenstelling	Eenheid	Zuiveringslib Almere (ruw slib)	Zuiveringslib Almere na TORWASH® (geperste koek)
Sr	mg/kg ar	44	108
Ti	mg/kg ar	451	1605
V	mg/kg ar	2,9	7,2
W	mg/kg ar	9,5	18,5
Zn	mg/kg ar	427	828
Hg	mg/kg ar	0,15	0,16

BIJLAGE V

ANALYSES VAN ZUIVERINGSSLIB VOOR EN NA TORWASH® OP PILOTSCHAAL – SLIB DRONTEN

Samenstelling	Eenheid	Zuiveringslib Dronten (ruw slib)	Zuiveringslib Dronten na TORWASH® (geperste koek)
Asgehalte (550°C)	wt% db	38,9	48,6
Asgehalte (815°C)	wt% db	35,7	46,6
Vluchtige stoffen	wt% db	51,4	42,2
HHV	MJ/kg db	n.d.	13,9
Br	mg/kg db	n.d.	53
Cl	mg/kg db	n.d.	7800
F	mg/kg db	n.d.	66
C	wt% db	28,9	30,5
N	wt% db	4,9	2,5
H	wt% db	4,7	4,4
O	wt% db	26,7	21,5
Al	mg/kg db	24000	36000
As	mg/kg db	8,3	6,6
B	mg/kg db	37	14
Ba	mg/kg db	280	450
Ca	mg/kg db	34000	54000
Cd	mg/kg db	0,53	1,2
Co	mg/kg db	4,4	8,0
Cr	mg/kg db	34	50
Cu	mg/kg db	280	500
Fe	mg/kg db	35000	52000
K	mg/kg db	14000	4200
Li	mg/kg db	4,6	6,2
Mg	mg/kg db	11000	9000
Mn	mg/kg db	700	1000
Mo	mg/kg db	21	31
Na	mg/kg db	4800	1200
Ni	mg/kg db	25	31
P	mg/kg db	46000	61000
Pb	mg/kg db	28	46
S	mg/kg db	12000	13000
Sb	mg/kg db	< 4	< 4
Se	mg/kg db	6,4	8,7
Si	mg/kg db	31000	33000
Sn	mg/kg db	20	36
Sr	mg/kg db	160	250

Samenstelling	Eenheid	Zuiveringslib Dronten (ruw slib)	Zuiveringslib Dronten na TORWASH® (geperste koek)
Ti	mg/kg db	660	1300
V	mg/kg db	14	23
W	mg/kg db	13	57
Zn	mg/kg db	1400	2300
Hg	mg/kg ar	0,41	0,46

BIJLAGE VI

RESULTATEN TORWASH® OP LAB-SCHAAL

TABEL VI 1 OVERZICHT VAN DE RESULTATEN VAN DE TORWASH®-BEHANDELING OP LAB-SCHAAL IN DE 20 L AUTOCLAAF VAN NIET VERGIST ZUIVERINGSSLIB (AWZI ALMERE)

	Behandeling bij 180°C	Behandeling bij 190°C
Massa-opbrengst (droge basis)	54%	51%
Droge-stofgehalte in filterkoek (vacuumfiltratie)	29%	30%
Droge-stofgehalte in perskoek (Carver Die)	44%	66%

TABEL VI 2 OVERZICHT VAN DE RESULTATEN VAN DE TORWASH®-BEHANDELING OP LAB-SCHAAL IN DE 20 L AUTOCLAAF VAN VERGIST ZUIVERINGSSLIB (RWZI LEEUWARDEN)

	Behandeling bij 190°C	Behandeling bij 200°C
Massa-opbrengst (droge basis)	66%	64%
Droge-stofgehalte in filterkoek (vacuumfiltratie)	21%	25%
Droge-stofgehalte in perskoek (Carver Die)	50%	59%

TABEL VI 3 GC-MS ANALYSES VAN HET EFFLUENT NA TORWASH®-BEHANDELING VAN ONVERGIST (ALMERE) ZUIVERINGSSLIB

Analyseerde component	Eenheid	180°C	190°C
Azijnzuur	mg/kg	1100	1100
Mierenzuur	mg/kg	< 200	250
Fenol	mg/kg	<50	<50
m-Cresol	mg/kg	< 50	< 50
o-Cresol	mg/kg	< 50	< 50
p-Cresol	mg/kg	< 50	< 50
Pyrocatechol (Catechol)	mg/kg	< 100	< 100
2-Furaldehyde (Furfural)	mg/kg	< 50	< 50
2-Methoxyfenol (Guaiacol)	mg/kg	< 50	< 50
5-(Hydroxymethyl)-2-furaldehyde (5-HMF)	mg/kg	< 50	< 50
Naftaleen	mg/kg	< 50	< 50
Fenantreen	mg/kg	< 50	< 50
Pyrene	mg/kg	< 50	< 50
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/kg	380	500
Nitrat (NO ₃ ⁻)	mg/kg	5,0	6,7

TABEL VI 4 ANALYSE EN TESTRESULTATEN VAN HET TORWASH®-FILTRAAT OP (ALMERE) ZUIVERINGSSLIB BIJ VERSCHILLENDE TORWASH®-TEMPERATUREN

geanalyseerde component	Eenheid	180°C	190°C
pH		4,9	4,9
CVZ ruw verwerkt slib	mg/l	49684	50575
CZV gefilterd	mg/l	48821	50181
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/l	1182	1286
Orthofosfaat (PO ₄ -P)	mg/l	1080	1094

Biologische behandelbaarheid	Eenheid	180°C	190°C
Anaërobe biologische afbreekbaarheid (oplosbare CZV)*	%	73	67
Anammox activiteit	gN/gVS.d	0,1	0,25

*biologische afbreekbaarheid op basis van oplosbare CVZ-verwijdering.

TABEL VI 5 ANALYSE EN TESTRESULTATEN VAN TORWASH®-LOZINGSWATER OP ANAEROOB VERGIST (LEEWARDEN) ZUIVERINGSSLIB BIJ VERSCHILLENDE TORWASH®-TEMPERATUREN

Analyseerde component	Eenheid	190 °C	200 °C
pH		7,8	7,8
CVZ ruw verwerkt slib	mg/l	17294	16611
CVZ gefilterd	mg/l	17168	16790
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/l	2012	2023
Orthofosfaat (PO ₄ -P)	mg/l	202	202
Biologische behandelbaarheid	Eenheid	190 °C	200 °C
Anaërobe biologische afbreekbaarheid (oplosbare CVZ)	%	66	62
Anammox activiteit	gN/gVS.d	0,27	0,25