

**Rapportage in opdracht van
Waterschap Aa en Maas**

Voorstudie superkritieke vergassing van RWZI slib

Openbare versie

Ir. J. Koppejan (Procédé Biomass BV)
Ir. N.A.M. ten Asbroek (Procédé Biomass BV)
Dr. J.A. Zeevalkink, AYA Consultancy

Enschede, Mei 2011



Colofon

Deze rapportage is uitgevoerd in opdracht van

Waterschap Aa en Maas
Afdeling Advies Zuiveren
Dr. Ir. M.J. Kampschreur
Postbus 5049
5201 GA 's-Hertogenbosch

Auteurs:

Ir. J. Koppejan
Ir. N.A.M. ten Asbroek
Procede Biomass BV
Postbus 328
7500 AH Enschede

Dr. Ir. J. A. Zeevalkink
AYA Consultancy
Hogenendseweg 36
6942 DV Didam

Projectnummer PB201002

Mei 2011

All rights reserved. No part of this report may be reproduced and/or published in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without the previous written permission from Procede.

All information which is classified according to Dutch regulations shall be treated by the recipient in the same way as classified information of corresponding value in his own country. No part of this information will be disclosed to any third party.

Procede Biomass BV
Vlierstraat 111
P.O. Box 323
7500 AH Enschede
The Netherlands

www.procede.nl
T +31 53 711 25 00
F +31 53 711 25 99



Samenvatting

Dit rapport geeft de resultaten weer van een voorstudie naar de technische en financiële haalbaarheid van superkritieke vergassing van zuiveringsslib, toegepast op de schaalgrootte van een typische waterzuivering van 100.000 VE. Tevens wordt een ontwikkelingsplan gepresenteerd dat de ontwikkeling van de technologie beschrijft leidend tot een demonstratie –installatie geschikt voor een rioolwaterzuivering van 100.000 VE.

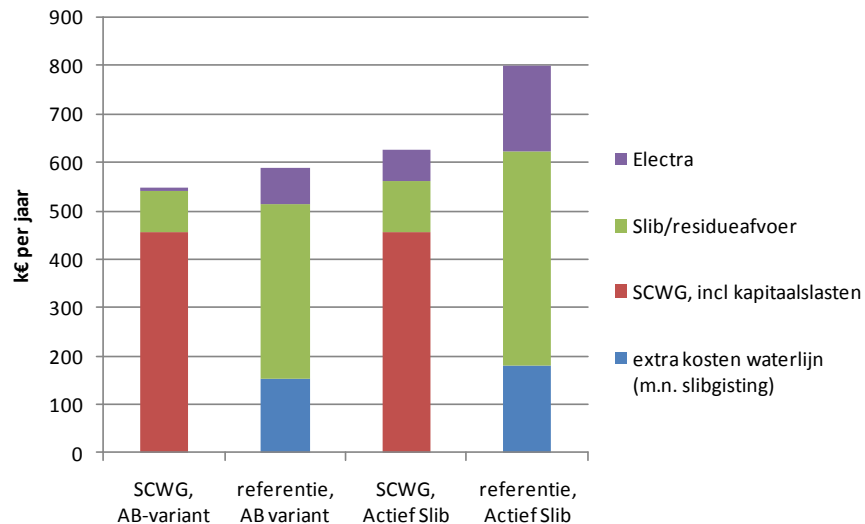
Het werkingsprincipe van superkritieke vergassing van natte organische materialen is bekend; de techniek is echter nog niet eerder commercieel toegepast. In tegenstelling tot bij anaerobe vergisting is de techniek in staat om de organische fractie in natte biomassa vrijwel volledig om te zetten naar een brandbaar gas, dat na enige reiniging kan worden omgezet naar elektriciteit. Ook na aftrek van de eigen energiebehoefte wordt daardoor meer elektriciteit gemaakt dan bij anaerobe vergisting. Het proces biedt mogelijkheden om zouten geconcentreerd af te voeren en mogelijk fosfaat en ammonium terug te winnen. Hierbij kan jaarlijks significant worden bespaard op de kosten voor droging en afzet van slib.

In dit project is gesproken met verschillende onderzoeksinstellingen die hebben gewerkt aan de ontwikkeling van de technologie. Geconcludeerd wordt dat er, afgezien van enkele specifieke vragen, een voldoende hoog kennisniveau bestaat over de relevante deelgebieden van het proces van superkritieke vergassing zelf, het gedrag van verschillende zouten onder superkritieke condities en het opwaarderen van de geproduceerde gassen en waterige zoutstromen om de volgende stap te zetten naar demonstratie op praktijkschaal van een gemiddelde RWZI (100.000 VE).

Op basis van kennis en ervaring met ontwikkeling van soortgelijke nieuwe chemische processen heeft Procede een basisontwerp gemaakt van de reactor en het totale proces. Aan de hand van budgetoffertes van mogelijke toeleveranciers wordt geschat dat de investeringskosten van het proces bij uiteindelijke commerciële toepassing in de praktijk bij een zuivering van 100.000 VE bijna 3 miljoen Euro ex BTW zullen bedragen. De installatie wekt ca. 300 kW aan elektriciteit op.

Haskoning heeft met het 'Slibketenstudie 2' model verkend wat de invloed is van inpassing van het proces van superkritieke vergassing op het complete zuiveringsproces bij verschillende varianten voor een zuivering van 100.000 VE. Door het weglaten van een vergistingsinstallatie wordt ca. 1,4-1,5 miljoen Euro bespaard aan investeringskosten, zodat de extra investering ten opzichte van de conventionele variant ca 1,5 miljoen Euro bedraagt. Deze extra investering ten gevolge van de superkritieke installatie kan in 3,5-6,8 jaar worden terugverdiend door een besparing op de afvoerkosten van slib (ca 273-334 k€/jaar) en er meer elektriciteitsproductie (effect ca. 74-113 k€/jaar). De jaarlijkse kosten (kapitaals-,

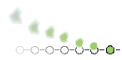
onderhouds-, energie-, personeelslasten) dalen met ca 43-173 k€ per jaar (0,4-1,7 Euro/VE). Dit komt overeen met een daling van de kosten van slibverwerking van 7-22% voor de actief slib resp de AB varianten, zoals ook weergegeven is in figuur S.1. Deze getallen zijn overigens in lijn met de eigen beoordeling door Haskoning van de financiële aspecten van slibvergassing, zoals gedocumenteerd in de Slibketenstudie II rapportage.



Figuur S.1 Jaarlijkse kosten van slibverwerking bij een zuivering van 100.000 ve welke is uitgerust met superkritieke vergassing, in vergelijking tot een conventioneel uitgevoerde zuivering volgens AB variant en Actief slib variant.

Het ontwikkelingsplan start met een pre-concurrentieel onderzoek en mondt uit in de realisatie van een demonstratie-installatie voor een RWZI van 100.000 VE. In het pre concurrentiële onderzoek worden de definitieve ontwerpparameters vastgesteld en wordt een ontwerpstudie naar de hoofdonderdelen en een voorontwerp van de volledige demonstratieplant gemaakt. Daarna kan de installatie worden aanbesteed. Verwacht wordt dat op deze wijze de demonstratieplant over 4 jaar operationeel zal zijn.

Het voorgestelde pre concurrentiële onderzoek richt zich behalve op het vaststellen van de technologische ontwerpparameters, met name op de het gedrag van Kjeldahl-stikstof en fosfaten in het proces en de mogelijkheid deze terug te winnen. De Kjeldahl-stikstof kan mogelijk ook (deels) worden vernietigd naar stikstof. Het onderzoek kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd in de bestaande, operationele VERENA pilot plant op een schaal van 100 l/h bij het KIT in Karlsruhe. Deze schaal is een tiende van de te realiseren demonstratie-plant. Te overwegen valt enig onderzoek te doen in kleinschaliger opstellingen zoals die bij de Universiteit Twente, TNO of het KIT.



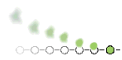
De totale kosten van een ontwikkeltraject, gericht op de bouw van de eerste installatie op praktijkschaal worden geraamd op ruim 5 miljoen Euro.

Procede heeft ervaring met de ontwikkeling, bouw en commercialisering van vergelijkbare nieuwe chemische processen en is bereid om in samenwerking met het waterschap Aa en Maas een volledig consortium met onderzoeksinstituten en uitvoerende partijen samen te stellen dat het ontwikkelingsplan wil gaan uitwerken en uitvoeren. Daarbij is van belang dat de bestaande kennisdragers zoveel mogelijk in het consortium worden geïntegreerd.



Inhoudsopgave

COLOFON	II
SAMENVATTING	III
1 INLEIDING EN ACHTERGROND	8
2 VRAAGSTELLING EN AANPAK	10
3 WERKINGSPRINCIPE	11
3.1 ALGEMEEN	11
3.2 INZICHTEN UIT DE ENERGIEFABRIEK.....	13
3.3 FINANCIËEL PERSPECTIEF	14
4 GEDRAG VAN ZOUTEN EN ANDERE COMPONENTEN	15
4.1 HUIDIGE KENNISNIVEAU	16
4.2 FOSFAAT.....	18
4.3 AMMONIAK	18
4.4 ZWAVEL.....	19
4.5 ZWARE METALEN.....	19
5 REACTOR- EN PROCESONTWERP	21
5.1 INLEIDING	21
5.2 REACTORONTWERPEN.....	21
5.3 BEHANDELING VAN HET VRIJKOMENDE WATER	22
5.4 INZET VAN PRODUCTGAS	22
6 ENERGETISCHE ASPECTEN	24
6.1 AANNAMES OVER HET SLIB VAN DE WATERLIJN	24
6.2 ENERGIEBALANS	26
6.3 TOEKOMST: BRANDSTOFCEL	31
7 INVLOED SUPERKRITIEKE VERGASSING OP DE VERWERKINGSCAPACITEIT VAN DE RWZI	32
7.1 MOGELIJKE INVLOED OP CZV- EN N-BELASTING	32
7.2 MOGELIJKE INVLOED OP ZWARE METALEN EN MINERALEN BELASTING	33
7.3 BELANGRIJK VOOR VERDER ONDERZOEK	34
8 BUSINESS CASE	36
8.1 INVESTERINGSOMVANG.....	36
8.2 FINANCIËLE HAALBAARHEID	37
8.3 CONCLUSIE BUSINESS CASE	40
8.4 VERGELIJKING MET SLIBKETENSTUDIE II	41



9	ONTWIKKELINGSTRAJECT	43
9.1	ONDERZOEKSPARTIJEN MET ERVARING OP SCWG	43
9.2	ONTWIKKELINGSTRAJECT	44
10	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	46
11	REFERENTIES	48
12	VERANTWOORDING	49
BIJLAGE A.	RESULTATEN HASKONING	50



1 Inleiding en achtergrond

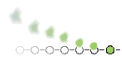
In de periode 2008-2009 hebben vier waterschappen onder coördinatie van het Waterschap Aa en Maas het idee van de Energiefabriek uitgewerkt. De gedachte hierbij is dat bij toepassing van efficiënte omzettingsprocessen, de chemische energie-inhoud van het influent in principe voldoende zou moeten zijn om een waterzuivering tenminste energieneutraal te bedrijven. In het project zijn drie varianten uitgewerkt op een basisvariant voor 100.000 v.e. Als onderdeel van de meest ambitieuze variant is de optie van superkritieke vergassing van slib opgenomen.

Volgens het eindrapport van 'De Energiefabriek' kan superkritieke vergassing op middellange termijn tot een substantiële reductie van de verwerkingskosten van zuiveringsslib leiden en daarbij nog een positief energie-effect hebben. Deze conclusie is gebaseerd op onderzoek op pilot plant schaal en indicatieve informatie over kosten van vergelijkbare processen.

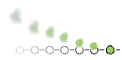
Bij superkritieke vergassing wordt een natte slurry met ca 85% watergehalte in een reactor gebracht bij 300 bar en 450 – 700 °C. In korte tijd wordt de organische stof omgezet in een energierijk gas. Bij een goed reactorontwerp slaan zouten neer in een geconcentreerde slurry. Drogen van het slib is niet meer nodig.

Het proces is in ontwikkeling en is thans beschikbaar op pilot plant schaal. In Nederland staan, bij TNO en BTG/Un. Twente, installaties met een capaciteit van 5 – 10 l/hr voeding gebaseerd op homogene vloeibare voeding zoals oplosbare organische componenten en dus geen slib. Verder zijn er in Nederland plannen voor ca. 100 l/h testopstellingen bij de firma GENSOS en SPARQLE die wel als intentie hebben om ook heterogene biomassa stromen te behandelen. Procede heeft in het verleden in samenwerking met o.a. Univ.Twente batch en mini-pilot onderzoek gedaan met mest. Daarnaast is (o.a. in samenwerking met Wetsus) fundamenteel onderzoek en modelvorming uitgevoerd naar het gedrag van zouten in superkritisch water, en superkritisch ontzouten. De thans grootst beschikbare pilot plant staat thans bij Forschungszentrum Karlsruhe en heeft een capaciteit van 100-200 l/hr. Deze pilot heeft reeds gedraaid met heterogene biomassa mengsels. Voor demonstratie op een typische zuivering van 100.000 ve is vervolgens nog een opschaling met een factor 10 nodig om tot de grootte voor een actuele RWZI te komen. Om tot een breed inzetbare, bewezen technologie te komen moet daarom nog een ontwikkelingstraject worden doorlopen.

Het noodzakelijke ontwikkelingstraject om te komen tot een demonstratie-installatie op praktijkschaal zal naar verwachting meerdere miljoenen kosten. Daarom is het van belang om meer zekerheid te krijgen over de uiteindelijke technische



functionaliteit, aandachtspunten bij de ontwikkeling, de investerings- en operationele kosten alsmede (de kosten van) het ontwikkelingstraject dat eerst nog moet worden doorlopen. Het doel van deze studie is die informatie te verzamelen en te presenteren.



2 Vraagstelling en aanpak

Dit rapport geeft de resultaten weer van een voorstudie die is uitgevoerd om meer zekerheid te krijgen rondom de technische haalbaarheid, de uiteindelijke business case en het gewenste ontwikkeltraject voor toepassing van superkritieke slibvergassing op het schaalniveau van een typische RWZI (100.000 VE).

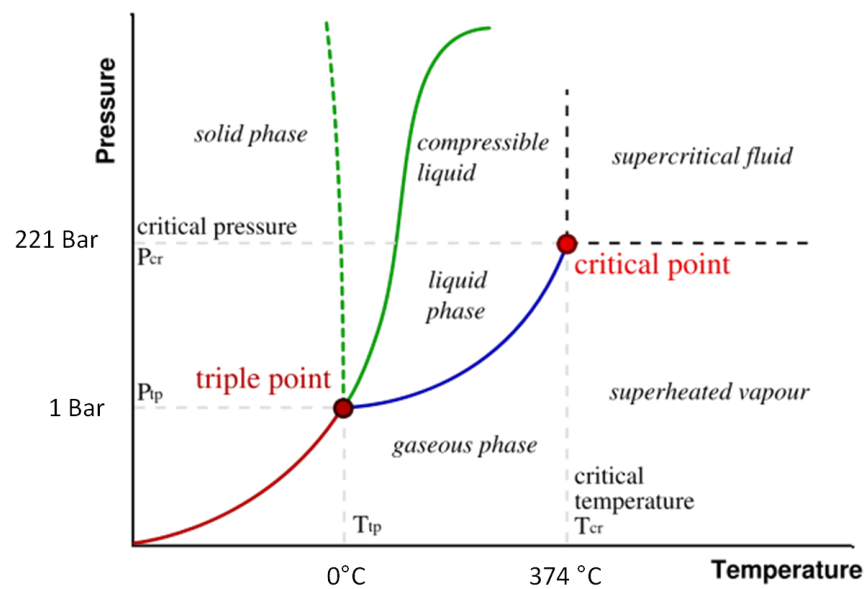
In het onderzoek is eerst beschouwd hoe het proces technologisch kan worden uitgevoerd en welke zekerheden en onzekerheden hierbij dienen te worden opgelost. De resultaten zijn uitgewerkt in een business case beschrijving die het mogelijk maakt tot een verantwoorde besluitvorming te komen over het al dan niet doorzetten van deze ontwikkeling. Dit is in deel B van dit rapport weergegeven (pag 15-40).

In hoofdstuk 9 zijn de stappen in het ontwikkeltraject geschetst, welke noodzakelijk zijn om te komen tot realisatie van een demonstratie-installatie op praktijkschaal. Daarbij zijn kansen en risico's van het ontwikkeltraject in kaart gebracht en potentieel belangrijke partners in de ontwikkeling geïdentificeerd.

3 Werkingsprincipe

3.1 Algemeen

Superkritieke watervergassing of Super Critical Water Gasification (SCWG) is een proces waarbij in superkritiek water (temp > 374 °C, druk > 221 Bar, zie Figuur 3.1) organisch materiaal wordt gekraakt tot een brandbaar gas bestaand uit typisch ca. 50% H₂, 35% CO₂ en 15% CH₄. De gassamenstelling en gasopbrengst zijn afhankelijk van de voeding en de reactiecondities (temp, druk en verblijftijd).

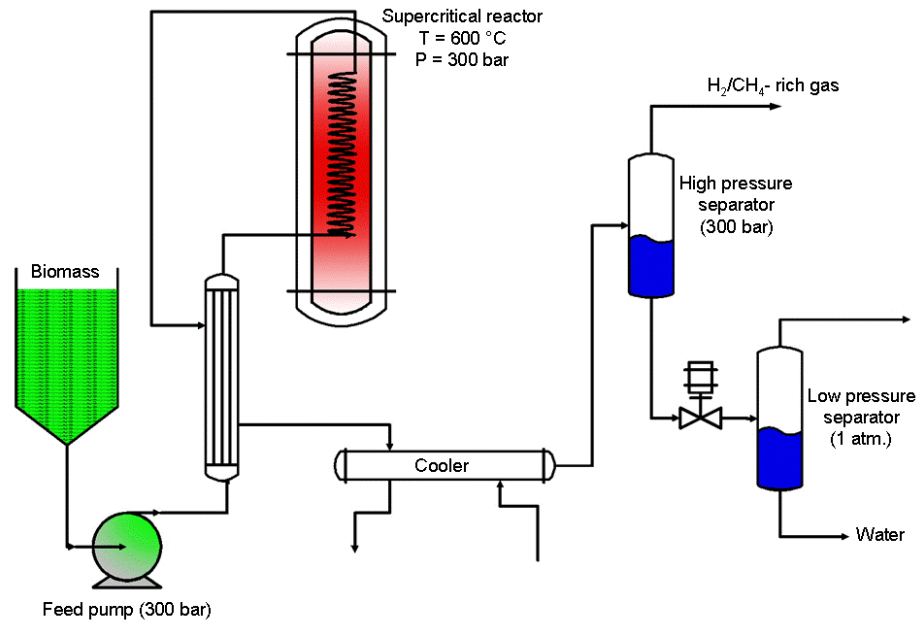


Figuur 3.1 Bedrijfscondities van superkritieke vergassing van slib.

Het processchema van superkritiek water vergassen is weergegeven in Figuur 3.2.

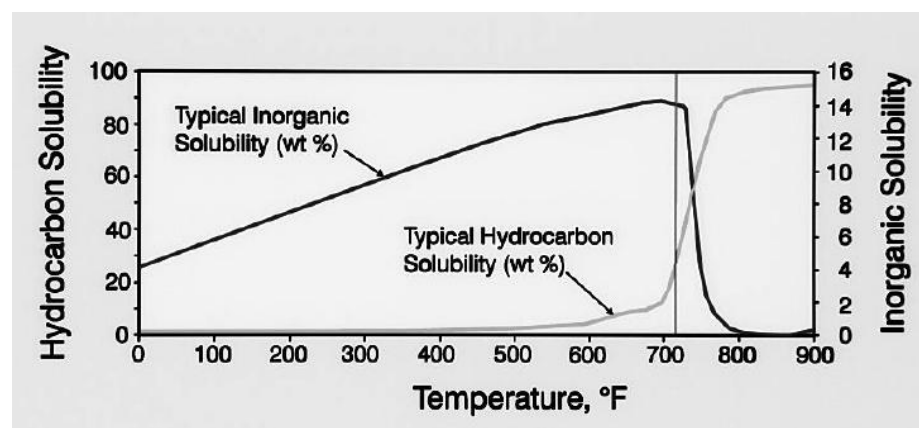
1. Natte biomassa (ds-gehalte typisch 5-20%) wordt eerst op druk gebracht (ca 300 Bar).
2. De slurry wordt vervolgens opgewarmd tot ca 600-650 °C, gebruik makend van vrijkomende restwarmte bij het afkoelen van uitgereageerd materiaal.
3. De slurry wordt enkele minuten op 600-650°C/300 Bar gehouden om volledige omzetting te krijgen naar syngas. Extra warmte wordt toegevoerd om te compenseren voor niet-ideale warmteoverdracht bij uitwisseling van opwarmende en afkoelende media. Dit wordt meestal gedaan door een klein deel van het geproduceerde gas te verbranden, of door toevoer van elektriciteit.
4. Na de reactie wordt de stroom afgekoeld door afgifte van warmte aan het inkomende materiaal.
5. De oplosbaarheid van syngas in water onder hoge druk is slecht, terwijl CO₂ relatief goed oplost. Daardoor kan syngas eerst worden afgescheiden.
6. Na aflaten van de druk uit het resterende water komt ook CO₂ vrij. Het resterende water bevat de anorganische componenten en mogelijk nog

sporen/restanten van een aantal niet afgebroken organisch materiaal. Door wijziging van de opstelling kan een deel van de anorganische componenten relatief geconcentreerd worden afgevoerd, zie hoofdstuk 5.



Figuur 3.2 Generiek werkingsprincipe voor superkritieke vergassing.

Verder is het belangrijk is dat onder superkritieke condities de oplosbaarheid van zouten sterk afneemt terwijl de oplosbaarheid van organische componenten juist sterk toeneemt. Het is daarom mogelijk een reactor te ontwerpen waarbij zouten doelbewust worden neergeslagen en geconcentreerd worden afgevoerd als een zoutslurry, terwijl relatief schoon zoutvrij water overblijft , zie Figuur 3.3.



Figuur 3.3 De oplosbaarheid van anorganische zouten en organische componenten keert om onder superkritieke condities. Figuur bij 221 Bar, tussen afzonderlijke anorganische en organische componenten kunnen grote verschillen optreden in de oplosbaarheid.



3.2 Inzichten uit De Energiefabriek

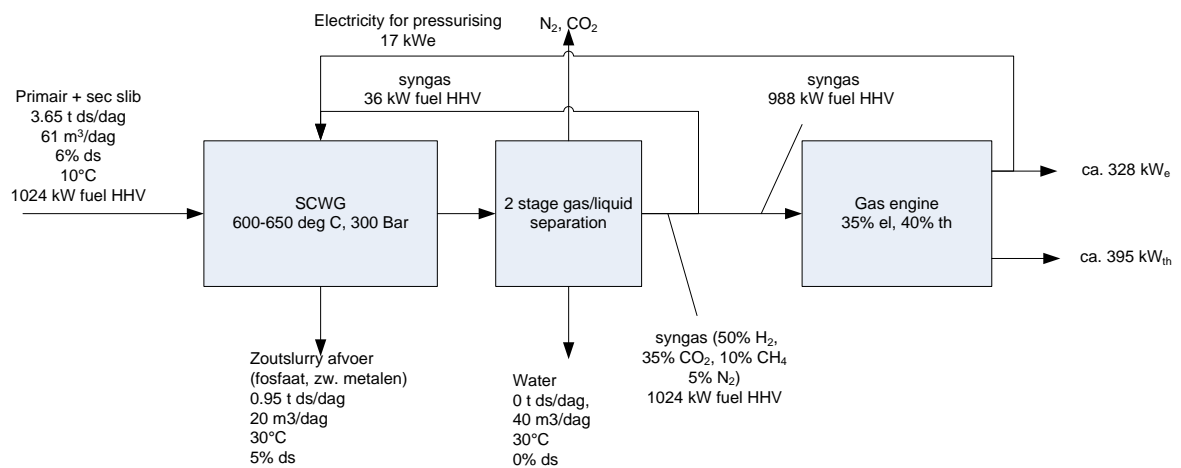
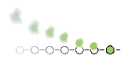
In het project De Energiefabriek zijn massa- en energiebalansen in beeld gebracht voor verschillende uitvoeringsvarianten voor een standaard zuivering een verwerkingscapaciteit van 100.000 i.e. Daarbij is tevens globaal inzichtelijk gemaakt wat dit betekent voor het ontwerp van een SCWG installatie. Deze paragraaf laat de inzichten zien welke zijn opgedaan in die studie, alvorens het proces in meer detail te beschrijven in hoofdstuk 5-8.

In de studie van De Energiefabriek werd aangenomen dat ontwaterd slib met een droge stof gehalte van 6% als voeding dient voor de SCWG installatie. De volgende kentallen gelden dan voor het ontwaterde slib bij uitvoering volgens het A-B ontwerp:

		prim slib	sec slib	Totaal	na ontwatering
ds gehalte		1%	1%	1%	6%
debiet	m ³ /d	286	99	385	61
CZV	kg/d	5.321	578	5.899	5.899
HHV	kW	924	100	1.024	1.024
ZS input	kg/d	2.858	795	3.653	3.653
ODS input	kg/d	2.287	413	2.700	2.700

De warmtebehoefte van de SCWG reactor hangt af van de mate waarin vrijkomende warmte bij het afkoelen van het product kan worden gebruikt bij het opwarmen van de voeding. In die studie was aangenomen is dat de uitgaande stroom 20 ° warmer is dan de ingaande stroom, dit komt overeen met 36 kW_{th} aan warmtebehoefte. Indien het geproduceerde syngas wordt gebruikt in een gasmotor, is de vrijkomende restwarmte van de gasmotor onvoldoende heet om de SCWG reactor te verwarmen, derhalve wordt er dan vanuit gegaan dat een deel van het geproduceerde gas hiervoor wordt gebruikt.

Volgens de berekeningen uit de Energiefabriek is er 17 kW_e nodig om de vloeibare voeding op 300 Bar te brengen, zodat er netto ca 328 kW_e/395 kW_{th} uit het proces komt. Na aftrek van het eigen gebruik van de zuivering (158 kW_e) blijft er 185 kW_e over welke aan het openbare net kan worden geleverd.



Figuur 3.4 Massa- en energiebalansen bij superkritieke vergassing van zuiverings-slib bij een 100.000 ve zuivering met A-B ontwerp

Tijdens uitvoering van het project De Energiefabriek bleek uit communicatie met Thermphos dat de zoutslurry dient te worden gedroogd van ca. 10% ds naar 100% ds om kostenneutrale afzet mogelijk te maken. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een efficiënte indampstechniek als Multi Stage Flash Distillation (MSFD) of Vacuum Compression Distillation (VCD) is hiervoor ca 50-150 kW_{th} nodig, afhankelijk van de wijze waarop deze is uitgevoerd.

Eventueel kan voorafgaand aan indamping fosfaat als struviet worden neergeslagen en verwijderd zodat het als meststof kan worden toegepast.

In het onderzoek van de Energiefabriek werd ervan uitgegaan dat Kjeldahl-stikstof volledig naar stikstof wordt omgezet. Zoals in 4.3 wordt toegelicht is het echter meer waarschijnlijk dat toch een deel na het proces als ammonium beschikbaar komt. Dit kan worden teruggewonnen en als meststof toegepast.

3.3 Financiële perspectief

In de studie van De Energiefabriek werden de investeringskosten van de SCWG installatie, compleet geïnstalleerd inclusief gasscheiding bij seriematige toepassing begroot op ca. 2 miljoen Euro, exclusief gasmotor. De vermeden afzetkosten voor slib (Thermphos heeft destijds aangegeven dat de gedroogde zoutfractie tegen nultarief zou kunnen worden ingenomen) bedragen ca 400 k€ per jaar. Daarnaast zou significant kunnen worden bespaard op de kosten van verdere ontwatering van slib tot ca 23% ds door mechanische ontwatering.

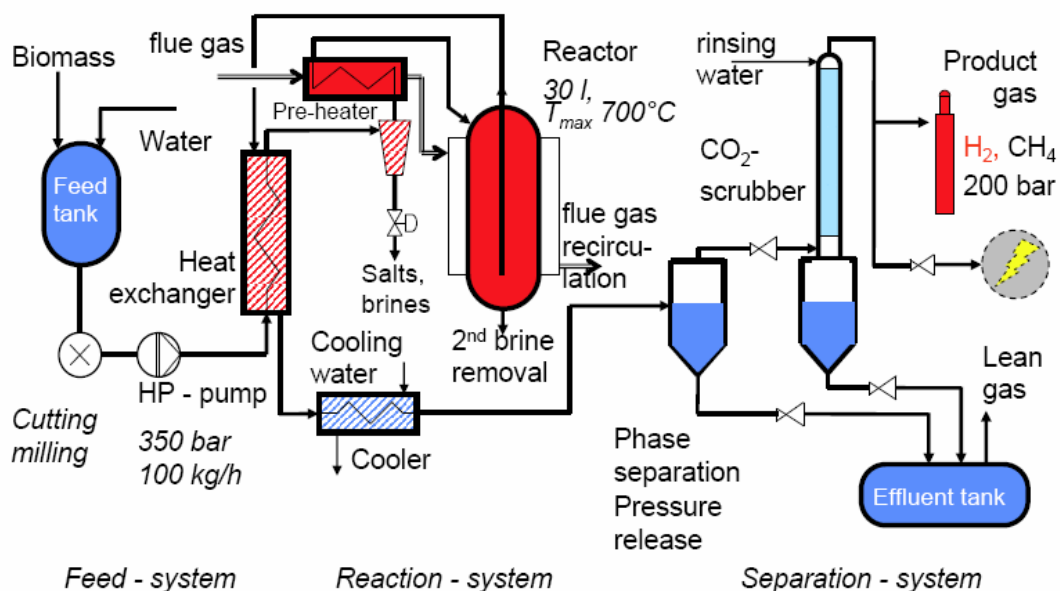
Ondanks de verwachte hogere kosten voor operators en onderhoud werd dan ook geconcludeerd dat het de moeite waard is om de haalbaarheid/toepasbaarheid en het ontwikkeltraject voor SCWG nader te onderzoeken. Dit rapport gaat verder in op de ontwerpdetails en het ontwikkeltraject voor een dergelijke slibverwerkingsinstallatie.

4 Gedrag van zouten en andere componenten

Onder superkritieke condities keert de oplosbaarheid van zouten en organische stof om: organische stof wordt oplosbaar en zouten slaan neer. Dit kan een groot probleem vormen bij het bedienen van een reactoropstelling. De ervaring met superkritieke vergassing bij de proefinstallaties met relatief kleine reactorvolumes is beperkt vanwege de hogere kans tot verstopping bij kleine reactorvolumes tot relatief schone substraten.

Bij grotere reactorvolumes vormt de snelheid van de aangroei van afzettingen aan reactorwanden een minder urgent probleem. Ook is er inmiddels enig inzicht ontwikkeld om de neerslag van zouten gecontroleerd te laten plaatsvinden zodat deze geconcentreerd kunnen worden afgevoerd zonder problematische neerslag in de reactor.

De installatie van Karlsruhe Institute of Technology (KIT) bevat twee voorzieningen om met zouten om te gaan, (1) kort voordat het medium de superkritieke condities bereikt en (2) kort na de reactie, door de zouten in geconcentreerde vorm onderin de reactor als brine af te vangen, zie Figuur 4.1. Dit onderdeel is gepatenteerd en getest met corn silage (ingekuilde maïs) als voeding.

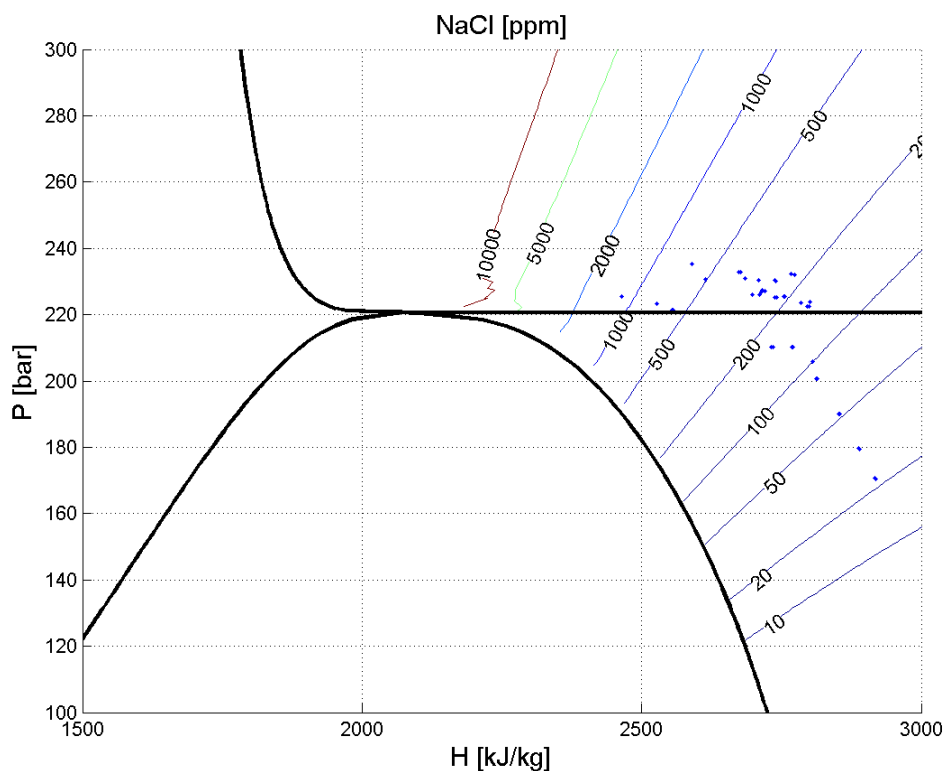


Figuur 4.1 Ontwerp van de VERENA SCWG installatie bij KIT

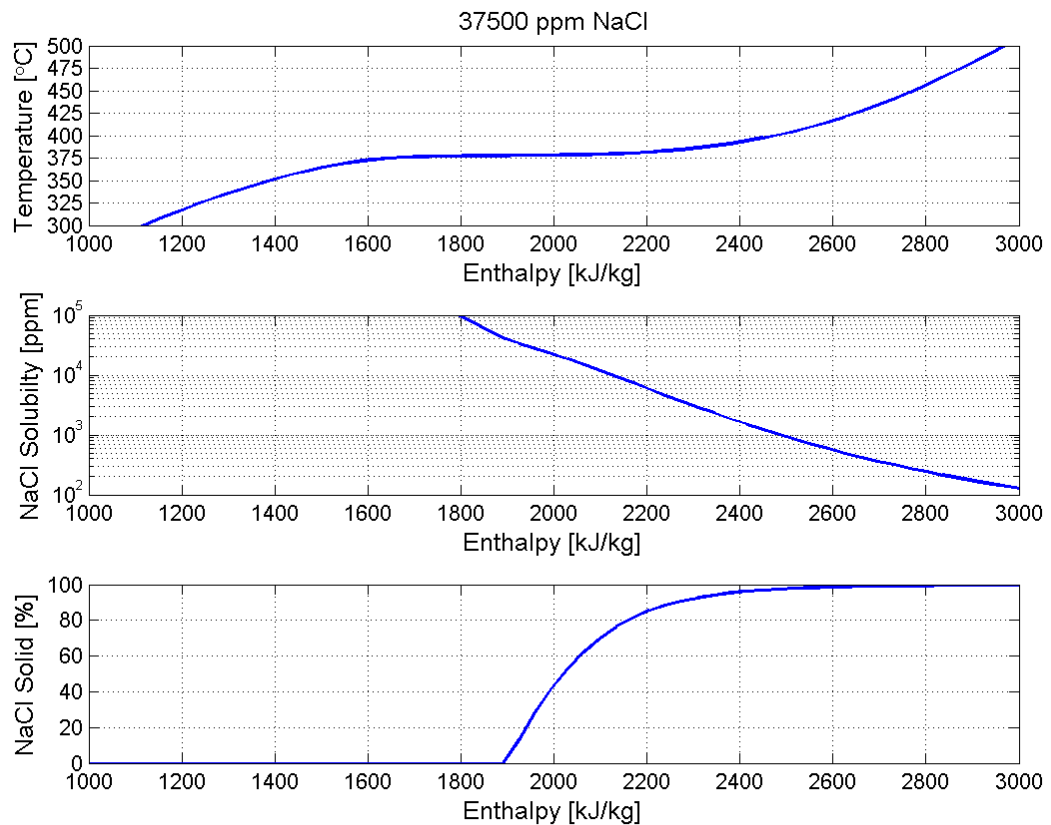
4.1 Huidige kennisniveau

De afgelopen 20 jaar is de kennis over het gedrag van waterige stromen onder superkritieke condities in de openbare literatuur toegenomen. Desalniettemin zijn superkritiek water processen nog steeds geen algemeen goed. Voor het maximaliseren van de slaagkans van een demonstratieproject voor superkritieke vergassing van zuiveringsslib wordt het essentieel geacht dat de uitvoerende partij zelf over fundamentele kennis beschikt om het gedrag van organische en anorganische componenten onder superkritieke condities te beschrijven, en dit kan vertalen naar een goed werkend reactorontwerp.

De oplosbaarheid onder superkritieke condities kan substantieel uiteenlopen voor verschillende anorganische componenten. Daardoor slaan sommige zouten bij een andere temperatuur neer dan anderen. Er is echter nog weinig fundamentele kennis breed beschikbaar. Procede heeft sinds de jaren '90 fundamentele kennis en inhouse modellen ontwikkeld om de thermodynamica en oplosbaarheid van zouten onder verschillende superkritieke condities in de reactor te beschrijven. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur 4.2 en Figuur 4.3 voor NaCl.

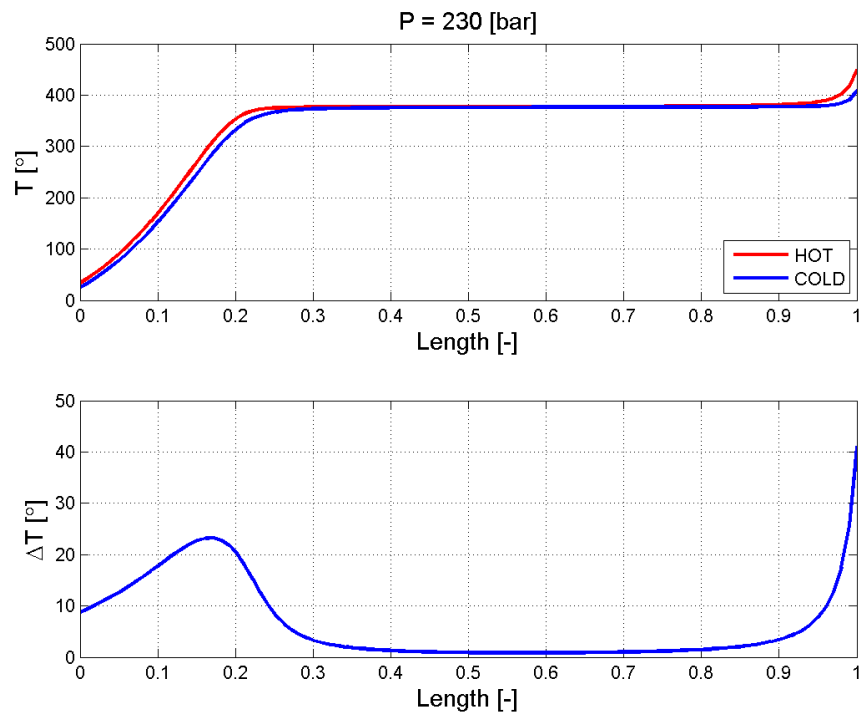


Figuur 4.2 Modelling van superkritiek water en het gedrag van NaCl bij verschillende condities (berekeningen Procede)



Figuur 4.3 Modellering van het zoutgedrag bij de overgang van vloeibaar naar superkritiek (berekeningen Procede)

Naast het voorspellen van het zoutgedrag is het ook van belang inzicht te hebben in de warmteoverdracht onder superkritieke condities. Het voorbeeld in Figuur 4.4 laat zien dat een afkoelende subkritisch wordende stroom in tegenstroom met een superkritiek wordende stroom onder bepaalde condities vrijwel geen temperatuurverschil zullen ervaren en daardoor slechte warmteoverdracht. Met deze inzichten kan het ontwerp zo worden aangepast dat deze situatie wordt vermeden.



Figuur 4.4 Modelling van de mogelijke warmtewisselaar pinch bij het uitwisselen van warmte tussen superkritieke water stromen (berekeningen Procede).

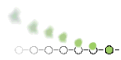
4.2 Fosfaat

Tijdens de onderzoeken naar het omzetten van varkensdrijfmest onder superkritieke water condities heeft Procede eerder middels autoclaafproeven onderzocht waar het fosfaat het proces weer verlaat. Hieruit bleek dat fosfaat zich voornamelijk in de zouthoudende (water fractie) bevond. Alhoewel de massabalansen niet volledig sluitend waren, bevestigen de resultaten de verwachting dat fosfaat voornamelijk neerslaat in de as/zout fractie van het proces. Er zijn ook succesvolle experimenten gedaan gericht op het selectief neerslaan van fosfaat uit de zouthoudende waterfase.

Voor een eerste demonstratie-installatie wordt aanbevolen om fosfaat met de andere organische componenten af te voeren en in een later onderzoek op te starten naar selectief neerslaan van fosfaat, ofwel als struviet of als enkelvoudig zout.

4.3 Ammoniak

Het is niet geheel duidelijk uit de recente literatuur hoe ammoniak zich gedraagt onder superkritieke vergassingscondities. Voor de haalbaarheid van de technologie is dit minder belangrijk. Kjeldahl-stikstof wordt of in de vorm van stikstof tijdens het proces vernietigd of kan als ammonium relatief eenvoudig worden teruggewonnen en als meststof worden afgezet.



Procede heeft in het verleden in een microcontinue opstelling onderzoek uitgevoerd naar het gedrag van ammoniak onder condities van superkritieke vergassing door vergassing van zowel een modelmatige ammoniakoplossing als varkensmest. Alhoewel de destijds beschikbare evenwichtberekeningen suggereerden dat vrijwel volledige omzetting van ammoniak naar N_2 zou mogen worden verwacht, werd bij vergassing van een ammoniakmengsel slechts een deel van de ammoniak omgezet naar waterstof en stikstof.

Geconcludeerd wordt dat het mogelijk is dat een deel van het ammoniak niet wordt omgezet en daarmee in het productgas kan belanden. De bij een waterzuivering gebruikelijke technieken voor stikstofverwijdering uit de deelstroom zoals DEMON of ANAMMOX behandeling zijn duur en zeer waarschijnlijk ook niet nodig, omdat het ammoniak in de effluent van een SCWG installatie ook op veel eenvoudiger wijze kan worden verwijderd. Procede beschikt over goedkopere afscheidingstechnieken voor ammonium waarbij een meststof kan worden geproduceerd. Wel wordt aanbevolen om in vervolgonderzoek de concentraties in het effluent van een werkende continue pilot opstelling voor RWZI slib te bepalen, zodat ook de stikstofverwerking uit de waterstroom bij de eerste opstelling op praktijkschaal meteen al goed is uitgevoerd.

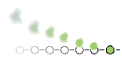
4.4 Zwavel

Over het gedrag van zwavel kan inzicht worden verschaft aan de hand van eerder door Procede uitgevoerd onderzoek in autoclaven met drijfmest. Opvallend daarbij is dat er d.m.v. GC-analyse geen zwavelcomponenten in het geproduceerde gas zijn aangetroffen. De bulk van de zwavel lijkt in de as/zout fractie van het proces neer te slaan, al moet ook worden opgemerkt dat bij de experimenten geen sluitende massabalans kon worden opgemaakt.

Geconcludeerd wordt dat de bulk van het zwavel in de zoutfractie belandt, maar dat er mogelijk sporen zwavel (waarschijnlijk H_2S) in de gasfractie aanwezig zullen zijn. H_2S in het productgas kan relatief eenvoudig worden verwijderd. Voor de bouw van een installatie op praktijkschaal wordt wel aangeraden typische concentraties van H_2S in het productgas te onderzoeken bij pilot plant onderzoek.

4.5 Zware metalen

Zware metalen zoals kwik en cadmium zijn voornamelijk aanwezig in het slib in verbindingen met b.v. chloride of sulfiden. Er is nog vrijwel geen informatie beschikbaar over het gedrag van deze zware metalen onder superkritieke vergassing condities. Vanwege hun relatief lage smelt en kooktemperaturen (veelal lager dan $700^\circ C$) gaan dergelijke zouten in conventionele verbrandingsprocessen snel over in de gasfase. De dampen van zware metalen bezitten een hoge dampspanning waardoor ze vaak meeslippen als emissie met de rookgassen.



Het gedrag van deze zouten in de superkritieke fase is niet geheel voorspelbaar. Het meest plausibel is dat ze zich vergelijkbaar gedragen met andere zouten en vooral met de zouthoudende fractie verdwijnen. Enkele zouten zoals kwikchloride hebben kookpunten lager dan 450°C, waardoor deze toch naar de gasfase kunnen gaan. De verwachting is echter dat de heersende hoge druk kookpuntsverhogend werkt en de overgang naar de gasfase beperkt, waardoor alle zware metalen vrijwel geheel met zoutrijke fractie meegaan.

5 Reactor- en procesontwerp

5.1 Inleiding

In het kader van dit onderzoek is gesproken met verschillende partijen welke thans onderzoek uitvoeren naar de toepassing van superkritieke vergassing van biomassa.

Dit zijn:

- TNO
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- Gensos
- Biomass Technology Group (BTG)
- Procede
- Sparqle

Uit overleg met deze partijen wordt geconcludeerd dat het neerslaan van zouten een belangrijk aandachtspunt is bij een reactorontwerp dat is geënt op verwerking van RWZI-slib. Hieraan is echter nog slechts beperkt aandacht besteed, de meeste proeven zijn verricht met relatief schone modelsubstraten. Alleen de procesconcepten van KIT, Gensos en Procede beschikken over de mogelijkheid om zouten af te vangen tijdens het proces.

5.2 Reactorontwerpen

Behalve het hieronder in meer detail gepresenteerde reactorconcept (een opwaarts doorstroomde buisreactor) zijn alternatieve concepten denkbaar waar momenteel ook aan gewerkt wordt.

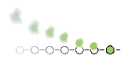
Buisreactoren:

Veel op kleine (lab)schaal opererende reactoren zijn als buisreactor uitgevoerd in verband met de simpele constructie. Kenmerk van dit type reactor is dat de verblijftijdspreiding gering is. Biomassa als voeding kan problemen opleveren in verband met de grotere deeltjes en door verstoppingen door neerslagvorming van zouten als geen speciale voorzieningen worden getroffen. Zo'n mogelijke voorziening is de keuze voor een subkritische zone waarin neerslagen en deeltjes opgevangen kunnen worden.

De reactoren van SPARQLE, TNO, BTG, KIT en Procede zijn varianten hierop.

Gemengde reactoren:

Hierbij heeft de reactor de vorm van een vat waarvan de inhoud min of meer gemengd wordt. De voeding komt snel op de reactietemperatuur, bijvoorbeeld door de voeding direct na voorverwarming tot een subkritieke temperatuur in de reactor te pompen. De opwarmtijd is kort en de reactortemperatuur uniform over de reactor. Neerslagvorming zal optreden voornamelijk op deeltjes in de reactor en minder op de



wand waardoor verstoppingproblemen worden verminderd. In de warmte wisselaar voor de reactor hoeft geen neerslagvorming op te treden.

Een praktische uitvoeringsvorm hiervan die door Gensos onderzocht wordt, is de fluid bed reactor waarin een extra medium, bijvoorbeeld zand, wordt toegevoegd en in beweging gehouden. Hierdoor neemt de complexiteit van de reactor toe. Fluid bed reactoren worden veel toegepast in tal van uitvoeringsvormen maar het bedrijven onder superkritieke condities is nieuw.

Omdat het hele reactorvolume op de reactietemperatuur is, is voor de verwarming veel hoogwaardige warmte nodig.

In verband met de vertrouwelijkheid kan op de details van de verschillende concepten niet in detail worden ingegaan.

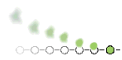
5.3 Behandeling van het vrijkomende water

De verschillende partijen waarmee is gesproken hebben geen informatie verstrekt over de wijze waarop het vrijkomende water dient te worden behandeld. In het SCWG concept van Procede wordt tijdens het vergassingsproces een grove scheiding gemaakt tussen een zoutrijke en een zoutarme stroom. De zoutrijke stroom wordt na aflaten van het gas verder fysisch-chemisch bewerkt. Daarbij wordt het zand eerst fysische afgescheiden, waarna fosfaat wordt geprecipiteerd en de resterende zoutfractie wordt ingedikt.

De zoutarme stroom bevat mogelijk ook ammoniak, zoals ook in 4.3 vermeld. De verwijdering hiervan kan worden uitgevoerd op fysische wijze middels membraantechnieken. In de financiële berekeningen in hoofdstuk 8 wordt aangenomen dat de inkomende stikstof (300 kg/h) op deze wijze wordt verwijderd.

5.4 Inzet van productgas

Om het vrijkomende productgas inzetbaar te maken, dient het (afhankelijk van de toepassing) te worden opgeschoond. Dit betekent vooral verwijdering van CO₂ en sporen H₂S, NH₃ en waterdamp. Bij de opstelling van KIT gebeurt dit middels een waterwasser, wat gepaard gaat met een lage selectiviteit en een hoog energieverbruik. Het lijkt verstandiger om in plaats daarvan meer selectieve gasbehandelingstechnieken toe te passen met een veel hogere selectiviteit en lager energieverbruik, zoals de door Procede ontwikkelde eigen gaswasser voor CO₂ en eventuele sporen H₂S, NH₃ en waterdamp. Door verwijdering van CO₂ stijgt de calorische waarde van het geproduceerde productgas. Verwijdering van de andere genoemde componenten is nodig vanwege de kwaliteitseisen van de verbruiker van het productgas. Zuivere CO₂ kan vervolgens worden afgelaten aan de atmosfeer of gebruikt voor een specifieke toepassing als algenteelt.



Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat het opgeschoonde productgas wordt ingezet in een gasmotor, mogelijk kan het op termijn worden ingezet in een brandstofcel. Voordelen van toepassing in een zgn. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) zijn het hogere elektrische rendement en het hoge temperatuurniveau waarbij de restwarmte vrijkomt.

6 Energetische aspecten

Dit hoofdstuk beschrijft de energetische aspecten van een demonstratie-installatie voor superkritieke vergassing van zuiveringsslib op een schaal van 100.000 i.e. Daarbij is eerst beschouwd hoeveel slib en daarmee chemische energie-inhoud aan het proces wordt toegevoerd bij verschillende uitvoeringsvarianten van de waterlijn. Vervolgens wordt toegelicht hoeveel energie hiermee kan worden opgewekt.

6.1 Aannames over het slib van de waterlijn

De hoeveelheid aan het vergassingsproces toegevoerde organische stof hangt samen met het ontwerp van de waterlijn. Haskoning heeft hiertoe in beeld gebracht hoeveel organische stof via het slib kan worden afgevoerd bij twee uitvoeringsvarianten voor een zuivering van 100.000 i.e., nl. volgens het AB proces en het actief slib proces. Voor beide varianten heeft Haskoning onderzocht wat het energieverbruik is van de zuivering en hoe de investerings- en operationele kosten zijn opgebouwd. Gedetailleerde energetische en financiële uitkomsten van de verschillende varianten voor de waterlijn zijn weergegeven in Bijlage A.

De aannames voor het vrijkomende slib zijn weergegeven in Tabel 6.1. Hieruit blijkt dat er aan chemische energie 834 tot 878 kW_{HHV} wordt toegevoerd aan het SCWG proces. Wanneer dit eerst in een slibgisting wordt verwerkt, blijft er nog steeds 405-495 kW_{HHV} over. Normaliter wordt dit afgevoerd naar een externe eindverwerker.

Tabel 6.1 Aangenomen karakteristieken van vrijkomend slib bij verschillende configuraties van de RWZI

Systeem	Actief Slib		A/B	
	Voor slibgisting	Na slibgisting	Voor slibgisting	Na slibgisting
Slib (kg ds/d)	5.477	4.032	4.900	3.286
chemisch slib (kg ds/d)	922	930	668	670
org stof afgevoerd (kg ds/d)	3.297	1.861	3.133	1.522
asgehalte	40%	54%	36%	54%
kW HHV in slib (23 GJ/t dos)	878	495	834	405
DS gehalte na ontwatering	24%	25%	24%	25%

Voor zowel de actief-slib variant als het A/B proces zijn scenario's met conventionele slibgisting met een gasmotor vergeleken met de optie van superkritieke vergassing.

Uit Tabel 6.2 (en in meer detail Bijlage A) blijkt dat de exploitatiekosten van de waterlijn (incl. kapitaalslasten) bij een conventionele installatie met slibgisting en slibontwatering uiteen lopen van 3,8-4,2 miljoen Euro per jaar. Dit zijn vooral de exploitatiekosten van de waterlijn (ca 85%) en in mindere mate kosten van afvoer



van slib (ca 10%) en inkoop van energie (ca 5%). Wanneer de slibgisting zou worden weggelaten, wordt de waterlijn wat goedkoper en blijft er ca 600-800 k€ per jaar aan exploitatieruimte over om de functies van slibeindverwerking over te nemen door een slibverwerkingssysteem welke dezelfde functionaliteit biedt, maar is gebaseerd op superkritieke vergassing. Uit deze exploitatiemarge moeten niet alleen de kapitaals- en operationele kosten van de SCWG installatie zelf worden gedekt, maar ook eventueel resterende kosten van inkoop van energie en afvoer van reststoffen. Dit wordt uitgewerkt in hoofdstuk 8.

Tabel 6.2 Aangenomen exploitatiekosten van de RWZI, uitgevoerd met slibgisting en resulterende exploitatieruimte bij vervanging van de slibgisting door een SCWG installatie

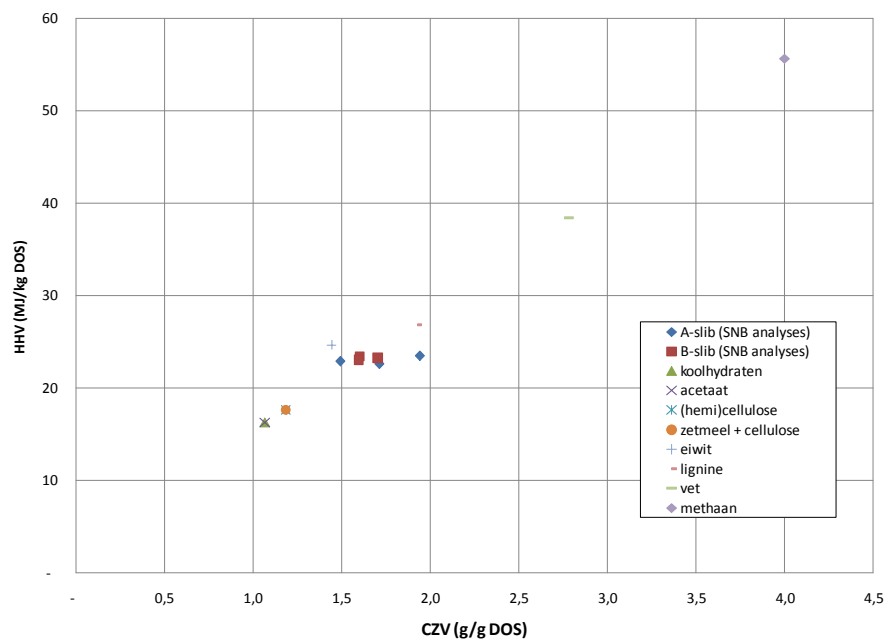
Kostenpost		Actief slib	AB
Met slibgisting			
Waterlijn, incl. kapitaalslasten	kEuro/jaar	3.545	3.346
kosten slibafvoer	kEuro/jaar	442	360
kosten elektra	kEuro/jaar	176	78
tot exploitatiekosten zuivering	kEuro/jaar	4.163	3.784
Zonder slibgisting			
Waterlijn, incl. kapitaalslasten	kEuro/jaar	3.365	3.194
Resterende expl.ruimte SCWG installatie, incl. slibafvoer en elektra	kEuro/jaar	798	590

Verder is nagegaan of het zinvol is om de ontwatering van 6% ds tot een aangenomen ds gehalte van 24% achterwege te laten, zodat kan worden bespaard op de investeringen en operationele kosten van de hiervoor benodigde kamerspers/centrifuge. Dit blijkt niet het geval.

Alhoewel in de uitwerking ervan is uitgegaan om vrijkomende ammoniak te behandelen door een combinatie van selectieve neerslag en RO, is voor de volledigheid ook onderzocht wat de financiële consequenties zijn, indien toch voor wordt gekozen de volledige hoeveelheid toegevoerd stikstof achteraf te verwijderen met bijv. het DEMON proces. Uit de gegevens in Bijlage A blijkt dat een dergelijke deelstroombehandeling ca 293 kEuro per jaar extra zou kosten, wat substantieel is ten opzichte van de beschikbare exploitatieruimte. Dit geeft al aan dat het voor de financiële rentabiliteit inderdaad noodzakelijk is deelstroombehandeling met DEMON of ANAMMOX te vermijden.

Opgemerkt moet worden dat er in deze studie steeds van wordt uitgegaan dat RWZI slib altijd een energie-inhoud (HHV basis) heeft van 23 MJ/kg droge organische stof, onafhankelijk van de CZV. Dit naar aanleiding van –in opdracht van SNB uitgevoerde- slibanalyses voor verschillende soorten slib met uiteenlopende CZV waarde. Een correlatie van HHV en CZV voor een breed spectrum aan organische

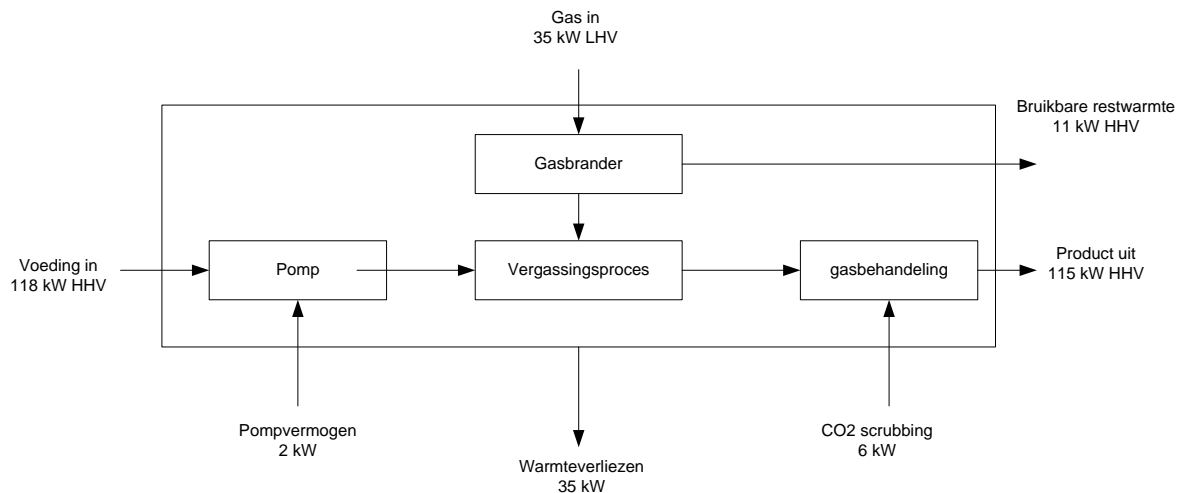
stromen suggereert echter dat er wel degelijk een dergelijk verband mag worden verondersteld (zie Figuur 6.1) waardoor er vooral voor slib van de A-trap (met een hoge CZV) mogelijk een kleine fout wordt gemaakt. Op basis van een analyse van de CZV van AB slib in vergelijking tot actief slib wordt verwacht dat de chemische energie-inhoud bij de AB variant daarom 100 kW hoger moet zijn dan hier aangenomen, wat resulteert in ca 40 kW extra elektriciteit uit de gasmotor. Aanvullend onderzoek op dit vlak is wenselijk.



Figuur 6.1 Relatie tussen CZV en HHV van een breed scala verschillende organische stromen, met daarin tevens de meetwaarden van A- en B slib van SNB.

6.2 Energiebalans

De energiebalans op praktijkschaal is afgeleid van de gepubliceerde energiebalans uit de opstelling van KIT in Karlsruhe, waarbij een methanoloplossing als voeding is gebruikt. Van deze installatie is de energiebalans met gebruik van methanol gepubliceerd bij toevoer van 100 kg/h aan 14.4% methanoloplossing en weergegeven in Figuur 6.2.



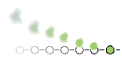
Figuur 6.2 Energiebalans volgens KIT bij vergassing van methanol

De energieinhoud van de voeding bij de beschreven opstelling komt overeen met 118 kW_{HHV} . De installatie verbruikt hierbij 2 kW_e aan elektrische pompenergie en 6 kW_e aan elektriciteit voor de CO_2 scrubber (een eenvoudige waterwasser). Daarnaast wordt 35 kW_{LHV} aan gas toegevoerd aan een brander met recirculatielucht om de tweede trap van de verwarmingsstap te leveren. Op deze wijze wordt er in totaal 161 kW aan energie toegevoerd aan het proces.

Volgens KIT wordt er bij deze instelling 15.5 m^3/h aan productgas gemaakt, waarvan 91% brandbare componenten (58% H_2 , 31% CH_4 , 8% ethaan, 1% propaan en 1% CO). Dit komt overeen met 115 kW_{HHV} , of een productrendement van 97%. Afgezien van ca 11 kW aan bruikbare restwarmte van de gebruikte gasbrander gaat er bij dit proces dus 35 kW aan restwarmte verloren, zodat het totale nuttige rendement ca 72% bedraagt.

Opgemerkt wordt dat het niet de primaire doelstelling van de VERENA installatie in Karlsruhe was om deze met een maximaal energetisch rendement te bedienen, maar vooral om goed te kunnen onderzoeken hoe het vergassingsproces plaatsvindt en kan worden beïnvloed. Verwacht wordt dat door toepassing van meer selectieve technologie voor CO_2 scrubbing, het energieverbruik van de CO_2 wasstap terug kan worden gebracht tot 2 kW . Evenzo wordt verwacht dat indien gebruik zou zijn gemaakt van elektrische warmtetoever, 17 kW_e voldoende zou zijn geweest. Er zou dan tevens geen hoge temperatuur restwarmte hoeven te worden afgevoerd. Door efficiënte warmte-uitwisseling tussen inkomende en uitgaande stroom kan deze warmtebehoefte verder worden verlaagd.

Uit deze inzichten en opschaling naar de gewenste schaal van toepassing van SCWG van RWZI slib is een energiebalans opgesteld voor een verbeterde versie van



de installatie van KIT, daarbij zijn de volgende aannames gedaan over het te verwerken slib:

- Slib komt uit een RWZI welke gebaseerd is op het actief slib proces of het AB proces (878 of 834 kW HHV)
- Slib wordt ontwaterd tot een vochtgehalte van 24% ds. De variant zonder ontwatering (6% ds) wordt ook beschouwd.
- Er vindt warmte-uitwisseling plaats tussen de uittredende stroom en de ingaande stroom, met een temperatuursverschil van 50 °C. Hieruit wordt afgeleid wat hoeveel warmte moet worden toegevoerd aan het proces op hoge temperatuur middels een elektrische verwarmingsspiraal.
- Het proces heeft een energetisch rendement van 97% van slib naar gas op HHV/HHV basis.
- Vrijkomend gas wordt na reiniging ingezet met in een gasmotor met een rendement van 40% op LHV basis

De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Tabel 6.3. Hieruit blijkt dat er bij ontwatering van het slib tot 24% ds, de bruto elektriciteitsopwekking uit de gasmotor bij SCWG toeneemt met ca 145-185 kW_e ten opzichte van een conventionele slibgisting. Na aftrek van het eigen gebruik is de SCWG installatie nog steeds 68-104 kW efficiënter. Overigens wordt er met de gedane aannames in geen van de varianten netto elektriciteit opgewekt, in het beste geval is de installatie vrijwel energieneutraal.

In afwezigheid van slibontwatering echter (aangenomen 6% ds) is er ruim 200 kW meer elektrische energie nodig voor het op druk brengen en opwarmen van de voeding, terwijl met het voorkomen van de ontwateringstap slechts ca 35 kW wordt vermeden. Uit energetisch oogpunt is het daarmee aantrekkelijk om slib eerst te ontwateren, alvorens het te vergassen.



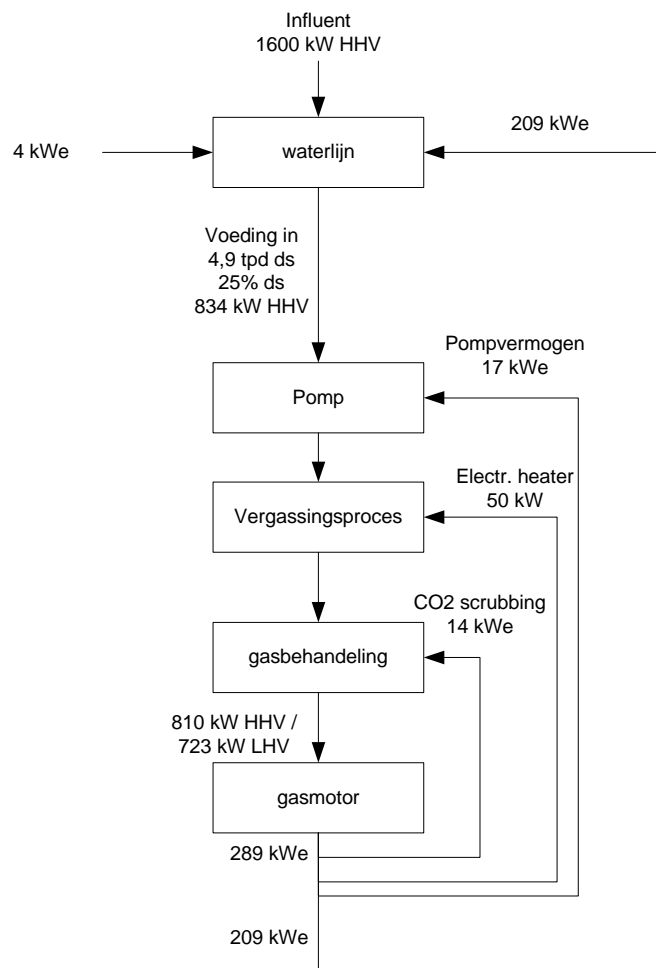
Tabel 6.3 Energieproductie van uit superkritieke vergassing van slib bij verschillende configuraties van de RWZI, in vergelijking tot conventionele slibgisting.

Configuratie Slibverwerking		AB			Actief Slib		
		Ref	SCWG		ref	SCWG	
Slibproductie	kg ds/d	3.286	4.900		4.032	5.477	
Slibproductie	kg dos/d	1.522	3.133		1.861	3.297	
Droge stofgehalte	% ds	25%	24%	6%	25%	24%	6%
Slibproductie	kg nat/d	13.145	20.415	81.659	16.129	22.820	91.278
Slib input naar SCWG	kW HHV	-	834	834	-	878	878
Gas output van SCWG	kW HHV	-	810	810	-	852	852
Gas output van SCWG	kW LHV	-	723	723	-	761	761
Rendement gasmotor	% LHV	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Output gasmotor	kWe	144	289	289	119	304	304
Energieverbruik pomp	kWe	-	-17	-68	-	-19	-76
Energieverbruik CO ₂ scrubbing	kWe	-	-14	-14	-	-15	-15
Energieverbruik electr. heater	kWe	-	-50	-198	-	-55	-222
bruto el. productie	kWe	144	209	9	119	215	-8
Energieverbruik zuivering	kWe	-217	-213	-173	-282	-274	-253
Netto el. productie	kWe	-73	-4	-165	-163	-59	-262

Ondanks de conservatieve aanname voor de energieinhoud van het slib (zie 6.1) komt het AB proces energetisch gunstiger te voorschijn dan de actief slib variant. Dit komt vooral omdat het energieverbruik van de waterlijn dan ca 60 kW_e lager ligt.

De financiële consequenties van de varianten zijn weergegeven in hoofdstuk 8.

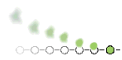
Een meer gedetailleerde toelichting op de energiestromen voor de AB variant wordt hieronder weergegeven, zie ook Figuur 6.3. Van de ca 1,6 MW_{HHV} welke met het influent van de zuivering wordt aangevoerd gaat ca 834 kW_{HHV} met het slib weg, hiervan wordt ca 810 kW_{HHV} aan productgas geproduceerd met de SCWG installatie, aangenomen dat dezelfde conversie als bij de VERENA reactor van KIT wordt gehaald (97%). Bij toepassing van het opgeschoonde productgas in een gasmotor met een elektrisch rendement van 40% levert dit ca 289 kW_e bruto op. Na dekking van het eigen energieverbruik van de SCWG proces en de waterlijn is de installatie vrijwel energieneutraal (er is nog steeds ca 4 kW_e nodig van het net).



Figuur 6.3 Energiebalans bij SCWG bij het ontwerp volgens Procede (situatie met AB variant voor waterlijn en slibontwatering tot 24% ds).

De benodigde energie voor het op temperatuur brengen van de voeding bedraagt 50 kW_e. Voor het op druk brengen van de voeding is 17 kW_e nodig. Voor de gasreiniging wordt een energie-efficiënte CO₂ scrubbingstechnologie toegepast, waardoor deze beperkt kan blijven tot 14 kW. De totale energiebehoefte van het proces bedraagt daarmee 81 kW_e. Omdat het effluent uit het proces vrijkomt bij ca. 60°C/300 Bar, betekent dit dat deze stroom zonder significante energie-input kan worden opgewerkt m.b.v. membraanscheiding.

Daarnaast komt er nog eens ca 412 kW aan restwarmte vrij van de toe te passen gasmotor. Dit is ruim voldoende voor het strippen van de CO₂ uit de afvanginstallatie en het indampen van de geproduceerde zoutslurry met een multi-effect verdamer. Een eventueel overschot kan mogelijk worden toegepast in de waterzuivering zelf.



6.3 Toekomst: Brandstofcel

Het productgas van superkritieke vergassing bevat naast H_2 ook CH_4 , CO_2 , CO en in mindere mate ook N_2 , H_2S , ammoniak en sporenelementen van enkele zware metalen. Om dit gas in te zetten in een gasmotor kan gebruik worden gemaakt van relatief eenvoudige en reeds beschikbare gasreinigingstechnologie.

Op termijn zou het gas in principe kunnen worden ingezet in een SOFC of MCFC brandstofcel zodat de beschikbare energie met een hoger rendement wordt omgezet naar elektriciteit. Op deze wijze kan ca. 80 kW extra elektriciteit worden geproduceerd. Voor de eerste toepassingen wordt echter uitgegaan van een conventionele gasmotor, vooral omdat de business case vooral is gebaseerd op het vermijden van de afvoer van slib op conventionele wijze (zie hoofdstuk 8).

7 Invloed superkritieke vergassing op de verwerkingscapaciteit van de RWZI

7.1 Mogelijke invloed op CZV- en N-belasting

Door het vervangen van een slibvergistingsinstallatie door een SCWG installatie veranderen debieten en concentraties van stofstromen in het zuiveringsproces. In dit hoofdstuk wordt geanalyseerd welke invloed dit kan hebben op de verwerkingscapaciteit van de RWZI. Deze analyse is gebaseerd op berekeningsresultaten van stofstromen in RWZI's zoals die zijn weergegeven in het Werkrapport Energiefabriek. In bijlage 2 van dat werkrapport worden de stofstromen weergegeven voor verschillende varianten van een RWZI met een capaciteit van 100.000 i.e. Deze massabalansen zijn hier gebruikt als referentiesituaties.

Alhoewel paragraaf 4.3 enig inzicht geeft in het gedag van ammoniak onder superkritieke condities, is het nog niet geheel duidelijk wat de belasting is van de retourstroom uit het proces van superkritieke vergassing op de zuivering in verhouding tot een conventionele installatie met slibgisting. In de basisvariant wordt aangenomen dat 97% van de CZV wordt omgezet, terwijl alle ammoniak onveranderd met de waterstroom uit het SCWG proces komt en via RO wordt verwijderd. Er is tevens een worst case scenario gemaakt waarin is uitgegaan van veel slechtere CZV omzetting en geen ammoniakverwijdering is toegepast. Samengevat zijn de situaties:

REF _{AS} :	het actief slibproces, met biologische P-verwijdering, vergisting en slibontwatering;
REF _{AB} :	het AB-proces, met biologische P-verwijdering, vergisting en slibontwatering;
SCWG _{AS} :	als variant REF _{AS} waarbij de vergistingsinstallatie is vervangen door een superkritieke vergassingsinstallatie met 97% CZV-conversie en alle ammoniak onveranderd uit het effluent van het SCWG proces wordt verwijderd;
SCWG _{AB} :	als variant REF _{AB} waarbij de vergistingsinstallatie is vervangen door een superkritieke vergassingsinstallatie met 97% CZV-conversie en alle ammoniak onveranderd uit het effluent van het SCWG proces wordt verwijderd;
SCWG _{ASWC} :	als variant SCWG _{AS} , echter met slecht werkende superkritieke vergassingsinstallatie met slechts 75% CZV-conversie en zonder verwijdering van ammoniak uit de waterstroom;
SCWG _{ABWC} :	als variant SCWG _{AB} , echter met slecht werkende superkritieke vergassingsinstallatie met slechts 75% CZV-conversie en zonder verwijdering van ammoniak uit de waterstroom.



In Tabel 7.1 is voor verschillende situaties weergegeven wat de hoeveelheden CZV en N_{Kj} zijn die vanuit de slibbehandeling retour gaan naar de zuivering (waartoe eventueel ook deelstroombehandeling wordt gerekend). De resulterende belasting van de waterlijn van de retourstroom is uitgedrukt als de CZV-toevoer plus 4,57 maal de N_{Kj} toevoer.

Tabel 7.1 De invloed van de gekozen slibverwerkingsoptie op de retourstromen vanuit de slibverwerking naar de zuivering. Ter vergelijking: de toevoer naar de zuiveringsinstallatie met de influent is ongeveer 9.500 kg/d CZV en 880 kg/d N_{Kj} . Dit resulteert in een belasting van 13.500 kg/d exclusief retourstroom. In deze tabel zijn tweede orde effecten niet verwerkt.

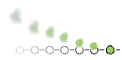
Variant	Retourstroom naar zuivering			Totaal te behandelen
	CZV (kg/d)	N_{Kj} (kg/d)	Belasting (kg/d)	Belasting (kg/d)
REF _{AS} (met slibgisting)	104	76	451	13.951
REF _{AB} (met slibgisting)	92	180	915	14.415
SCWG _{AS} (standaardscenario met nabehandeling)	140	0	140	13.640 (-2%)
SCWG _{AB} (standaardscenario met nabehandeling)	150	0	150	13.650 (-5%)
SCWG _{ASWC} (slechte CZV en N_{Kj} conversie, geen nabehandeling)	1.170	166	1.929	15.429 (+11%)
SCWG _{ABWC} (slechte CZV en N_{Kj} conversie, geen nabehandeling)	1.251	344	2.823	16.323 (+13%)

Er wordt van uitgegaan dat er normaliter sprake is van een goede conversie van CZV in het superkritieke proces (SCWG_{AS} en SCWG_{AB} in Tabel 7.1). Dit resulteert een belasting die 2 tot 5 % lager is dan in de standaardsituatie met een vergister, omdat wordt aangenomen dat ammoniak wordt neergeslagen als ammoniumcarbonaat en verwijderd middels membranen. In situaties bij een hoge N_{Kj} belasting (zoals bij het AB proces) kan dit de deelstroombehandeling eventueel overbodig maken.

onwaarschijnlijke en sombere scenario waarin de CZV slechts voor 75 % wordt afgebroken en de toegevoerde N_{Kj} in het geheel niet tijdens het proces of achteraf wordt verwijderd zal – naar deze ruwe schatting - de belasting van de zuivering met 11-13 % toe kunnen nemen. Alhoewel dit terugvoeren van Kjeldahl-stikstof naar de RWZI in het beschreven concept niet plaatsvindt, omdat deze of wordt vernietigd (naar stikstof) of als ammonium wordt teruggewonnen, is voor de volledigheid toch berekend wat de financiële consequenties zouden zijn indien ammonium met het DEMON proces zou worden verwijderd.

7.2 Mogelijke invloed op zware metalen en mineralen belasting

Slib vormt het belangrijkste afvoerkanaal voor niet in water oplosbare mineralen zoals fosfaat en zware metalen. Het is van essentieel belang dat deze componenten ook bij toepassing van SCWG een outlet vinden, hetzij direct door het superkritieke proces dan wel door een gekoppelde techniek (bijvoorbeeld door neerslagvorming



door dosering van een chemicalie of anderszins). Het is hiervoor belangrijk om inzicht te verkrijgen in de oplosbaarheid van normaliter niet oplosbare mineralen in superkritiek water.

In het artikel van Stendahl and S. Järfverström [4] worden de resultaten van SCWO op zuiveringsslib onderzocht. COD en NH_4 worden onder deze condities vrijwel volledig omgezet. Het effluent bevat een slurry waarin fosfaat en zware metalen nog vrijwel volledig aanwezig zijn.

Deze resultaten kunnen echter niet gelijk worden vertaald naar de omstandigheden bij SCWG, zeker niet de conversie van NH_4 en COD. Door de aanwezigheid van O_2 zijn fosfaat en zware metalen bij SCWO in de hoogste oxidatietoestand. Dit is bij SCWG niet noodzakelijkerwijs het geval. Het lijkt echter aannemelijk dat oplosbaarheid van deze mineralen ook na SCWG erg gering is, zoals ook al in hoofdstuk 4 is toegelicht.

Een opstelling zoals die bij KIT wordt bedreven levert de mogelijkheid op mineralen af te scheiden in het temperatuurgebied tussen 400-450 °C; een benadering die ook door Gensos en Procede is gekozen.

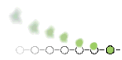
Uit het beschreven onderzoek in [4] blijkt bovendien dat fosfaat kan worden teruggewonnen zonder zware metalen mee te nemen.

Op grond van het bovenstaande kan voorzichtig worden geconcludeerd dat er voldoende reden is te verwachten dat SCGW in staat is mineralen als zware metalen en fosfaat te verwijderen uit de waterkringloop.

7.3 Belangrijk voor verder onderzoek

De conversiegraad van ammoniak naar stikstofgas bepaalt de noodzaak om achteraf ammoniak te verwijderen uit het effluent. Onderzoek van Procede en recente openbare publicaties geven aanleiding om aan te nemen dat er niet of nauwelijks omzetting van NH_3 kan plaats vinden, maar aanvullend onderzoek naar de N-omzetting is van interesse. Momenteel wordt ervan uitgegaan dat alle ammoniak in het effluent als ammoniumcarbonaat wordt afgevangen zodat er in het geheel geen retourvracht aan ammoniak is naar de zuivering. Het vrijgekomen ammoniumcarbonaat kan dan mogelijk zelfs als meststof worden toegepast.

Overigens betekent het inzicht dat ammoniak onder superkritieke condities niet wordt omgezet naar stikstofgas ook dat het conversierendement bij superkritieke vergassing van RWZI slib wat lager moet worden ingeschat dan de hier aangenomen 97%. Aanwezig ammoniak in het slib draagt immers wel bij aan de verbrandingswaarde, maar levert geen energie bij het vergassingsproces.



Ook over het gedrag van zware metalen in SCWG zijn vrijwel geen gegevens beschikbaar. Aannemelijk is dat het gedrag van zware metalen in de SCWG installatie niet tot doorslaggevende problemen zal leiden. Of dit werkelijk het geval is moet experimenteel worden vastgesteld. Daarbij kan ook het gedrag van zwavel nader worden onderzocht om uitsluitel te geven over de mate waarmee met H₂S in het productgas moet worden rekening gehouden.



8 Business Case

Met de verzamelde informatie is getracht het financiële perspectief van het SCWG proces met meer zekerheid vast te stellen. In deze paragraaf wordt een business case uitgewerkt om te beoordelen of een substantieel ontwikkelingstraject voor een SCWG installatie bij een zuiveringsinstallatie met een capaciteit van 100.000 ve. verantwoord is. De belangrijkste onzekerheden worden daarbij in kaart gebracht.

8.1 Investeringsomvang

De verwachte investeringsomvang voor de hardware van een complete commercieel bedreven superkritieke vergassingsinstallatie voor 100.000 i.e. bij de AB-variant is weergegeven in Tabel 8.1. Deze wordt geschat op bijna 3 miljoen Euro indien wordt ontwaterd tot ca 24% ds. Indien zou worden afgezien van ontwatering, loopt dit bedrag fors op vanwege de grotere volumestromen en deels modulaire opbouw van de reactor.

De grootste onzekerheid in de investeringsomvang is gelegen in de kosten voor de reactor zelf, de kosten hiervan zijn sterk afhankelijk van de staalprijsen. Hierover is overleg gevoerd met enkele mogelijke leveranciers van de naadloos getrokken reactorpijpen van de hiervoor beoogde staalsoort.

Belangrijk is verder hierbij op te merken dat het hier gaat om de investeringskosten na doorvoering van kostenreducerende maatregelen door verwachte leereffecten. De eerste installatie zal door vooronderzoek en extra veiligheidsvoorzieningen waarschijnlijk duurder worden.

Tabel 8.1 Globale investeringsomvang bij uiteindelijke bouw, na doorvoering van kostenreducerende maatregelen

Onderdeel	Bedrag (k€ ex BTW)	
	24% ds	6% ds
Slibaanvoer + booster pomp monopomp	5.000	15.000
Membraanflow pomp (300 bar)	100.000	300.000
H ₂ S verwijdering + CO ₂ verwijdering	120.000	120.000
Aansturing en instrumentatie	100.000	200.000
Zoutopwerking	50.000	100.000
Commissioning	350.000	350.000
Fundering gebouw etc.	350.000	500.000
SCWG reactor	1.000.000	3.000.000
Totaal hoofdcomponenten	2.075.000	4.585.000
Lang factor 40%	830.000	1.834.000
Totaal investering	2.905.000	6.419.000



Dit is binnen ca 25% in lijn met enkele andere schattingen in (deels vertrouwelijke) rapportages van andere partijen waarmee Procede in het verleden heeft samengewerkt.

Overigens zijn er ten opzichte van een conventioneel ontwerp van de waterlijn ook enkele besparingen zoals het weglaten van een slibgisting. Volgens Haskoning wordt daardoor 1,5 tot 1,8 miljoen Euro bespaard op de waterlijn voor respectievelijk de AB en actief slib AB varianten. Daarmee bedraagt de netto meerinvestering ten opzichte van een conventionele installatie met slibgisting ca 1,1 - 1,4 miljoen Euro.

Tabel 8.2 *Totale investeringsomvang waterzuivering 100.000 ve. bij uiteindelijke toepassing (kEuro ex BTW).*

Type RWZI	Investering	waterlijn zuivering	SCWG installatie	Totaal
Actief slib	SCWG	31.150	2.905	34.055
	Referentie	32.950	-	32.950
	Meerinvestering	-1.800	2.905	1.105
AB	SCWG	29.970	2.905	32.875
	Referentie	31.480	-	31.480
	Meerinvestering	-1.510	2.905	1.395

8.2 Financiële haalbaarheid

De financiële haalbaarheid is bepaald aan de hand van de geschatte investeringskosten zoals weergegeven in 8.1, de energiebalans uit 6.2 en de variabele kosten en opbrengsten. Daarbij zijn in samenwerking met Haskoning ook wijzigingen in kosten op de waterlijn meegenomen, vanuit het model Slibketenstudie 2. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.3, de belangrijkste invloeden zijn hieronder verder toegelicht.

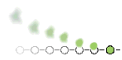
Kosten waterlijn

Alle operationele kosten van de waterlijn voor de verschillende varianten zijn betrokken uit het model 'Slibketenstudie 2'. De operationele kosten van de waterlijn in de AB variant met slibgisting, exclusief inkoop en verkoop van elektra en afvoer van slib bedragen ca 0,96 kEuro/jaar, exclusief ca 2,5 MEuro per jaar aan kapitaalslasten. Bij toepassing van SCWG wordt ca 150 kEuro per jaar bespaard op de waterlijn.



Tabel 8.3 Overzicht van investerings- en exploitatiekosten bij de verschillende varianten van een waterzuivering van 100.000 ve. (kEuro ex BTW).

		AB variant			Actief slib variant		
		SCWG	referentie	verschil	SCWG	referentie	verschil
Investeringsopbouw							
Waterlijn zuivering	kEuro	29.970	31.480	-1.510	31.150	32.950	-1.800
SCWG installatie	kEuro	2.905		2.905	2.905	0	2.905
Totaal investering	kEuro	32.875	31.480	1.395	34.055	32.950	1.105
Kosten waterlijn							
Kapitaalslasten		2.335	2.455	-120	2.440	2.580	-140
Overige exploitatiekosten		859	891	-32	925	965	-40
Totale exploitatiekosten		3.194	3.346	-152	3.365	3.545	-180
Exploitatiekosten SCWG							
personeel (0,5 FTE x 60 k€)	kEuro/jaar	30		30	30		30
Onderhoud (5% van investering)	kEuro/jaar	145		145	145		145
Totaal expl.kosten, excl kapitaal		175		175	175		175
Kapitaalslasten	kEuro/jaar	280		280	280		280
Expl.kosten incl kapitaalslasten	kEuro/jaar	455		455	455		455
Slib/residu afvoer kosten							
Slib/residu productie	t ds/y	645	1.200	-555	796	1.472	-676
Slib/residu afvoer tegen betaling	t ds/y	645	1.200	-555	796	1.472	-676
Slib/residu afvoer kosten	t ds/y	135	300		135	300	
Slib/residu afvoer kosten	kEuro/jaar	87	360	-273	107	442	-334
Electra effect							
Elektra inkoop	kEuro/jaar	5	78	-74	64	176	-113
Elektra verkoop	kEuro/jaar						
Elektra kosten netto	kEuro/jaar	5	78	-74	64	176	-113
Kosten overzicht							
waterlijn, incl kapitaalslasten	kEuro/jaar	3.194	3.346	-152	3.365	3.545	-180
SCWG, incl kapitaalslasten	kEuro/jaar	455	-	455	455	-	455
Slib/residueafvoer	kEuro/jaar	87	360	-273	107	442	-334
Electra	kEuro/jaar	5	78	-74	64	176	-113
Tot expl kosten zuivering	kEuro/jaar	3.741	3.784	-43	3.991	4.163	-172
Waarvan kapitaalslasten	kEuro/jaar	2.615	2.455	160	2.720	2.580	140
Waarvan overige lasten	kEuro/jaar	1.126	1.329	-203	1.271	1.583	-311
	per ve	37,41	37,84	-0,43	39,91	41,63	-1,72



Kapitaalslasten

De jaarlijkse kapitaalslasten nemen met toe als gevolg van de hogere investering zoals in 8.1 toegelicht. Voor de SCWG installatie is gerekend met 5% rente en 15 jaar afschrijving van de installatie, de kapitaalslasten van de waterlijn zijn middels het model 'Slibketenstudie 2' bepaald.

Eindverwerking

Mechanische ontwaterd slib (25% ds) wordt momenteel verwerkt voor een tarief van ca 300 Euro per ton ds. Bij toepassing van superkritieke vergassing wordt aangenomen dat de waterige stroom zodanig wordt behandeld dat stikstof als ammoniumcarbonaatoplossing wordt afgescheiden en het restant (incl. fosfaat) wordt ingedampt. Van dit residu wordt aangenomen dat het wordt afgevoerd naar zoutmijnen tegen een tarief van 135 Euro per ton. Op jaarbasis betekent dit ca 87-107 kEuro, afhankelijk van de variant. Terugwinning van fosfaat kan hier een beperkte invloed op hebben.

Energieproductie

In vergelijking tot slibgisting wordt er bij superkritische vergassing meer elektriciteit opgewekt door de gasmotor. Daarentegen neemt ook de elektriciteitsvraag toe t.g.v het SCWG proces, zodat er netto 68-104 kW meer wordt opgewekt. Dit is echter nog steeds onvoldoende voor teruglevering aan het net en wordt dus volledig geconsumeerd voor eigen gebruik.

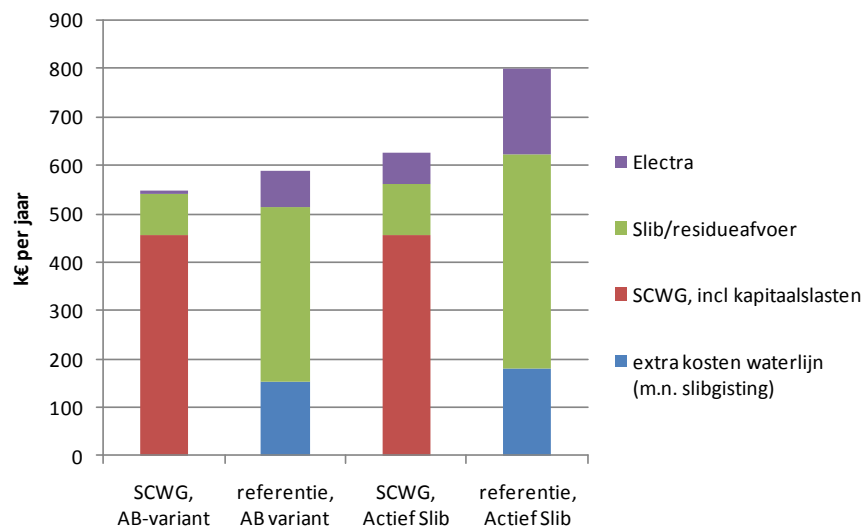
Operators

Aangenomen wordt dat er 0,5 FTE extra wordt aangenomen voor het bedienen van de installatie ten opzichte van de installatie met slibgisting. De hiermee gepaard gaande extra salariskosten bedragen 30.000 Euro/jaar.

Onderhoud

De onderhoudskosten worden geschat op 5% van de verwachte investering, ofwel ca. 145.000 Euro per jaar.

Een overzicht van de slibverwerkingskosten van de verschillende varianten (AB/actief slib met en zonder superkritieke vergassing) is weergegeven in Figuur 8.1.



Figuur 8.1 Jaarlijkse kosten van slibverwerking bij een zuivering van 100.000 ve welke is uitgerust met superkritieke vergassing, in vergelijking tot een conventioneel uitgevoerde zuivering volgens AB variant en Actief slib variant.

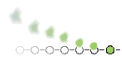
8.3 Conclusie business case

Uit Tabel 8.3 blijkt dat de toepassing van superkritieke vergassing van slib goedkoper is dan de conventionele uitvoering.

De exploitatiekosten van de superkritieke slibbehandeling worden geraamd op 455 kEuro/jaar. Dit bedrag wordt ruimschoots terugverdiend door besparingen op de waterlijn (ca 152-180 kEuro/jaar), slibafvoer (273-334 kEuro/jaar) en elektriciteit (74-113 kEuro/jaar). Totaal dalen de exploitatiekosten met ca 43-173 kEuro per jaar (0,43-1,73 Euro perVE), incl. kapitaalslasten.

De meerinvestering van het uitvoeren van een RWZI volgens het beschreven concept met een superkritieke vergassingsinstallatie ten opzichte van een conventionele uitvoering met vergister wordt geraamd op 1,1-1,4 miljoen Euro voor de actief slib resp. de AB variant. Daar tegenover staan besparingen in de exploitatiekosten van 203 - 311 kEuro per jaar. Dit komt overeen met een simpele terugverdientijd van 3,5 - 6,8 jaar voor de actief slib resp. de AB variant.

Overigens heeft Haskoning ook ingeschat wat de kosten zouden zijn van deelstroombehandeling indien het resulterende water niet zou worden behandeld op de hier aangenomen wijze, maar via het DEMON proces. Dit zou een extra investering vergen van ca. 2,3 miljoen Euro voor het proces zelf, naast nog eens ca. 0,5 miljoen Euro extra voor de waterlijn, zodat de totale investeringskosten ca. 2,8 miljoen Euro hoger worden. Hierdoor zouden de totale exploitatiekosten met 293 k€



per jaar toenemen, waardoor het proces financieel niet meer concurrerend is ten opzichte van een conventionele configuratie met slibgisting.

Verder is er in de business case nog geen rekening gehouden met de mogelijkheid ammoniumcarbonaat en fosfaat-zouten selectief af te scheiden en aldus direct als meststof te verwaarden. Hiervoor worden wel degelijk mogelijkheden gezien vanwege de relatief gunstige condities betreffende de hoge temperatuur en druk van het effluent van het SCWG proces. Ook is het aannemelijk te veronderstellen dat de energieopbrengst en daarmee de financiële prestaties van de AB variant gunstiger zullen uitvallen dan geschetst in onderliggend vanwege een mogelijke onderschatting van de energieinhoud van het AB slib. Verwacht wordt dat daarmee de AB variant ongeveer vergelijkbaar scoort als de 'actief slib' variant.

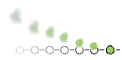
Alhoewel er in Tabel 8.3 van uit is gegaan dat net als bij slibgisting het slib wordt ontwaterd tot een ds gehalte van 24%, is ook de variant met 6% geanalyseerd om na te gaan of de meerkosten in de duurdere SCWG installatie worden gecompenseerd door een besparing op de kosten van ontwatering. Dit blijkt niet het geval; het voorkomen van ontwatering bespaart ca 235 kEuro per jaar in de waterlijn, maar leidt tot een fors duurdere SCWG installatie (toename kapitaalslasten en onderhoud 339 kEuro/jaar) en er ook tot 175 kEuro meer aan elektrische energie nodig is om de grotere hoeveelheden slib op te warmen.

Voor een eerste demo-installatie op praktijkschaal zal aanvullend onderzoeks- en ontwikkelingswerk moeten worden verricht. De financiële haalbaarheid van een eerste demonstratieproject valt daarom minder gunstig uit wanneer de leercurve nog niet is doorlopen.

8.4 Vergelijking met Slibketenstudie II

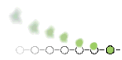
Ook in het rapport Slibketenstudie II [8] wordt superkritieke slibvergassing financieel, energetische en kwalitatief beoordeeld. Die berekeningen laten zien dat in vergelijking tot verbranding als eindverwerkingstechniek, de energieopbrengst ca. 0,1 GJ_{prim}/VE jaar toeneemt, terwijl de kosten ook ca. 1 á 2 Euro/VE per jaar lager zijn. Uitgangspunt is een rwzi van 100.000 VE, net als in deze studie. Deze resultaten uit zijn in goede overeenstemming met de resultaten uit deze studie. Zo blijkt uit Tabel 8.3 een kostendaling van 0,4-1,7 Euro/VE en uit Tabel 6.3 blijkt dat er netto ca 100 kW meer elektriciteit wordt gemaakt. Teruggerekend naar primaire energie betekent dit ca 0,08 GJ_{prim}/ve.

Ook wordt er in het rapport op gewezen dat superkritieke vergassing weliswaar veelbelovend is, maar nog onvoldoende bewezen. Zowel energetisch als financieel zijn er nog onzekerheden die verdere ontwikkeling van het proces vereisen.



Toch zijn er ook enkele verschillen ten opzichte van deze studie. Zo veronderstelt het rapport Slibketenstudie II dat er geen vergaande mechanische ontwatering meer nodig is en ammoniumstikstof met een hoog rendement wordt omgezet naar N_2 . Uit onderliggende studie blijkt dat ontwatering ook bij superkritieke slibvergassing nog wel degelijk zinvol is uit energetische en financiële overwegingen.

Ook blijkt uit recente literatuur wel degelijk dat het aannemelijk is dat ammoniumstikstof vrijwel onveranderd in de waterfase blijft. Dit hoeft echter niet problematisch te zijn, maar kan gezien de vigerende procescondities juist een kans zijn voor kosteneffectieve terugwinning van ammonium ter benutting als meststof.



9 Ontwikkelingstraject

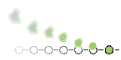
9.1 Onderzoekspartijen met ervaring op SCWG

Voor de verdere ontwikkeling en specifieke toepassing van de technologie voor zuiveringsslib is gezocht naar mogelijkheden tot bundeling van kennis met verschillende partijen met ervaring met superkritieke vergassing. Met de belangrijkste partijen is overleg gevoerd om te bezien in hoeverre de bij hen aanwezige kennis en onderzoeksfaciliteiten effectief bij kunnen dragen aan de verdere ontwikkeling van superkritieke vergassing van slib, gericht op toepassing op praktijkschaal (100.000 ve). Dit zijn TNO, GENSOS, SPARQLE, PROCEDE, KIT, BTG en Universiteit Twente. Uit dit onderzoek en de gesprekken met de onderzoekspartijen kwamen een aantal aspecten naar voren die nog onvoldoende bekend zijn en toch van belang voor de toepassing van het proces binnen een RWZI. De belangrijkste conclusies zijn:

- Er is inmiddels voldoende kennis en ervaring beschikbaar om superkritieke vergassing van RWZI slib te gaan toepassen in een demonstratieproject.
- Onderzoek naar SCWG in Nederland heeft zich vooral gericht op relatief schone stromen (methanol, diesel, algen). Partijen in Nederland hebben nog weinig of geen ervaring met vergassing van slurry-achtige biomassastromen welke uit vezelrijk materiaal bestaan, met significante hoeveelheden anorganische componenten. De meest relevante ervaringen qua vergelijkbare biomassa is bij KIT in Duitsland (mais silage, druiven afval) waar ook faciliteiten voor ontzouting zijn opgenomen in de installatie
- De grootste pilot plant is geplaatst bij KIT, verwacht wordt dat een succesvolle proef voor SCWG van RWZI slib in een bestaande installatie mogelijk is, mede gelet op de al genoemde ervaring met reële biomassa en de beschikbaarheid van verschillende pompen.
- Betwijfeld wordt of de beschikbare kleinere continue reactoren bij andere partijen gevoed kunnen worden met RWZI slib, met name vanwege problemen met blokkeren van leidingen door zoutafzettingen en aanwezige vezels (haren).

Op basis van bovenstaande overwegingen is een ontwikkelpad geschetst om te komen tot voldoende inzicht om met voldoende zekerheid een full scale demonstration plant (FSDP) te ontwerpen en bouwen op praktijkschaal (1 m³/h of 100.000 ve). Daarbij wordt ingegaan op de wenselijk aanpak van resterende knelpunten, samenwerkingsvorm, tijdsplanning en financiële aspecten van het vervolgtraject.

Alle genoemde marktpartijen noemen RWZI-slib als mogelijk interessante voeding voor het superkritieke vergassingsproces, maar daadwerkelijke experimenten met slib zijn nog niet uitgevoerd.



In ieder geval dient superkritieke slibvergassing op grotere schaal (bijv. 100 l/h) te worden onderzocht, om aanvullend op de reeds beschikbare kennis, de noodzakelijke aanvullende inzichten te genereren om een reactor op praktijkschaal te kunnen ontwerpen. Dit zijn bijvoorbeeld:

- meting van een aantal procestechnologische ontwerpparameters, zoals warmteoverdracht en zoutgedrag om de beschikbare modelbeschrijvingen zoals beschikbaar bij o.a. Procede en KIT te valideren en verder te ontwikkelen in het superkritieke gebied, die van belang voor een goed ontwerp van de opgeschaalde demo-installatie;
- bepaling van de conversie van organische stof en het aanscherpen van de ammoniumbalans in de installatie onder meer realistische praktijk condities;
- verdere aanscherping van de fosfaatbalans in de installatie om de mogelijkheden voor terugwinning van de fosfaten te kunnen bepalen;
- het valideren van eerder door Procede en anderen ontwikkelde methodes voor de ontsluiting en terugwinning van fosfaat op een in de praktijk gevormde zoutmatrix;
- detailanalyse van de effluentkwaliteit met moderne analysetechnieken.
- detailanalyse van de gas kwaliteit met moderne analysetechnieken
- valideren van de door Procede en anderen ontwikkelde gasopwerkingstechnieken voor diepe verwijdering van H₂S, CO₂ e.d. onder praktische condities

Om de onderzoekskosten beperkt te houden ligt het voor de hand na te gaan of een deel van de meer fundamentele kennisvragen al beantwoord kan worden door gebruik te maken van installaties op kleine schaal (bijv 5-10 l/h of batchopstellingen). Dit betreft vooral vragen rondom meer fundamentele kennis rondom ammoniumomzetting en het gedrag van fosfaten, sulfaten en zware metalen. Ook KIT wil zijn grootschalige experimenten door enkele kleinschalige experimenten vooraf laten gaan.

9.2 Ontwikkelingstraject

Tabel 9.1 schetst de manier waarop de ontwikkeling van de superkritieke demoplant kan worden aangepakt, op basis van de gewenste onderzoeksactiviteiten en de meer gebruikelijke activiteiten om tot de realisatie van een installatie te komen.

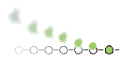
Het ontwikkeltraject begint met een pre concurrentieel onderzoek in jaar 1 en 2, waarin de uitgangspunten van het procesontwerp worden vastgelegd. Het doel daarvan is dat de uitgangspunten voor een openbare aanbesteding van de demonstratie-installatie in jaar 3-5 worden vastgelegd. De informatie uit het pre concurrentiële onderzoek komt in een openbaar eindrapport beschikbaar.



Tabel 9.1 Voorgesteld projectplan op hoofdlijnen

Type	Planning	Onderzoek	Studie/ontwerp/engineering FSDP
Pre-concurrentieel	Jaar 1	a. Proeven met slib op 1/10 schaal. b. Meting van ontwerpparameters en detaillering massabalans voor N en P	d. Ontwerpstudie hoofdonderdelen: reactor, warmtewisselaar, pomp en materiaalkeuze
	Jaar 2	c. Materiaalonderzoek naar mogelijk goedkopere materialen	e. Voorontwerp incl gasbehandeling, effluentbehandeling, inpassing rwzi, benutting energie en kostenraming
		Go – no go moment	
Realisatie	Jaar 3		f. Definitief ontwerp en prijs
		Go – no go moment	
	Jaar 4		g. Bestek/aanbesteding/realisatie
	Jaar 5		h. In bedrijfstelling en operatie demoplant i. Definitieve evaluatie technologie

De engineering activiteiten zoals hier omschreven passen bij een meer traditionele aanpak zoals die bij RWZI's (en heel veel andere projecten) gebruikelijk is. Indien er een consortium kan worden gevormd dat in belangrijke mate het risico wil dragen komen ontwerp en realisatie meer in één hand te liggen.



10 Conclusies en aanbevelingen

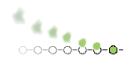
Superkritiek vergassen van ontwaterd riolslib (ca 25% droge stof) met terugwinning van zouten is een technologie die op basis van de huidige ontwikkelingen binnenkort technisch haalbaar is en economisch aantrekkelijk wordt verondersteld. Het proces kan financieel rendabel worden bedreven doordat wordt bespaard op het afzetten van slib en er meer elektriciteit wordt gemaakt. De meerinvestering in een SCWG installatie voor een typische zuivering van 100.000 ve (geschat op ca. 1,1-1,4 miljoen Euro) wordt in ca 3,5 - 6,8 jaar terugverdiend.

De benodigde technologieën en technische kennis zijn grotendeels al aanwezig of kunnen binnen enkele jaren worden ontwikkeld tot het benodigde niveau voor praktische toepassing. Een voldoende hoog kennisniveau is al aanwezig over het proces van superkritieke vergassing zelf, het gedrag van verschillende zouten onder superkritieke condities en het opwaarderen van de geproduceerde gassen en waterige zoutstromen. Dit wordt bevestigd door de gesprekken met onderzoekers in dit veld. De technologische ontwikkeling is voldoende ver om verantwoord een volgende stap te kunnen zetten naar realisatie op praktijkschaal.

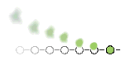
Voor een optimaal ontwerp van een demonstratie-installatie en rendabele bedrijfsvoering is het wenselijk om in een pre concurrentieel onderzoeksprogramma aanvullend praktisch inzicht te ontwikkelen in de bedrijfsvoering van een SKW installatie, het gedrag van stikstof en fosfaatverbindingen en de reactiesnelheid van het proces. Het wordt aanbevolen om hiertoe proeven te doen met slib op een schaal van 100 l/h bij de VERENA installatie van KIT in Karlsruhe, gekoppeld aan procestechnische modellering en labtesten door Procede op het gebied van gasopwerking bij hoge druk, fosfaatopwerking en ammoniumwinning methodes. Indien praktijkproeven worden uitgevoerd door SPARQLE of GENSOS is het mogelijk om meer fundamenteel onderzoek te laten uitvoeren naar het gedrag van stikstof en fosfaat te laten uitvoeren in meer kleinschalige opstellingen bij bijvoorbeeld de Universiteit Twente. Daarnaast is aanvullend materiaalonderzoek gewenst, bijvoorbeeld door de materialenexperts van TNO en evt experts van KIT.

De fundamentele procesmodellering welke Procede kan uitvoeren, dient als basis voor een vervolgens uit te voeren ontwerpstudie op hoofdonderdelen en een voorontwerp van een installatie op praktijkschaal. Op basis van de beschikbaar te stellen informatie kan de installatie worden aanbesteed, gebouwd en in bedrijf gesteld.

Procede heeft ervaring met de ontwikkeling, bouw en commercialisering van vergelijkbare nieuwe chemische processen en is bereid om in samenwerking met het waterschap Aa en Maas een volledig consortium met onderzoeksinstellingen en



uitvoerende partijen op te tuigen dat het R&D plan gaat uitvoeren. Wanneer nu wordt begonnen met een het samenstellen/ontwerpen van een totaalconcept gericht op demonstratie van 1-2 m³/h slib, dan is het zeer waarschijnlijk dat over 4 jaar een werkende demonstratie-installatie op praktijkschaal beschikbaar is.



11 Referenties

1. The solubility of magnesium chloride and calcium chloride in near-critical and supercritical water Original Research Article, The Journal of Supercritical Fluids, Volume 53, Issues 1-3, June 2010, Pages 17-24, Ingo Leusbrock, Sybrand J. Metz, Glenn Rexwinkel, Geert F. Versteeg
2. The solubilities of phosphate and sulfate salts in supercritical water Original Research Article, The Journal of Supercritical Fluids, Volume 54, Issue 1, July 2010, Pages 1-8, Ingo Leusbrock, Sybrand J. Metz, Glenn Rexwinkel, Geert F. Versteeg
3. Quantitative approaches for the description of solubilities of inorganic compounds in near-critical and supercritical water Original Research Article, The Journal of Supercritical Fluids, Volume 47, Issue 2, December 2008, Pages 117-127, Ingo Leusbrock, Sybrand J. Metz, Glenn Rexwinkel, Geert F. Versteeg.
4. Phosphate recovery from sewage sludge in combination with supercritical water oxidation, K. Stendahl and S. Järfverström, Water Science and Technology Vol 48 No 1 pp 185–191 (2003)
5. Hydrogen production by catalytic supercritical water gasification of nitriles, Yang Guo, Shuzhong Wang, Donghai Xu, Yanmeng Gong, Xingying Tang, Jie Zhang, International Journal of Hydrogen Energy 35(2010) 4474–4483
6. Continuous salt precipitation and separation from supercritical water. Part 1: Type 1 salts, M. Schubert, J. W. Regler, F. Vogel, Journal of Supercritical Fluids 52 (2010) 99–112
7. Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: A review of sub- and supercritical water technologies. A. Peterson, F. Vogel, R. P. Lachance, M. Fröling, M. J. Antal, Jr., J. W. Tester, Energy Environ. Sci., 2008, 1, 32–65
8. Slibketenstudie II, Nieuwe technieken in de slibketen, Stowa rapport 2010-33, W.M. Wiegant, D. Knezevic, W.F. Koopmans, Haskoning, 2010



12 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Waterschap Aa en Maas
Afdeling Advies Zuiveren
t.a.v. dhr F. Kiestra
Postbus 5049
5201 GA 's-Hertogenbosch

Naam en functie van de uitvoerende auteurs:

Ir. J. Koppejan	Auteur
Ir. N.A.M ten Asbroek	Co-auteur
Dr. J.A. Zeevalkink	Co-auteur

Periode waarin het onderzoek plaatsvond:

September 2010 – April 2011

Handtekening:

Goedgekeurd door:

Ir. J. Koppejan
Auteur

Prof.dr.ir. G.F. Versteeg
Wetenschappelijk directeur



Bijlage A. Resultaten Haskoning

Exclusief slibontwatering:

Systeem Slibgisting+SNB/SCWG Deelstroombehandeling DEMON/ANAMMOX? Slibontwatering?	Actief Slib Slibgisting nee nee	Actief Slib SCWG nee nee	Actief Slib SCWG ja nee	AB Slibgisting nee nee	AB SCWG nee nee	AB SCWG ja nee
Slib afgevoerd						
kg ds/d totaal afgevoerd naar eindverwerking	4.032	5.477	5.477	3.286	4.900	4.900
kg ds/d chemisch slib	930	922	922	670	668	668
kg ds/d org stof afgevoerd	1.861	3.297	3.297	1.522	3.133	3.133
asgehalte	54%	40%	40%	54%	36%	36%
HHV MJ/kg dos volgens Haskoning	19,9	22,7	22,7	19,9	24,6	24,6
afbraak dos in gisting	43%	0,0%	0,0%	51%	0,0%	0,0%
Ds gehalte van slib	6%	6%	6%	6%	6%	6%
volumestroom m ³ /d	67,2	91,3	91,3	54,8	81,7	81,7
energieverbruik zuivering (kWe)						
voorbehandeling	0,3	0,3	0,3	33,5	33,5	33,5
biologie	161,9	161,9	161,9	56,0	56,0	56,0
nabezinking	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
slibindikking	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
el energie slibgisting (kWe)	7,2	-	-	7,7	-	-
slibontwatering (kW)	-	-	-	-	-	-
overig	41,9	41,9	41,9	51,6	51,6	51,6
energie in chemicalien	43,7	43,7	43,7	26,7	26,7	26,7
Totaal input energie (kWe)	260,6	253,4	253,4	181,1	173,4	173,4
energie uit gisting (kWel)	118	0	0	168	0	0
aangenomen HHV slib (GJ/t dos)	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
energie in slib (kW HHV)	495	878	878	405	834	834
financieel waterlijn ex deelstroombeh						
Investering k€	31.305	29.430	29.975	30.315	28.185	28.730
kapitaalslasten	2.420	2.265	2.315	2.340	2.155	2.210
opbrengst gasmotor	140			199		
kosten inkoop electra	316	316	322	153	153	159
bedrijfsvoering incl energie	1.090	1.179	1.201	807	958	980
bedrijfsvoering excl energie	914	863	879	853	805	821
totaal exploitatiekosten k€	3.334	3.128	3.194	3.193	2.960	3.031
meerkosten ontwatering (k€)						
Stikstofverwijdering						
investering DEMON 300 kg/d			2.264			2.264
exploitatiekosten incl kap. lasten			293			293
Financieel incl N verwijdering						
investering k€	31.305	29.430	32.239	30.315	28.185	30.994
expl. Lasten excl electra k€	3.334	3.128	3.487	3.193	2.960	3.324
expl. Lasten incl electra k€	3.510	3.444	3.809	3.147	3.113	3.483



Inclusief slibontwatering:

Systeem Slibgisting+SNB/SCWG Deelstroombehandeling DEMON/ANAMMOX? Slibontwatering?	Actief Slib Slibgisting nee ja	Actief Slib SCWG nee ja	Actief Slib SCWG ja ja	AB Slibgisting nee ja	AB SCWG nee ja	AB SCWG ja ja
Slib afgevoerd						
kg ds/d totaal afgevoerd naar eindverwerking	4.032	5.477	5.477	3.286	4.900	4.900
kg ds/d chemisch slib	930	922	922	670	668	668
kg ds/d org stof afgevoerd	1.861	3.297	3.297	1.522	3.133	3.133
asgehalte	54%	40%	40%	54%	36%	36%
HHV MJ/kg dos volgens Haskoning	19,9	22,7	22,7	19,9	24,6	24,6
afbraak dos in gisting	43%	0,0%	0,0%	51%	0,0%	0,0%
ds	25%	24%	24%	25%	24%	24%
volumestroom m3/d	16,1	22,8	22,8	13,1	20,4	20,4
energieverbruik zuivering (kWe)						
voorbehandeling	0,3	0,3	0,3	33,5	33,5	33,5
biologie	160,7	152,0	152,0	56,8	51,1	51,1
nabezinking	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
slibindikking	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
el energie slibgisting (kWe)	7,2	-	-	6,7	-	-
slibontwatering (kW)	13,4	18,3	18,3	11,0	16,3	16,3
overig	41,9	41,9	41,9	51,6	51,6	51,6
energie in chemicalien	53,0	56,0	56,0	51,5	55,1	55,1
Totaal input energie (kWe)	282,0	274,0	274,0	216,5	213,1	213,1
energie uit gisting (kWel)	119	0	0	144	0	0
aangenomen HHV slib (GJ/t dos)	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
energie in slib (kW HHV)	495	878	878	405	834	834
financieel waterlijn ex deelstroombeh						
Investering k€	32.950	31.150	31.700	31.480	29.970	30.525
kapitaalslasten	2.580	2.440	2.495	2.455	2.335	2.385
opbrengst gasmotor	141			170		
kosten inkoop electra	314	301	307	155	145	151
bedrijfsvoering incl energie	1.138	1.226	1.248	876	1.004	1.026
bedrijfsvoering excl energie	965	925	941	891	859	875
totaal exploitatiekosten k€	3.545	3.365	3.436	3.346	3.194	3.260
meerkosten ontwatering (k€)	211	237	242	153	234	229
Stikstofverwijdering						
investering DEMON 300 kg/d			2.264			2.264
exploitatiekosten incl kap. lasten			293			293
Financieel incl N verwijdering						
investering k€	32.950	31.150	33.964	31.480	29.970	32.789
expl. Lasten excl electra k€	3.545	3.365	3.729	3.346	3.194	3.553
expl. Lasten incl electra k€	3.718	3.666	4.036	3.331	3.339	3.704