

Demonstratie Vergassing van Zuiverings-slib in Superkritisch Water

SUPERSLUDGE

Fase 1 Ontwerp van de installatie



Ten geleide

De Nederlandse waterschappen werken hard aan het terugwinnen van energie en grondstoffen uit rioolwaterzuiveringen. Al bij de introductie van het concept van De Energiefabriek werd aangetoond dat afvalwater meer energie bevat dan nodig is om het te zuiveren. Nu al produceren Waterschappen 30% van hun energiebehoefte zelf, en zijn ze goed op weg om de doelstelling van 40% in 2020 te behalen ¹.

Al bij de introductie van De Energiefabriek is geconstateerd dat Superkritisch Vergassen hiervoor op langere termijn een effectieve oplossing kan zijn. Met deze technologie kan in één stap zuiveringsslib worden omgezet in een hoogwaardig gas en een nutriëntrijke stroom, zonder dat droging van het slib nodig is. Naast maximale energiebenutting zijn er volop kansen voor het terugwinnen van anorganische grondstoffen. Een voorstudie heeft aannemelijk gemaakt dat dit kan tegen concurrerende kosten.

Uit STOWA-onderzoek met proeven met vergassen van zuiveringsslib in een installatie in Karlsruhe blijkt dat het proces chemisch werkt, maar dat er technisch nog knelpunten opgelost moeten worden. De technologie bevindt zich in een relatief vroeg stadium van ontwikkeling voor het vergassen van zuiveringsslib.

Mede op basis van dit onderzoek is een ontwerp gemaakt voor een full scale installatie voor het superkritisch vergassen van slib en wordt een pilotinstallatie gebouwd, die in 2018 wordt beproefd met zuiveringsslib. Met het ontwerp kunnen een aantal problemen die in Karlsruhe zijn opgetreden worden ondervangen. Uit de ontwerpraming blijkt dat de investering binnen de bandbreedtes blijft die in de voorstudie zijn genoemd.

Van belang is dat het ontwerp gevalideerd wordt met experimenten. Na het beproeven van de pilotinstallatie moet worden bepaald of het concept verder wordt opgeschaald. Die opschaling moet vermoedelijk in stappen plaatsvinden, waarbij de productie eerst op demonstratieschaal wordt beproefd, waarna de stap naar een commerciële schaalgrootte gezet kan worden.

In Nederland worden meer initiatieven ontplooid met het superkritisch vergassen van organische stromen. Het is van belang om hier kennis van te nemen en waar mogelijk samen te werken om de hoge kosten van deze ontwikkeling te minimaliseren. Mogelijk ontstaan er in de toekomst ook nieuwe verwerkingsmodellen waarin verschillende organische stromen bij elkaar komen en Waterschappen met andere partners een gezamenlijke bijdrage kunnen leveren aan een duurzame gasvoorziening in Nederland.

De benodigde investeringen voor de opschaling zijn fors. De STOWA wil samenwerking binnen en buiten de Waterschapssector bevorderen om de kosten van de opschaling te verlagen, zodat we met elkaar deze veelbelovende ontwikkeling met beheersbare risico's verder kunnen verkennen.

Joost Buntsma,

Directeur STOWA

¹ Klimaatmonitor Waterschappen 2016

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de activiteiten en de resultaten van het project Supersludge fase 1. Het ontwerpen van een demonstratie-installatie voor de superkritieke vergassing van zuiveringsslib is hierin het belangrijkste onderdeel. Ook wordt in fase 1 een R&D plant gebouwd waarin de beoogde ontwerpkeuze op pilotschaal getest kan worden. Het testen zelf en de bouw van de demonstratie-installatie zijn onderdeel van Fase 2. De demonstratie-installatie is ontworpen om het slib voor 100.000 inwoners te verwerken.

In de periode 2008-2009 hebben vier waterschappen onder coördinatie van Waterschap Aa en Maas het idee van de Energiefabriek uitgewerkt, waarin de leidende gedachte is dat bij toepassing van efficiënte omzettingsprocessen, de chemische energie-inhoud van het influent voldoende is om een waterzuivering energieneutraal te bedrijven. Volgens het eindrapport van 'De Energiefabriek' kan superkritische vergassing op middellange termijn tot een substantiële reductie van de verwerkingskosten van zuiveringsslib leiden en daarbij nog een positief energie-effect hebben.

Daaropvolgend, in 2010, is op initiatief van Waterschap Aa en Maas, SNB en Procede een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar de status en het potentieel van superkritieke vergassing van zuiveringsslib en is een beoordeling uitgevoerd van de mogelijkheden om de superkritieke technologie daadwerkelijk te realiseren. Hierin werd het beeld van de Energiefabriek bevestigd, namelijk dat superkritische vergassing een bijdrage kan leveren aan een energie-efficiënte waterzuivering tegen mogelijk lagere kosten.

In het SUPERSLUDGE-project is een ontwerp gemaakt van een demonstratie installatie voor superkritische vergassing van zuiveringsslib voor een RWZI met een capaciteit van 100.000 VE. Daarbij is gebruik gemaakt van literatuuronderzoek, modelmatig werk en experimenteel onderzoek. Het ontwerp voldoet aan de eerder gestelde eisen voor kosteneffectieve en efficiënte verwerking van slib, waarbij nieuwe mogelijkheden ontstaan voor terugwinning van fosfaat en stikstof.

Bij superkritieke vergassing wordt het slib op hoge druk en temperatuur gebracht; in het SUPERSLUDGE-proces wordt een temperatuur van 650°C en een druk van 350 bar beoogd. Om de verpompbaarheid te verbeteren zal het in een voorverwarmingsvat worden voorverwarmd en continu geroerd, alvorens het via een voedingspomp in de hogedrukpomp op de procesdruk wordt gebracht. Vervolgens wordt het slib via een warmtewisselaar boven de kritische temperatuur gebracht (ca 400-500°C), zodat de zouten neerslaan en kunnen worden afgescheiden via een speciaal ontworpen systeem. Het resterende product wordt verder verwarmd tot de reactietemperatuur via warmtewisseling. Tenslotte wordt het slibmengsel in een verblijftijdreactor enige tijd op temperatuur gehouden, voordat het wordt afgekoeld waarbij het productgas en een CO₂-rijk gas vrijkomen.

De business case laat zien dat de verwachte investeringen en operationele kosten kunnen worden verantwoord ten opzichte van de besparingen in de waterlijn, de vermeden kosten van slibafvoer en de opwekking van energie mits de installatie op voldoende schaalgrootte wordt gebouwd en het vrijkomende gas wordt benut voor de opwekking van groen gas. De belangrijkste parameters in de business case zijn de operabiliteit van de plant, materiaal specificaties en de mogelijkheid om slib met een relatief hoge droge stofgehalte te kunnen verwerken.

Om de principes van het ontwerp te toetsen is een R&D-installatie gebouwd, welke in 2018 wordt bedreven in een experimenteel programma. De R&D plant gaat beter inzicht geven in de mogelijkheid om de gestelde prestatie-eisen te halen met het huidige ontwerp. Als de resultaten tevreden stellen kan worden besloten tot realisatie van een demonstratie-installatie op praktijkschaal.

Inhoudsopgave

Ten geleide	2
Samenvatting.....	3
1 Inleiding	6
1.1 Voorgeschiedenis en doelstelling.....	6
1.2 Principe van superkritische vergassing.....	6
1.3 Deelnemende partijen en financiering.....	7
1.4 Projectopbouw, wijzigingen en pilot onderzoek.....	8
2 Locatiekeuze en slibeigenschappen, inpassing in rwzi.....	10
2.1 Locatiekeuze en inpassing	10
2.2 Slibeigenschappen.....	12
2.3 Vergunningen	13
3 Procesontwerp vergassingsgedeelte.....	14
3.1 Voorbehandeling en op druk brengen	14
3.2 Energie-efficiënte opwarming	14
3.3 Drukaflaat.....	15
3.4 Zoutafscheiding	15
3.5 Gasbehandeling en - benutting	15
3.5.1 Eigenschappen van het productgas.....	16
3.5.2 Resulterende gasbehandelingsapparatuur	18
3.6 Gasanalyse.....	18
4 Resultaten van KIT onderzoek.....	20
4.1 Inleiding	20
4.2 LENA, VERENA en SUPERSLUDGE	20
4.3 Slibbehandeling en voeding	20
4.4 Optimaliseren van energieconversie en koolstofbalans	21
4.5 Zoutafscheiding en massabalansen.....	21
5 Nutriëntenterugwinning.....	22
5.1 Inleiding	22
5.2 Keuze voor stikstof	22
5.3 Keuze voor fosfaat:.....	23
6 Business case	24
7 Vervolgonderzoek	26
7.1 Inleiding	26

7.2	Bouw van de pilot installatie (fase 1B)	26
7.3	Vervolgonderzoek met de R&D plant (fase 2A)	26
7.3.1	Doelstellingen van het onderzoek met de R&D plant	26
7.3.2	Testprogramma R&D plant.....	27
7.3.3	Evaluatie resultaten fase 2A.....	27
7.4	Realisatie en bedrijven van een demonstratie-installatie (fase 2B).....	27
7.4.1	Doelstelling demonstratie-installatie (fase 2B)	27
7.4.2	Inhoudelijke aanpak	28
8	Conclusies.....	29
9	Referenties	30

1 Inleiding

1.1 Voorgeschiedenis en doelstelling

In de periode 2008-2009 hebben vier waterschappen onder coördinatie van Waterschap Aa en Maas het idee van de Energiefabriek uitgewerkt (1). De gedachte hierbij is dat bij toepassing van efficiënte omzettingsprocessen, de chemische energie-inhoud van het influent voldoende is om een waterzuivering energieneutraal te bedrijven. Van dit idee zijn drie varianten uitgewerkt op een basisvariant voor 100.000 vervuilingseenheden (VE). De studie liet zien dat er bij een typische zuivering van deze schaalgrootte ca. 1,6 MW aan chemische energie binnenkomt met het influent, waarvan ca 1 MW weer wordt afgevoerd met het slib. Efficiënte omzetting van het slib op locatie van de zuivering kan daarom bijdragen aan het energieneutraal maken van de zuivering. Als onderdeel van de meest ambitieuze variant is de optie van superkritische vergassing van slib opgenomen.

Volgens het eindrapport van 'De Energiefabriek' kan superkritische 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 onderzoekresultaten op laboratorium schaal en indicatieve informatie over kosten van vergelijkbare processen.

Daaropvolgend, in 2010, is op initiatief van Waterschap Aa en Maas, SNB en Procede een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar de status en het potentieel van superkritische vergassing van zuiveringsslib en is een beoordeling uitgevoerd van de mogelijkheden om de superkritische technologie daadwerkelijk te realiseren (2). Daarin zijn meerdere gesprekken gevoerd met ontwikkelaars van de technologie in binnen- en buitenland en is een financiële en energetische analyse gemaakt van de technologie. Hieruit bleek dat er geen doorslaggevende bezwaren zijn om de techniek daadwerkelijk op praktijkschaal te gaan bouwen, al werd een nader onderzoek aanbevolen met de bestaande pilotinstallatie van Karlsruhe Institute of Technology (KIT) om de uitgangspunten voor zuiveringsslib te valideren. Geconcludeerd werd dat de techniek de potentie heeft om tegen lagere kosten een hogere energieopbrengst te realiseren, met een beter perspectief op hergebruik van fosfaat en ammonium.

Op basis van gesprekken met ontwikkelaars van de technologie en de beschikbare literatuur is in deze haalbaarheidsstudie geconcludeerd dat het verantwoord is een demonstratie-installatie te gaan ontwikkelen en te realiseren. Ook zijn er een aantal specifieke onderzoeksvragen geformuleerd die beantwoord moeten worden om de techniek optimaal in de praktijk toe te passen. Deze hebben o.a. betrekking op reactiekinetiek, corrosiviteit, biomassa conversie en het gedrag van de mineralen. De uitdaging hierbij is samen te vatten als het verder brengen van de superkritische technologie naar een proces op praktijkschaal. Dit vergt ontwerpstudies naar te selecteren materialen en onderdelen die op de markt verkrijgbaar zijn, waarvan alle specificaties voor praktische, veilige toepassing bekend zijn en die een lange levensduur mogelijk maken.

Deze conclusies zijn de basis geweest voor dit project waarvan het doel is het ontwerp van een superkritische vergassingsinstallatie voor de verwerking van zuiveringsslib afkomstig van een rioolwaterzuivering (rwzi) van 100.000 VE. Uiteindelijk – nadat in een R&D-installatie het ontwerp zich bewezen heeft - moet de demonstratie-installatie daadwerkelijk worden gebouwd en bedreven.

1.2 Principe van superkritische vergassing.

Bij superkritische vergassing wordt een natte slurry met bijvoorbeeld 85% watergehalte in een reactor gebracht waarin zich een medium bevindt onder superkritische condities (meestal ca. 300 bar en 450 - 700 °C). In korte tijd wordt de organische stof omgezet in een energierijk gas dat

Deelnemer	Internetadres	Type*	Rol in project
Waterschap Aa en Maas	www.aaenmaas.nl	Grote onderneming	Eindgebruiker
Waterschap de Dommel	www.dommel.nl	Grote onderneming	Eindgebruiker
SNB bv	www.snb.nl	Middenbedrijf	Eindgebruiker, bedrijfsvoering
Procede Biomass bv	www.procede.nl	Klein bedrijf	R&D, procesontwerp
Glaesum/Electron	www.glaesum.nl	Middenbedrijf	Engineering, constructie

1.4 Projectopbouw, wijzigingen en pilot onderzoek

In de voorstudie (2) is een ontwikkelingstraject geschetst dat moet leiden tot een werkende installatie voor superkritische vergassing van zuiveringsslib. Hierin werd naast de gebruikelijke ontwerp- en bouwactiviteiten een onderzoek opgenomen uit te voeren met een bestaande pilot plant van het Karlsruhe Institute of Technology. Dit onderzoek diende de uitgangspunten voor het ontwerp te onderbouwen en te verifiëren. Dit onderzoek is uiteindelijk uitgevoerd als apart onderzoek buiten dit project, onder auspiciën van en gefinancierd door de STOWA (3; 4). Vanuit het SuperSludge project is het onderzoek wel nauwgezet gevolgd en is tussentijds input gegeven op de aanpak, om zoveel mogelijk bruikbare resultaten te genereren. In dit rapport is een evaluatie van de onderzoekresultaten opgenomen. Kennis en expertise van het KIT zijn tevens ingehuurd door het Supersludge consortium om het ontwerp van de Supersludge installatie te toetsen.

Op basis van het onderzoek is besloten een wijziging aan te brengen in de aanpak van het Supersludge project. Besloten is om niet direct van de ontwerpfase, fase 1, door te gaan naar de realisatiefase, fase 2, maar een daartussen een pilotinstallatie op kleinere schaal te bouwen en te bedrijven, ter validatie van de ontwikkelde concepten in Supersludge. Hiervoor is een deel van het projectbudget in dit Supersludge project vrijgemaakt. Deze R&D-installatie wordt momenteel gerealiseerd als onderdeel – in het vervolgfase 1b genoemd - van de ontwerpfase 1. De installatie is een belangrijk resultaat van dit project. Het daadwerkelijke testen van deze installatie wordt uitgevoerd als fase 2a van het realisatie traject, waarna het de bedoeling is om bij gebleken succes een installatie op praktijkschaal te realiseren (fase 2b).

De projectonderdelen van fase 1 waarvan in onderhavig rapport verslag wordt gedaan worden weergegeven in Tabel 1.1. De onderdelen 7 en 8, niet genoemd in de Tabel, betreffen de bouw en het bedrijven van de demoplant en maken nu onderdeel uit van Supersludge Fase 2.

Tabel 1.2 Projectonderdelen Supersludge fase 1

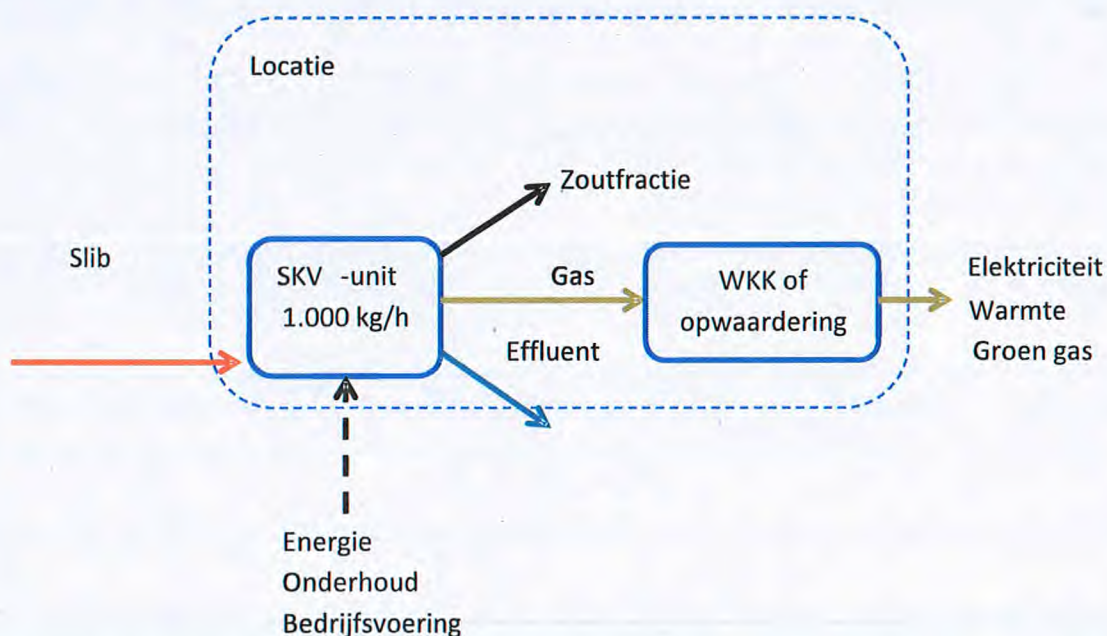
		Onderdeel
Fase 1A	WP1	Integratie in RWZI
	1.1	Slibkarakterisering
	1.2	Site selectie en technische specificatie
	1.3	Vergunningen
	1.4	Integratie Plant ontwerp en RWZI
	1.5	Evaluatie SCWG voor slibbehandeling
	WP 2	Gasbehandeling en nutriëntenterugwinning
	2.1	Gasbehandeling
	2.2	Terugwinning van ammoniak
	2.3	Terugwinning van fosfaat en andere mineralen
	WP 3	Warmteoverdracht en thermische integratie
	3.1	Literatuurstudie
	3.2	Modelleren en optimaliseren van de warmteoverdracht
	3.3	CFD-berekeningen m.b.t. zoutafscheiding in cycloon
	WP 4	Pilot operatie bij Karlsruhe Institute of Technology
	4.1	Consultancy KIT
	4.2	Uitwisseling informatie pilot-Supersludge
	WP 5	Basic design
	5.1	P&ID
	5.2	Definitie van Scope of Work
	5.2	Review materialen en hoofdelementen
	5.3	Geïntegreerd basic design met budget
	WP 6	Detailed design
	6.1	Maken van detailontwerp
	6.2	Gedetailleerde budgetgrootte
	6.3	HAZOP-studie
	WP 9	Kennisverspreiding
	9.1	Technische publicaties
	9.2	Workshops met waterschappen en andere doelgroepen
	9.3	Website
	9.4	Eindrapportage t.b.v. RVO
Fase 1b	Overig	Realisatie R&D plant
		Opstellen communicatie-strategie

De documenten waarin de werkwijzen en de resultaten van de verschillende projectonderdelen gedetailleerd worden beschreven zijn vertrouwelijk. Dit rapport geeft een openbare samenvatting van de resultaten.

2 Locatiekeuze en slibeigenschappen, inpassing in rwzi

2.1 Locatiekeuze en inpassing

Voor RWZI Oijen is onderzocht hoe een installatie voor superkritische vergassing van 1.000 kg/uur kan worden ingepast in onderstaande figuur is aangegeven welke aspecten komen kijken bij het integreren van een installatie voor superkritische vergassing op een rwzi. Deze worden hieronder kort toegelicht.



Figuur 2 Stromen van belang bij inpassing superkritische installatie op een rwzi

Aanvoer slib

Onderzocht is op welke manier aanvoer van slib naar de installatie mogelijk is met variabel drogestofgehalte. De huidige centrifuges op rwzi Oijen ontwateren het slib tot ongeveer 25% droge stof. Dit is vermoedelijk te hoog om rechtstreeks te verwerken in de installatie. Welk maximale drogestof gehalte door de superkritische installatie kan worden verwerkt is nog niet bekend maar het is voor de opstart bij een eerste installatie gewenst dat het gehalte flexibel kan worden ingesteld.

Verschillende varianten voor het verlagen van het drogestofgehalte zijn onderzocht:

- Opmengen met water of ingedikt slib
- Minder vergaand ontwateren.

Voor een eerste demonstratie-installatie lijkt het opmengen met water of ingedikt slib de beste optie, omdat hiermee eenvoudig verschillende drogestofgehaltes 'ingesteld' kunnen worden. Voor een doorontwikkelde installatie is minder vergaand ontwateren economisch gunstiger. Mogelijk kunnen hiermee ook besparingen in PE-verbruik en energiegebruik worden gerealiseerd.

Afvoer van effluent

Bij superkritische vergassing van zuiveringsslib komt een stikstofrijke effluentstroom vrij. Terugvoeren van dit effluent naar de rwzi lijkt voor een demonstratie-installatie de meest aangewezen optie. Onderzoek is nog wel nodig naar de mate waarin nitrificatieremming kan optreden.

Voor Oijen is een verdunningsfactor bepaald op basis van 0,33DWA, de verdunningsfactor is dan 600x voor de demonstratie-installatie en 200x indien alle slib wordt vergast. Hogere verdunningsfactoren zijn mogelijk indien effluent wordt gebufferd. In het KIT-onderzoek (STOWA) is 2 keer nitrificatieremming gemeten, waarbij één keer 100% remming bij een verdunning van 50x is gesignaleerd, en de andere keer 20% remming bij een verdunning van 10x (STOWA 2016-16). Het onderzoek met de R&D plant zal moeten uitwijzen of nitrificatieremming optreedt in de steady state en/ of bij dergelijke verdunningen.

Het effluent bevat hoge gehalten aan stikstof (met name ammonium). Bij volledige vergassing van slib voor rwzi Oijen is bepaald dat deze vracht gelijk is aan 28% van de influentvracht.

De mogelijkheden om stikstof te strippen zijn bekeken. Eerdere studies naar strippen van effluent (bijv. (5)) richten zich op rejectiewater, waarbij dit economisch niet aantrekkelijk is. Ten opzichte van rejectiewater is de effluentstroom veel geschikter vanwege de hoge temperatuur en zeer hoge concentraties aan stikstof, afhankelijk van het ingaande drogestofgehalte boven de 12 g/l. Daarbij is het nog de vraag in hoeverre pH-verhoging op kan treden door het vooraf strippen van CO₂, dat in relatief hoge concentraties aanwezig is in het effluent. Voorlopig heeft dit aspect in dit project geen prioriteit (zie hoofdstuk 5.2).

Afvoer van zoutfractie

Bij het proces wordt een zoutfractie afgescheiden die hoofdzakelijk uit minerale bestanddelen moet bestaan waaronder naast zouten ook de klei- en zanddeeltjes behoren. Vrijwel alle fosfaat wordt verwacht de zoutfractie. In de uiteindelijke situatie is afvoer naar een gespecialiseerde verwerker voor fosfaatterugwinning het meest gewenst. De samenstelling lijkt grofweg op de verbrandingsassen van zuiveringsslib. Ten opzichte van deze assen is voor fosfaatterugwinning een positief aspect dat deze geen hulpstoffen bevat die in een verbrandingsinstallatie worden gedoseerd, waardoor het fosfaatgehalte relatief iets hoger is. Een negatief aspect is dat er een gedeelte organische stof in de zouten kan zitten, wat invloed kan hebben op verdere verwerking.

Er zijn afspraken gemaakt met een verwerker om materiaal uit pilotproeven te analyseren op geschiktheid voor fosfaatterugwinning (zie ook hoofdstuk 5.3).

Benutting van gas

Mogelijkheden voor WKK, invoeding en transportbrandstof zijn bekeken. Voor een eerste demonstratieproject lijkt een WKK de meest aangewezen optie, omdat het gas niet standaard voldoet aan de eisen voor invoeding in het aardgasnet of als transportbrandstof. Met name het gehalte aan waterstof vormt hier een issue.

In de toekomst biedt dit wel mogelijke kansen vanwege de hoge druk van het gas. Daarnaast zijn voor elektriciteitsproductie diverse duurzame alternatieven aanwezig in de vorm van zon en wind, en zou deze technologie juist toegespitst kunnen worden op gasvoorziening.

Samenvatting en conclusie

Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de mogelijkheden in de tijd.

	R&D plant	Demonstratieplant	Uiteindelijke situatie
Aanvoer slib	Batches in een vat op kwaliteit brengen	Opmengen met water	Optimale afstelling ontwateringsinstallatie tot gewenst drogestofgehalte
Afvoer effluent	Batches opvangen in effluentvat, analyseren en gecontroleerd terugvoeren	Afh. van mate van nitrificatieremming terugvoer naar rwzi óf verdere verwerking	Terugwinnen stikstof uit effluent d.m.v. strippen.
Afvoer zouten	Analyse mogelijkheid fosfaatterugwinning Afvoeren met slib	Afvoer met slib óf naar verwerker voor fosfaatterugwinning	Afvoer naar verwerker voor fosfaatterugwinning
Benutting van gas	Beperkt	WKK	Invoeding in het aardgasnetwerk of transportbrandstof

Uit de analyse van de situatie op de rwzi Oijen bleek deze locatie niet direct geschikt als locatie voor een demonstratieplant voor superkritische vergassing. Het slib was vrij lastig aan te voeren vanuit de afgesloten bunker en er is geen gasinfrastructuur aanwezig. Voor een demonstratieplant is een rwzi met vergistingsinstallatie logischer. Bij Aa en Maas zouden rwzi Cuijk en s-Hertogenbosch in aanmerking komen.

Voor de R&D plant is de locatie minder van belang omdat hieraan vanuit elke zuivering/locatie slib kan worden aangeleverd en onderzocht. In verband met de beschikbaarheid van personeel is ervoor gekozen de R&D plant op rwzi Dinther te plaatsen.

2.2 Slibeigenschappen

Van de locaties van Aa en Maas zijn de slibeigenschappen bepaald. Daarnaast zijn de slibeigenschappen van rwzi Tilburg (De Dommel) bekeken. Hiervoor is gebruik gemaakt van de analysegegevens die bij Waterschap Aa en Maas en Waterschap De Dommel beschikbaar zijn.

Op een rwzi kunnen op hoofdlijnen 2 slibsoorten vrijkomen. Primair slib is het slib dat meegevoerd wordt met het rioolwater dat de rwzi binnenkomt en bezinkt in de voorbezinktank. Het secundaire slib is het biologische slib dat wordt verwijderd uit de actiefslibinstallatie middels de nabezinktank. Beide slibstromen worden geleid naar de slibindickers waar ze eventueel separaat kunnen worden ingedikt en ontwaterd.

De hoofdsamenstelling is weergegeven (asrest, P, N, CZV/ODS) (werkelijke gemiddelden 2016 in groen, meerjarige gemiddelden in zwart, kental in blauw).

RWZI	Slib	DS	As	Energie	N	P	Bijzonderheden
		%	% van DS	MJ/kg ODS*	Mg/kg DS	Mg/kg DS	
Aarle Rixtel	Ingedikt (gravitair)	3,1	24	18	65	28	Specifieke samenstelling 'gefinzeefd' slib wijkt mogelijk af, nog geen specifieke data.
	Ontwaterd	22					
Asten	Ingedikt (bandindikker)	5,5	25	18			
	Uitgegist	3,8	35	15			
Dinther	Ontwaterd	22	32	18	62	52	Fosfaat hoog door industriële lozing. Geen indikker aanwezig, spuislib wordt direct ontwaterd.
Vinkel	Ingedikt	3	22	18			
Oijen	Primair	Ingedikt: 4 Ontwaterd: 25	18,5**	22,7	56**	24,5**	Sliblijn wordt in 2017 gescheiden in een stroom primair en secundair slib. Er wordt een nieuwe centrifuge geplaatst
	Secundair			18			
's-Hertogenbosch							Exacte prestaties/ data nader te bepalen na renovatie. Impact door verwerking extern slib en hogere belasting voorbezinktanks.
Land van Cuijk	Ingedikt (trommel)	7,6	28	18			Heeft onlangs nieuwe WKK's gekregen, hiermee wordt ook stortgas van de naastgelegen stortplaats verwerkt.
	Uitgegist	5,5	36	15			
	Ontwaterd	23			58	30	

* Kental primair slib CZV / ODS = 1,8 kg/kg, secundair slib CZV/ ODS = 1,4 kg/kg, uitgegist slib CZV/ODS = 1,2 kg CZV/kg ODS

** alleen gegevens mengsel primair/secundair slib bekend. Asgehalte is waarschijnlijk lager in primair slib en hoger in secundair slib Oijen.

Naast de hoofdsamenstelling is gekeken naar het aandeel zand in de asrest, hiernaar is eerder onderzoek geweest bij De Dommel en is ongeveer 50% van de totale asrest. Dit aandeel is enerzijds relevant voor slijtage en anderzijds mogelijk voor verstoppingen. Het zand biedt een groot oppervlakte ten opzichte van de wandoppervlakte van de warmtewisselaar waarop eventueel stoffen kunnen neerslaan.

2.3 Vergunningen

Uit het vergunningenonderzoek blijkt dat, bij gasbenutting in een WKK-installatie, met name de emissies naar de lucht een belangrijk aandachtspunt zijn. In het kader van vergunningverlening is daarom vooral gekeken naar de emissie-eisen van het Activiteitenbesluit, wat input is voor de gasbehandeling (zie paragraaf 3.5.1 voor een beschrijving van deze eisen).

Daarnaast is een gesprek gevoerd met bevoegd gezag over het uitvoeren van het onderzoek met de R&D plant. Op grond hiervan is een vergunning voor het uitvoeren proefnemingen aangevraagd. (Deze aanvraag geldt ook voor het doen van andere onderzoeken op de rwzi). Voor het uitvoeren van de beoogde proefnemingen moet worden aangegeven welke mogelijke veranderingen er kunnen optreden in de emissies naar de omgeving van bijvoorbeeld geur en geluid. De aspecten geur en geluid spelen een kleinere rol bij de vergunningverlening, dit zijn wel aandachtspunten naar de omgeving.

3 Procesontwerp vergassingsgedeelte

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de uitgangspunten voor het basis procesontwerp. Daarbij wordt aandacht besteed aan verschillende onderdelen van het proces, waaronder het op druk brengen en het verwarmen van het slib, alsmede het behandelen van het geproduceerde gas. Tijdens de fase van detailengineering is de installatie verder uitgewerkt in een P&ID, die (door middel van een zogenaamde HAZOP) is getoetst op veilige bedrijfsvoering.

3.1 Voorbehandeling en op druk brengen

Een belangrijke uitdaging in het SUPERSLUDGE-procesontwerp betreft het verpompen van slib met een zo hoog mogelijk droge stofgehalte door de installatie, tot een werkdruk van 350 bar. Om het benodigde inzicht te krijgen in de stromingseigenschappen van het slib is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de reologische eigenschappen van slib. Deze literatuurstudie geeft een overzicht van relevante experimenten en modeldata die zijn gebruikt om het procesontwerp te optimaliseren.

De actuele reologische eigenschappen worden sterk beïnvloed door het specifieke type slib en zijn bijvoorbeeld afhankelijk van dichtheid, vaste stofgehalte en samenstelling, deeltjesgrootte en -verdeling, bezinkingseigenschappen, brosheid, geleidbaarheden, pH etc. Goede kennis betreffende de specifieke slibsoort is daarom van belang. In het bijzonder een goed inzicht in de thixotrope eigenschappen is cruciaal om te komen tot een efficiënte roer- en mengstap bij de voorbehandeling.

Het startup gedrag van slib is gecompliceerd en hangt bijvoorbeeld af van de vloeigrens en de tijdsafhankelijke stromingseigenschappen. Het vertoonde gedrag is sterk afhankelijk van pomptype en leiding waardoor het transport plaats vindt. Over de exacte invloed van de temperatuur op de eigenschappen van slib zijn helaas geen gedetailleerde gegevens beschikbaar, behalve dat verwarmen de viscositeit verlaagt en dus in principe positief uitwerkt.

Op grond van het onderzoek is beoogd een voorbehandelingsstelsel toe te passen waarin enerzijds de vloeigrens wordt overschreden en anderzijds gedurende langere tijd voldoende afschuifspanning wordt bereikt om een goede verpompbaarheid te verkrijgen. Zones zonder doorstroming moeten daarbij worden voorkomen. Omdat de werking hiervan afhankelijk is van de specifieke slibsoort wordt deze voorbehandelingsstap getest voorafgaand aan de realisatie van de superkritische installatie. Verwacht wordt dat deze test ook belangrijke aanvullende informatie over het gedrag van het zuiverings-slib oplevert.

3.2 Energie-efficiënte opwarming

Er is ca. 1 MW aan warmte nodig om 1000 kg/h aan slib op te warmen van 10°C naar ca. 700 °C bij een druk van 350 bar. Al in de voorstudie van het SUPERSLUDGE-project blijkt dat het voor een bedrijfseconomisch rendabele bedrijfsvoering van groot belang is dat een proces wordt ontworpen met een hoge mate van warmteterugwinning (>95%) en daardoor een laag eigen energieverbruik (<50 kW), naast een acceptabele investering. Een zo efficiënt mogelijke warmteuitwisseling staat echter in tegenstelling tot kleinere, goedkopere warmtewisselaars, welke met een lage drukval en hoge opwarmingsnelheid slib kunnen opwarmen. Om een uit kosten oogpunt zo optimaal thermodynamisch ontwerp toe te passen, is een gedetailleerde simulatietool ontwikkeld en toegepast, waarmee de invloed van de gewenste procescondities op de warmteoverdracht en de grootte van de warmtewisselaars en de opwarmingsnelheid kon worden geëvalueerd. Als resultaat van dit onderzoek is een procesontwerp gemaakt dat voldoet aan de gestelde ontwerpeisen ten aanzien van investering en opwarmingsnelheden. Tijdens dit opwarmtraject kan op flexibele wijze een zoutafscheider ingezet worden voor de afvoer van gevormde neerslagen en zanddeeltjes.

3.3 Drukaflaat

De werkdruk in de verschillende componenten van het vergassingsproces bedraagt maximaal 350 bar. Idealiter wordt de druk na afloop van een experiment/run langzaam op een gecontroleerde wijze afgelaten. In een noodsituatie kan het echter nodig zijn dat de installatie snel (en toch veilig) naar atmosferische condities wordt gebracht. In de praktijk wordt een dergelijke snelle drukaflaat ook wel 'blowdown' genoemd. In SUPERSLUDGE is apart aandacht besteed aan het ontwerp van veiligheidsvoorzieningen voor een veilige drukaflaat omdat de thermodynamica en daarmee de stromingsverschijnselen onder superkritische omstandigheden speciale aandacht vereisen.

In het ontwerp wordt uitgegaan van de toepassing van overdrukventielen en breekplaten op gevoelige plaatsen in de installatie (bijvoorbeeld aan de ingang van een warmtewisselaarsectie welke kan blokkeren), waarna het medium door een buisvormige drukaflaat wordt geleid naar een 'waste vessel' waar het wordt verzameld. De dimensionering van de buisvormige drukaflaat is van essentieel belang omdat deze bepaalt hoe snel de druk veilig kan worden afgelaten. Berekeningen zijn uitgevoerd met als startpunt een gasmengsel dat representatief is voor een stabiele, stationair opererende installatie. Op basis hiervan zijn kritieke snelheden en pijpdiameters zijn bepaald als de druk snel wegvalt.

3.4 Zoutafscheiding

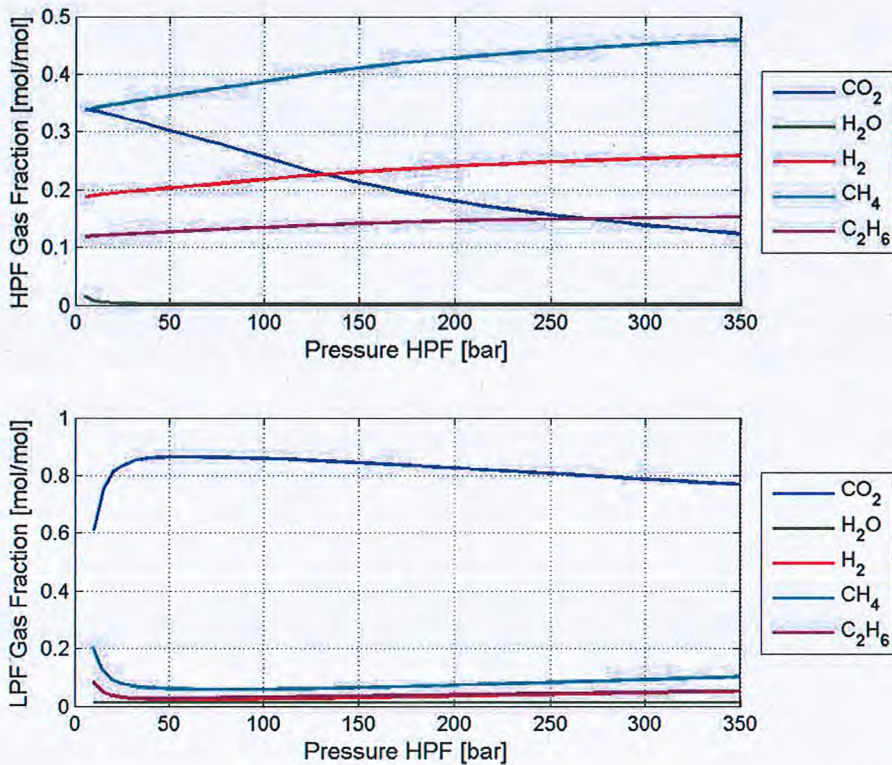
Voor het verwijderen van anorganisch materiaal uit het proces wordt gebruik gemaakt van een speciaal ontworpen cycloon. Hiervoor zijn CFD-berekeningen uitgevoerd om de effectiviteit voor verschillende bedrijfstoestanden te optimaliseren.

De zoutfractie moet met een minimaal volume worden afgevoerd omdat hiermee ook nog niet omgezet organisch materiaal verdwijnt. Dit verlies moet zo veel mogelijk worden beperkt, enerzijds om zo veel mogelijk organisch materiaal beschikbaar te hebben voor vergassing en anderzijds omdat organisch materiaal in de zoutfractie de afzet hiervan kan bemoeilijken.

Om de zoutfractie gecontroleerd af te voeren uit het proces, wordt gebruik gemaakt van een speciaal ontwikkeld systeem waarbij gecontroleerde hoeveelheden met beperkte snelheden worden afgevoerd. Door de lage snelheid wordt erosie in bijvoorbeeld kleppen tegengegaan, terwijl bovendien het verlies aan in vloeistof opgeloste organische stof tot een minimum wordt beperkt.

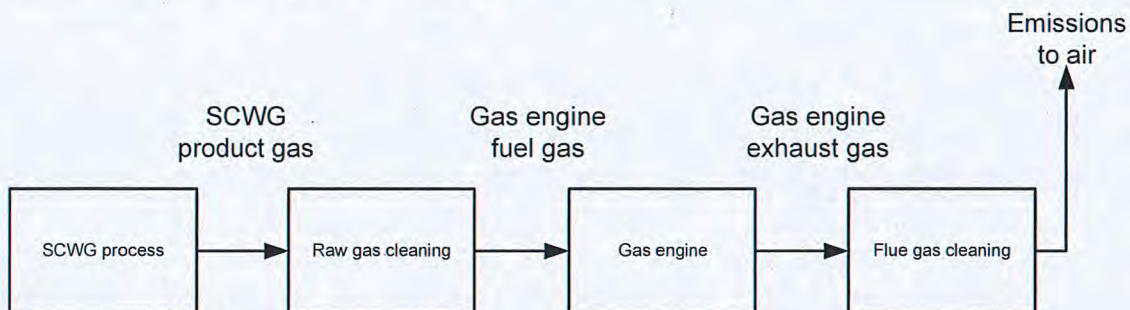
3.5 Gasbehandeling en - benutting

Tijdens het vergassingsproces wordt organische stof omgezet in een brandbaar gas, dat na afkoeling onder druk nog opgelost is in het meekomende water. Door stapsgewijs het vloeistof/gasmengsel te flashen van 350 bar naar 5 bar, is het mogelijk om eerst het brandbare gasmengsel (het productgas) af te vangen, en vervolgens een CO₂-rijke gasstroom. Procédé beschikt over uitvoerige evenwichtsmodellen om de oplosbaarheid en gassamenstelling bij verschillende condities uit te rekenen. Aan de hand hiervan is in een aparte deelstudie de invloed van de temperatuur en druk van het flashen op de gassamenstelling van zowel de hoge als lage druktrap bepaald. Het doel daarbij is om enerzijds een brandbaar productgas te maken met daarin een zo laag mogelijk CO₂-gehalte, terwijl er daarnaast een CO₂-rijk gas ontstaat (dat wordt afgelaten) met zo weinig mogelijk brandbaar gas. Zie hieronder voor de resultaten van de invloed van de gekozen druk in het hogedruk flash vessel op de gassamenstelling uit de hoge- en lage drukken.



Figuur 3.1 Invloed van de druk in de hogedruk flash op de gassenstelling uit de hoge en lage druk flash vessels (op basis van interne evenwichtsmodellen van Procede).

Vervolgens is in een andere deelstudie en in samenwerking met een leverancier van gasmotoren onderzocht in hoeverre het productgas direct kan worden ingezet in een gasmotor, en in hoeverre het noodzakelijk zal zijn om de verwachte emissies uit de gasmotor te beperken om te voldoen aan geldende emissieregeling (in een installatie voor verbranding van afval < 20 MW onder het Activiteitenbesluit, zie Tabel 3.2). Daarbij kan gasbehandeling zowel voor als na de gasmotor worden uitgevoerd, zoals weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Schematische weergave van de gasbehandeling na vergassing

3.5.1 Eigenschappen van het productgas

De typische samenstelling van het productgas (incl. CO₂) zoals is gemeten tijdens vergassingsexperimenten door KIT met slib uit Oijen is weergegeven in Tabel 3.1. Uit de massabalans volgt dat voor een typische evenwichtssituatie met 1000 kg/h input, er 150 Nm³/h wordt gevormd.

Tabel 3.1 Typische gassamenstelling als gemiddelde van de experimenten met de LENA-opstelling bij KIT met Oijen slib (vol% op droge basis bij 5 Bar, 90°C)

H ₂	19%
CO	1.2%
CO ₂	33%
CH ₄	33%
C ₂ H ₄	0.4%
C ₂ H ₆	11%
C ₃ H ₆	0.1%
C ₃ H ₈	0.1%
H ₂ S	0.1%
NH ₃	<0.0001%
Hg	0.006 mg/m ³

De hoofdcomponenten in het gas zijn waterstof, CO₂, methaan en ethaan. Daarnaast zijn er een aantal alkanen en alkenen aanwezig. Er kan worden aangetoond dat het gas met bovenstaande samenstelling een HHV en Wobbe index heeft van 25 MJ/m³ en een methaangetal van 54. Hoewel de H₂ concentratie aan de hoge kant is, is het nog steeds acceptabel. Het is niet nodig om CO₂ te verwijderen uit het gas om het direct in een gasmotor te stoken.

Een ongewenste component in het gas is H₂S (dit leidt tot SO₂ uitstoot en verzuring van de smeerolie in de gasmotor). Voor de geselecteerde gasmotor geldt een maximum H₂S niveau van 4 ppm in het brandstofgas, wat betekent dat 99.6% van de H₂S moet worden verwijderd. Door dit te doen, resulteert een SO₂ uitstoot van maximaal 1 mg/m³ @ 11%O₂, wat aanzienlijk lager is dan de verwachte emissiegrenswaarde van 40 mg/m³, (zie Tabel 3.2).

De concentraties ammonia in het productgas zijn erg laag en irrelevant voor de NO_x uitstoot uit de gasmotor (NO_x uitstoot wordt vooral bepaald door thermische NO_x). De geselecteerde gasmotor heeft een NO_x uitstoot van 500 mg/m³ @ 5% O₂ (312 mg/m³ @ 11% O₂).

De CO-concentratie in het gas bedraagt ca. 1.2%. Alhoewel dit deels wordt vernietigd in de gasmotor, wordt er ook weer aanvullend CO gevormd tijdens de verbranding in de gasmotor door onvolledige verbranding van andere koolwaterstoffen. Een leverancier van gasmotoren garandeert een CO-uitstoot van 1000 mg/m³ @ 5% O₂ (625 mg/m³ @ 11% O₂).

Bij het vergelijken van de verwachte uitstoot van CO en NO_x met de emissiegrenswaarden, blijkt dat zowel CO als NO_x dienen te worden gereduceerd met 95% resp. 42%. Dit kan worden gedaan door toepassing van een oxidatieve katalysator (zoals gebruikelijk bij gasmotoren in bijvoorbeeld de glastuinbouw).

Tenslotte dient ook de concentratie aan siloxanen in het productgas zo laag mogelijk te zijn. Een leverancier houdt een limiet aan van 10 mg/m³. Siloxanen zijn helaas niet gemeten tijdens de experimenten bij KIT.

Andere mogelijke probleemcomponenten waarnaar nader moet worden gekeken i.v.m. de opgelegde emissie-eisen zijn stof, ammoniak, VOC's, HCl, HF, zware metalen en dioxinen/furanen. Hiervan zijn echter geen significante hoeveelheden aangetroffen in het productgas tijdens experimenten met de LENA en VERENA-vergassers. De hypothese dat deze componenten vrijwel

volledig worden verwijderd met de zoutfractie en de waterfractie, zal worden getoetst tijdens aanvullende experimenten op pilot schaal met de R&D plant (zie hoofdstuk 7.3)

Tabel 3.2 Emissie-eisen voor afvalverbranding < 20 MW volgens het Activiteitenbesluit

	mg/Nm ³ @11% O ₂	Tijdgemiddelde
Totaalstof	5	30 min en dagelijks
Gasvormige en vluchtige organische koolwaterstoffen, uitgedrukt als total organic carbon	10	30 min en dagelijks
HCl	8	30 min en dagelijks
HF	1	30 min en dagelijks
SO ₂	40	30 min en dagelijks
NO _x	180	30 min en dagelijks
CO	30	Dagelijks
	150	10 min
Hg	0.05	Dagelijks
Som van Cd, Tl	0.05	Dagelijks
Som van Sb, As, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni, V	0.5	Dagelijks
Som van dioxinen en furanen	0.1 ng/Nm ³	Dagelijks

3.5.2 Resulterende gasbehandelingsapparatuur

Geconcludeerd wordt dat de belangrijkste noodzaak tot gasbehandeling zit in het verwijderen van H₂S vóór de gasmotor, en CO en NO_x na de gasmotor. Mogelijk is het ook nodig om siloxanen, onverbrande koolwaterstoffen en een aantal zware metalen af te vangen, maar dit moet worden onderzocht tijdens de experimenten met de geplande R&D plant.

Verwacht wordt dat de concentraties aan zware metalen, stof, HCl, HF en dioxines in het productgas door verwijdering met de zoutfractie en de waterfractie voldoende laag zijn om acceptabele rookgasemissies te krijgen; dit zal worden onderzocht tijdens experimenten met de geplande R&D plant. Voorlopig wordt voor de verwijdering van H₂S, kwik en siloxanen uitgegaan van een kolom met actieve kool. Indien noodzakelijk kan deze bovendien de concentratie zware metalen en dioxinen verlagen. De kolom is gedimensioneerd op 1 m hoogte en 0,5 m diameter, en is gemaakt van roestvast staal. De consumptie aan actieve kool bedraagt 0,39 kg/h. Na de gasmotor is verwijdering van NO_x en CO noodzakelijk.

3.6 Gasanalyse

Voor de analyse van productgassen zijn verschillende technieken onderzocht op kosten en mogelijkheden. Uiteindelijk is gekozen voor een industriële gaschromatograaf welke alle belangrijke gascomponenten (CO, CO₂, CH₄ en andere alkenen en alkanen tot C₃ en H₂S) in twee kanalen kan meten, alsmede een online bepaling van stookwaarde en Wobbe index kan weergeven. Dit is nodig om tijdens de bedrijfsvoering de operationele prestaties te kunnen volgen en waarborgen.

De bereiken voor de GC zijn weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Meetbereik van de gekozen GCMS van ABB

Component	Meetbereik (% vol)
N ₂	0.1-100 %
CO ₂	0.1-100 %
CH ₄	0.05-100 %
C ₂ H ₆	0.1-100 %
C ₃ H ₈	0.05-100 %
H ₂ S	0.01-0.12 %
O ₂	0.2- 20.0 %
CO	0.2 -100 %
H ₂	0.5-100 %
C ₂ H ₄	0.1-100 %

Voor het meten van sporenelementen als siloxanen, kwik, zware metalen, dioxinen e.d. zal regulier een gasmonster worden genomen voor externe analyse door gespecialiseerde laboratoria.

4 Resultaten van KIT onderzoek

4.1 Inleiding

Belangrijke input voor het procesontwerp in SUPERSLUDGE is verkregen door het uitvoeren van vergassingsexperimenten bij KIT met zuiveringsslib (4). De inzichten welke hierbij zijn opgedaan dragen samen met hun kennis en ervaring bij aan een optimaal procesontwerp.

Dit hoofdstuk geeft een beknopte weergave van de behaalde resultaten van KIT en de consequenties voor het procesontwerp binnen Supersludge. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de rapportage van KIT zelf (4) en het eindrapport door opdrachtgever STOWA. Het STOWA-eindrapport (3) geeft naast een interpretatie van de resultaten van KIT ook een eigen analyse van de consequenties en van de haalbaarheid van superkritische vergassing van slib in de praktijk.

Het zwaartepunt bij de uitgevoerde experimenten lag op het verkrijgen van inzicht in de conversiegraad, het laat echter een aantal vragen open rondom de kwaliteit en samenstelling van effluent en productgas, zoals nitrificatieremming door het effluent, concentraties aan H₂S en teren in het productgas en corrosieaspecten.

4.2 LENA, VERENA en SUPERSLUDGE

Het procesontwerp van SUPERSLUDGE komt op hoofdlijnen overeen met dat van de VERENA plant in Karlsruhe. Dit ligt voor de hand omdat beide installaties (VERENA in mindere mate) zijn geoptimaliseerd naar energetische prestaties en operationele duurzaamheid op de langere termijn. Al uit de voorstudie is gebleken dat een hoog energierendement en betrouwbaarheid essentieel zijn voor een rendabele bedrijfsvoering. De hoofdcomponenten van beide processen betreffen de warmtewisselaars, de zoutafscheiding, de reactor, de fasescheiding, overdrukveiligheden en een fakkelsysteem.

In eerder onderzoek is er bij de VERENA plant belangrijke ervaring opgedaan met verschillende modelvoedingen alsmede enkele biomassatypen. Om ook met zuiveringsslib ervaring op te doen en gevoel te krijgen voor de optimale procesomstandigheden, heeft KIT eerst op kleinere schaal proeven gedaan met de LENA-opstelling, alvorens verder te gaan met experimenten in de VERENA plant.

De resultaten van de VERENA plant hebben ertoe geleid dat er in het Supersludge ontwerp belangrijke aanpassingen zijn aangebracht. Deze hebben bijvoorbeeld betrekking op de afvoer van de zoutfractie en het invoersysteem van het slib naar de plant en de slibvoorbehandeling.

4.3 Slibbehandeling en voeding

Een van de redenen waarom het droge stofgehalte bij de experimenten met de VERENA plant relatief laag is gehouden, is dat er nauwelijks voorbehandeling plaatsvindt, terwijl er wel risico's zijn op mechanische problemen en problemen met (over)druk in kleppen etc. PROCEDURE heeft de reologische eigenschappen van slib en de consequenties hiervan op het procesontwerp nader bestudeerd. Op grond van deze overwegingen is (als al gemeld in 3.2) besloten in het Supersludge proces een voorbehandelingsstap in te bouwen. Deze moet ertoe leiden dat slib met een drogestofgehalte hoger dan 15 % verwerkt kan worden. Omdat de werking hiervan afhankelijk is van de specifieke slibsoort wordt deze voorbehandelingsstap getest voorafgaand aan de realisatie van de superkritische installatie. Verwacht wordt dat deze test ook belangrijke aanvullende informatie over het gedrag van het zuiveringsslib oplevert.

4.4 Optimaliseren van energieconversie en koolstofbalans

Ten opzichte van het KIT-proces zijn in het Supersludge ontwerp enkele wijzigingen doorgevoerd die moeten leiden tot een verbeterde conversie van organisch materiaal naar gas.

Uit thermodynamische analyses van Procede blijkt dat een hogere procesdruk leidt tot een hogere Cp waarde, waardoor warmte-uitwisseling makkelijker is en hogere opwarmnelheden kunnen worden gehaald. Dit resulteert naar verwachting in een verminderde teervorming, naast een verbeterde warmteoverdracht.

Ten opzichte van de uitgevoerde experimenten bij KIT zal in de experimenten daarom een hogere procestemperatuur worden gehanteerd, waardoor de conversie verder wordt verbeterd.

Bij de experimenten bij KIT is een relatief eenvoudige wijze van zoutafscheiding toegepast. Door het optimaliseren van de geometrie wordt verwacht een aanzienlijk betere scheiding te krijgen tussen de vaste en opgeloste fracties, waardoor het verlies aan organisch materiaal door het afscheiden van de zoutfractie geminimaliseerd wordt. Verder zal een zorgvuldige dimensionering van leidingen bijdragen aan een minimale ongewenste afzetting van zowel anorganisch als organische stof.

4.5 Zoutafscheiding en massabalansen

Een belangrijk operationeel probleem tijdens het uitvoeren van experimenten met de VERENA plant is het doorlaten van anorganisch materiaal door de cycloon. Een substantiële fractie van de aanwezige zouten blijkt niet te worden afgescheiden waardoor er afzettingen en corrosie optreden bij de nageschakelde procescomponenten. Tegelijkertijd werd met de aanwezige cycloon ook organische stof afgescheiden waardoor de Cold Gas Efficiency beperkt was. Mede hierdoor zullen de massabalansen bij de VERENA-experimenten niet goed sluitend zijn. Anderzijds zijn de gemeten conversies beter als minder zouten zijn afgescheiden zoals bij slib van Oijen. Dit kan het gevolg zijn van minder organische stof verlies via de zoutafscheiding, maar zou ook een katalytisch effect kunnen zijn.

Door het verbeteren van het ontwerp voor de zoutverwijdering kan de concentratie aan anorganisch materiaal na de zoutverwijdering worden beperkt. In combinatie met lagere teervorming en betere hydrodynamica moeten problemen met corrosie en afzettingen tot een acceptabel niveau worden beperkt, waarbij ook de massabalansen beter zullen sluiten. Door toepassing van reversibele warmtewisselaars wordt bovendien de mogelijkheid gecreëerd om ontstane afzettingen vóór de cycloon te verwijderen door het betreffende temperatuurdeel aan subkritische condities bloot te stellen.

Een speciaal ontworpen meet- en regelsysteem is bedoeld om de zoutafscheiding te optimaliseren, waardoor het verlies aan organisch materiaal via de zoutfractie beperkt wordt. Afscheiding van anorganische stof uit het systeem vindt bovendien plaats bij minimale drukverschillen om erosie tegen te gaan.

5 Nutriëntenterugwinning

5.1 Inleiding

Bij het Supersludge proces worden de meeste mineralen waaronder fosfaat in vaste vorm afgescheiden. Stikstof gebonden in de te behandelen slibvoeding in de vorm van bijvoorbeeld ammonium of eiwitten komt in ammoniumvorm vrij opgelost in het restwater. Eén van de neven doelstellingen van het Supersludge initiatief is een opzet ontwikkelen die het hergebruik van fosfaat en stikstof (in de vorm van ammonium) mogelijk maakt. Hiervoor is een studie uitgevoerd waarin de technische mogelijkheden voor de terugwinning zijn geïnventariseerd en waarin de geschiktheid van deze technieken voor de Supersludge technologie is beoordeeld. Het onderzoek resulteerde in aanbevelingen voor een praktische aanpak in het vervolgproject.

Voor de eerste demoplant Superkritische vergassing kunnen de reststromen waarschijnlijk nog naar de waterzuivering worden teruggevoerd of aan bestaande stromen worden toegevoegd die extern (SNB) worden behandeld. Bij commerciële toepassing van de technologie komen grotere hoeveelheden beschikbaar die alternatieve verwerkingsmogelijkheden noodzakelijk en/of aantrekkelijk kunnen maken.

Op grond van een literatuurstudie naar methodes voor terugwinning van ammonium en fosfaat wordt geconcludeerd dat voor de fosfaatterugwinning de meest aantrekkelijke route bestaat uit het nat chemisch uitloggen uit het vaste residu van het fosfaat gevolgd door het neerslaan van het fosfaat uit de oplossing.

Voor de terugwinning van ammonia komen in aanmerking het strippen van de ammoniak uit de waterstroom gevolgd door uitwassen van de ammoniak met zuur. Ook neerslagvorming van de ammoniak in de vorm van struviet is mogelijk. Hierbij is aanwezigheid van fosfaat noodzakelijk. Omdat een specifiek aspect van het Supersludge proces is dat stikstof en fosfaat gescheiden vrijkomen, en doordat de verhouding stikstof/ fosfaat niet hiervoor niet geschikt is, is de laatstgenoemde methode hier minder aantrekkelijk.

Op basis van een analyse in een STOWA-studie (5) van het energiegebruik van de terugwinningsmethoden voor ammonia is geconcludeerd dat bij de huidige stand van de techniek noch materiaalhergebruik noch energiebesparing een argument is dat sterk voor de terugwinning pleit.

Op grond van deze overwegingen wordt specifiek voor het Supersludge proces het volgende aanbevolen.

5.2 Keuze voor stikstof

Voor de R&D en de demo-plant wordt er vooralsnog voor gekozen om de stikstofhoudende waterstroom naar de RWZI terug te voeren. Uit berekeningen van het Waterschap Aa en Maas blijkt dat hier voor een demo-installatie voldoende COD aanwezig is (zie ook [2.1](#)). Onderzoek naar een mogelijke inhibitie door de organische verbindingen wordt daarbij uitgevoerd omdat hiervoor bij de reststroom uit de proeven in Karlsruhe aanwijzingen zijn gevonden.

Voor de langere termijn wordt terugwinning van ammoniak gevolgd door zure wassing voor de productie van ammoniumsulfaat als mogelijk aantrekkelijke optie gezien.

Experimenteel onderzoek naar het strippen van ammonia is dan noodzakelijk om vast te stellen wat de energie- en chemicaliënbehoefte van deze route zijn. Ook moet worden onderzocht op welke manier restwarmte van het Supersludge proces kan worden ingezet voor het stripproces.

Indien de haalbaarheid van de combinatie positief uitvalt zijn kan demonstratie van deze technologie op pilot schaal volgen. Ook is dan een onderzoek gewenst naar de aantrekkelijkheid van het product voor de markt.

5.3 Keuze voor fosfaat:

Fosfaat komt vrij als component in de zoutfractie van het proces. Met betrekking tot de terugwinning van fosfaat is vooralsnog aansluiting gezocht bij een al bestaande verwerker van fosfaathoudende reststoffen waar fosfaatterugwinning al in praktijk wordt gebracht.

De haalbaarheid van deze optie kan in eerste instantie eenvoudig worden beoordeeld door onderzoek uit te laten voeren aan een monster residu dat beschikbaar komt bij het bedrijven van de R&D-plant of de DEMO-plant.

Na inbedrijfstelling van de DEMO-plant wordt met de verwerker de constructie van een mobiele pilot plant overwogen die gedetailleerde ontwerpgegevens kan opleveren.

6 Business case

Dit hoofdstuk beschrijft de voorlopige business case voor superkritische vergassing van zuiveringslib, op basis van een studie door Royal HaskoningDHV op basis van eigen inzichten en die van de projectpartners in de kosten en de verwachte operationele prestaties. Met de business case wordt beoogd inzichtelijk te maken hoe de uiteindelijke commerciële haalbaarheid afhangt van verschillende procesparameters. Omdat de inzichten veranderen tijdens het nog lopende onderzoek, zijn ook de uitkomsten van de business case aan verandering onderhevig.

Een belangrijke basis voor de business casestudie vormen de investeringskosten. Voor de kale demonstratieplant zonder de gasbehandeling en benutting en nog niet geïntegreerd in een bestaande rwzi is de investering geraamd door Electron op 3,1-3,7 miljoen Euro voor een installatie van 1 m³ per uur aan slib met 17% ds. Voor de gasverwerking bij de demonstratieplant zijn twee alternatieven bekeken. Verbranding ervan in een gasmotor voor de productie van elektriciteit of opwerking tot aardgaskwaliteit en injectie van gas in het aardgasnet. Beide routes komen in aanmerking voor SDE-bijdragen maar uit de berekeningen blijkt dat groen gasproductie financieel veel aantrekkelijker is, zodat deze als uitgangspunt is gekozen. Een van de redenen die hieraan ten grondslag ligt, is dat het gas al op hoge druk beschikbaar is. Daarnaast zijn kosten in rekening gebracht voor aanpassingen op de rwzi ten behoeve van tussenopslag ed. Mogelijke besparingen op een rwzi, bijvoorbeeld door het uitsparen van een vergistingsinstallatie zijn niet in rekening gebracht. De totale investeringskosten worden geschat op 5,2-5,8 miljoen Euro voor een installatie met een capaciteit van 1 m³ per uur.

De investeringskosten voor de demonstratieplant zijn verder met behulp van schaalvergrotingsregels omgerekend naar investering voor meer realistische capaciteiten. Berekeningen zijn uitgevoerd voor capaciteiten van 1,5 m³/uur, 5 en 15 m³/uur. Bij een drogestofgehalte van 17 % passen deze capaciteiten bij een rwzi van respectievelijk 100.000, 330.000 en 1.000.000 v.e. De totale investeringskosten voor deze capaciteiten lopen uiteen tussen 7-21 miljoen Euro.

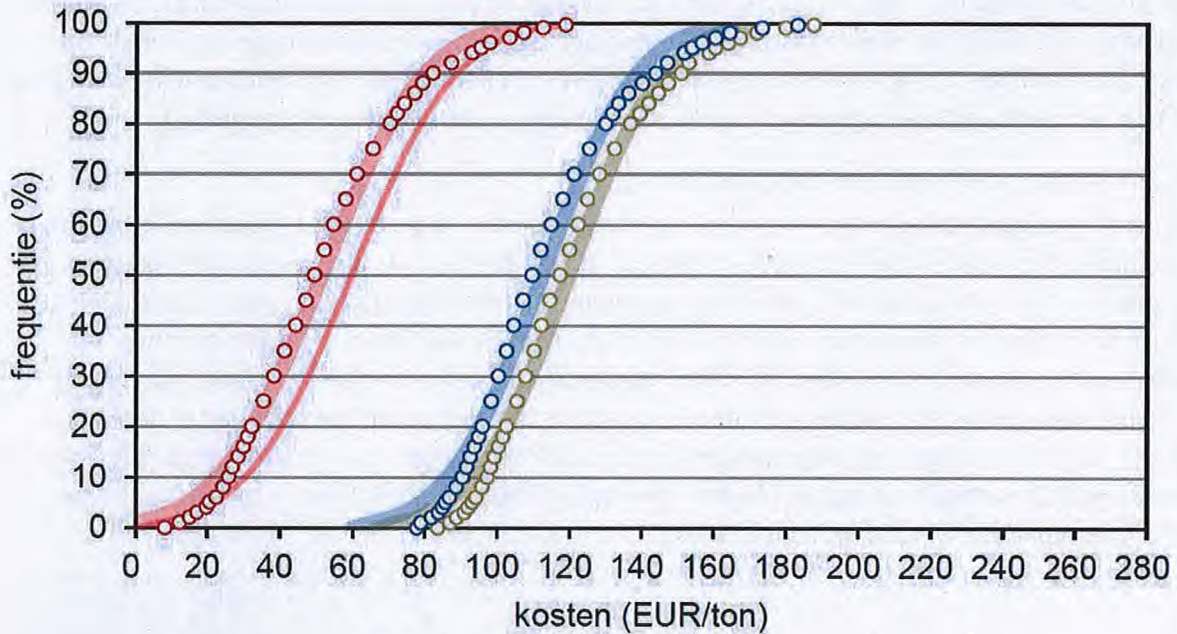
Uitgangspunt van de haalbaarheidsberekeningen is de commerciële toepassing van de technologie op een moment dat de technologie als ontwikkeld kan worden beschouwd, waardoor de lessen van de demonstratiefase en eerste praktijkervaringen zijn geïmplementeerd, bijvoorbeeld voor de tiende te bouwen installatie.

De resultaten zijn gebruikt om de gevoeligheid van de business case vast te stellen voor parameters die in de R&D-fase nader worden onderzocht. Belangrijke parameters in dit verband zijn bijvoorbeeld:

- Het drogestofgehalte van de invoer. De verwerkingscapaciteit van de organische stof is evenredig hiermee.
- Het rendement van de warmtewisseling. Het is van belang om netto een voldoende productie aan groen gas mogelijk te maken.
- Het rendement van de conversie van de organische stof naar energierijk gas. Eveneens is het van belang om netto voldoende gas te kunnen produceren, en om dezelfde reden:
- Het percentage organische stof in het slib.

Een voorbeeld van de uitgevoerde Monte Carlo analyses voor de kostprijs van verwerking met een installatie met een capaciteit van 15 m³/h is hieronder weergegeven. De rode lijn geeft de kostprijs voor slibverwerking aan met productie van groen gas (51 Euro/ton slibkoek gemiddeld), de blauwe

lijn met inzet van een gasmotor. De groene lijn geeft de verwachte kostprijs excl. subsidies weer. De actuele kosten voor de verwerking van zuiveringsslib liggen rond de € 80 per ton. Samengevat laat de analyse zien dat voor een rendabele business case het nodig is om de technologie toe te passen bij voldoende schaalgrootte, waarbij het vrijkomende gas wordt benut voor de productie van groen gas. De verwachte investeringen en operationele kosten kunnen dan worden verantwoord ten opzichte van de besparingen in de waterlijn, de vermeden kosten van slibafvoer en de opwekking van energie.



. De belangrijkste parameters in de business case zijn de operabiliteit van de plant, materiaal specificaties en de mogelijkheid om slib met een relatief hoge droge stofgehalte te kunnen verwerken.

Met het onderzoek met de R&D plant wordt beoogd de onzekerheden rondom de meest cruciale kostenbepalende factoren te verkleinen (zodat de frequentiecurves steiler verlopen).

7 Vervolgonderzoek

7.1 Inleiding

Het vervolg van het hier beschreven project SUPERSLUDGE 1 is SUPERSLUDGE 2.

SUPERSLUDGE 2 kent een fasering waarin beproeving en optimalisatie van de gebouwde R&D-plant (150 kg/uur, fase 2A) voorafgaat aan de beslissing voor verdere opschaling naar de beoogde demonstratie-installatie met een capaciteit van 1000 kg/uur (fase 2B). Deze R&D plant is ontworpen op basis van ontwerpstudies in fase 1 en de onderzoeksresultaten en ervaringen van het KIT op grond waarvan het nuttig is geoordeeld om de ontwerpideeën op kleinere schaal te testen. De plant is ook gebouwd als (later ingevoegd) onderdeel van fase 1 van het Supersludge project.

7.2 Bouw van de pilot installatie (fase 1B)

Om de uitgangspunten voor het ontwerp van een demonstratie-installatie te valideren is besloten een R&D-installatie te bouwen. Aanvankelijk was deze R&D-plant als tussenstap in de realisatie van een full-scale demonstratie-installatie niet opgenomen in de projectplannen voor Supersludge 1 en 2. Besloten is deze tussenstap toch door te voeren om meer duidelijkheid te krijgen over nog openstaande vragen rondom het optimale ontwerp van de demonstratie-installatie, zodat bij de uiteindelijke bouwkosten kunnen worden bespaard op basis van de lessons learned in deze tussenfase 2A. Hiertoe is een deel van het onderzoeksbudget onder SUPERSLUDGE 1 vrijgemaakt. De daadwerkelijke bedrijfsvoering zal plaatsvinden onder SUPERSLUDGE 2. De installatie heeft een beoogde capaciteit van 150 kg/h bij 17% ds.



Figuur 7.1 Artist impression van de geplande R&D-installatie met een capaciteit van 150 kg/h.

7.3 Vervolgonderzoek met de R&D plant (fase 2A)

Dit hoofdstuk beschrijft de doelstelling en de onderzoeksplannen voor de R&D plant (Fase 2A).

7.3.1 Doelstellingen van het onderzoek met de R&D plant

De algemene projectopdracht voor fase 2A betreft het bedienen van de SUPERSLUDGE R&D plant onder verschillende condities om hiermee voldoende vertrouwen te wekken voor opschaling naar een demonstratie-installatie.

De R&D plant moet aantonen dat met het ontwikkelde ontwerp aan de gewenste prestatie-eisen wordt voldaan, zoals geformuleerd in een Programma van Eisen. Dit PvE is vastgesteld op basis van mijlpalen uit het reeds genoemde STOWA-rapport (3). Op basis van beperkte trial and error experimenten met de pilot worden in 2018 verbeteringen aan de installatie doorgevoerd. De resultaten worden vervolgens doorvertaald naar een mogelijk enigszins aangepast ontwerp voor de demonstratie-installatie met grotere capaciteit, zodat deze energie-efficiënt, kosteneffectief en langdurig operabel wordt.

De projectfase 2a is daarmee gericht op het creëren van een solide business/value case (investeringsniveau $\pm 20\%$) voor de verwerking van het slib op een RWZI met acceptabele restproducten die buiten het project verwerkt gaan worden.

In fase 2a wordt beoogd het installatieontwerp te optimaliseren zodat een betrouwbare bedrijfsvoering mogelijk wordt tegen acceptabele kosten. Belangrijke procesparameters worden geïdentificeerd en het procesontwerp wordt geoptimaliseerd in procesmatige en bedrijfseconomische zin. Dit kan leiden tot verdere verbeteringen van de demonstratie-installatie in fase 2B;

7.3.2 Testprogramma R&D plant

Om de prestatie-eisen uit het PvE aan te tonen is een werkprogramma voor de R&D plant opgesteld met de volgende fasering:

1. Ingebruikstelling met slib en opgevoerd drogestofgehalte
2. Karakterisering en optimalisatie aan de hand van een serie experimenten
3. Duurtest om de lange termijn operabiliteit aan te tonen
4. Evaluatie en rapportage.

Elke fase geeft een antwoord op een of meer specifieke eisen uit het PvE. In totaal zijn er 31 testen geprognostiseerd voor de R&D plant.

7.3.3 Evaluatie resultaten fase 2A

Na afloop van Fase 2a zal worden besloten om al dan niet door te gaan naar Fase 2b waar de daadwerkelijke opschaling plaatsvinden. Input voor deze beslissing is een aangepast ontwerp voor de demonstratie-installatie op basis van inzichten uit fase 2a, een update van de business case en een nauwkeurigere omgevingscan m.b.t. alternatieven, risico's en kansen.

7.4 Realisatie en bedrijven van een demonstratie-installatie (fase 2B)

Na beproeving en optimalisatie van een R&D-plant (150 kg/uur, fase 2A) wordt een besluit genomen voor verdere opschaling naar de beoogde Demonstratie Installatie met een capaciteit van 1000 kg/uur (fase 2B).

7.4.1 Doelstelling demonstratie-installatie (fase 2B)

Het doel van deze fase 2B is een demonstratie-installatie te bouwen en te bedrijven voor de superkritische vergassing van slib van een afvalwaterzuiveringsinstallatie, teneinde de technische en economische haalbaarheid aan te tonen. De in SUPERSLUDGE 1 ontwikkelde blauwdruk wordt daarbij in de praktijk gebouwd en getest en twee jaar lang in bedrijf gehouden op een rwzi van Aa en Maas. Hierdoor ontstaat een realistisch beeld van de technische en economische haalbaarheid van decentrale slibverwerking door superkritische vergassing.

Ook na de lopende projecten SUPERSLUDGE en het STOWA-project bij KIT resteren nog een beperkt aantal onzekerheden in het exacte gedrag van slib bij hogere temperaturen qua conversiegraad, zoutgedrag, gassamenstelling e.d. Om hier mee om te gaan wordt voldoende flexibiliteit aangebracht

in het procesontwerp aangaande bedrijfsdruk, reactietemperatuur en de temperatuur waarbij zoutafscheiding plaatsvindt.

7.4.2 Inhoudelijke aanpak

Bij aanvang van het voorgestelde project is er al een volledige blauwdruk (detailed design) beschikbaar uit het nog lopende project SUPERSLUDGE, incl. HAZOP, specificatie van componenten en gedetailleerde kostenbegroting. In aansluiting op SUPERSLUDGE kan daarom in het demonstratieproject meteen worden begonnen met de realisatie. De volgende werkzaamheden zijn gepland:

1. Realisatie

Hier worden alle componenten besteld, vindt afnamecontrole plaats en wordt de installatie ter plekke geassembleerd. Dit bevat tevens de verplichte drukkeuring met Lloyds certificering.

2. Integratie in RWZI

De installatie moet worden geïntegreerd in een rwzi van Aa en Maas. Dit betreft bouwkundige werken, alsmede voorzieningen voor de toevoer van sludge, de afvoer van restwater en vrijkomend gas. Zoals in 2.1 geconcludeerd komt voor de demonstratiefase een rwzi met slibgisting als eerste in aanmerking.

3. In gebruik stelling

Na de realisatie wordt de installatie in bedrijf gesteld. Eerst wordt de werking van afzonderlijke componenten koud getest, vervolgens wordt de hele installatie eerst koud en vervolgens warm getest met water. Tenslotte wordt de installatie ook getest met slib. Wanneer blijkt dat bepaalde componenten niet naar verwachting functioneren, kunnen in deze fase nog kleine aanpassingen worden gemaakt. Wanneer dit succesvol is afgerond, wordt de installatie opgeleverd en worden operators getraind in de bedrijfsvoering.

4. Bedrijfsvoering

De installatie wordt gedurende 2 jaren bedreven door een combinatie van operators van Aa en Maas en SNB. Daarbij zal tevens een proefprogramma worden doorlopen waarbij verschillende analyses worden uitgevoerd, om de invloed van variërende procescondities en slibsamenstellingen te evalueren om zo het proces te optimaliseren. Indien nodig zullen ook in deze fase technische aanpassingen aan de installatie worden gemaakt.

5. Evaluatie

Er wordt een evaluatie uitgevoerd van de tijdens het project behaalde resultaten over de rol van superkritische vergassing voor slibverwerking. Dit leidt tevens tot aanpassing van het businessplan, waarvoor al een aanzet wordt gemaakt in het project SUPERSLUGE.

6. Disseminatie

De opgedane kennis in het project wordt gerapporteerd in een aantal openbare en vertrouwelijke rapportages en verspreid in vaktijdschriften, journals en op conferenties. Deze informatie wordt gedeeld op de al bestaande website onder de portal van De Energiefabriek. Er wordt een aparte website opgezet voor de technologie om potentiële eindgebruikers en andere stakeholders te informeren. Verder zal een commercialisatiestrategie worden opgezet om de technologie na succesvolle demonstratie te kunnen gaan vermarkten.

8 Conclusies

In het SUPERSLUDGE-project is een ontwerp gemaakt van een demonstratie-installatie voor superkritische vergassing van zuiveringsslib voor een RWZI met een capaciteit van 100.000 v.e. Daarbij is gebruik gemaakt van zowel literatuuronderzoek, modelmatig werk, engineering en experimenteel onderzoek. Het ontwerp voldoet aan de eerder gestelde eisen voor kosteneffectieve en efficiënte verwerking van zuiveringsslib, waarbij nieuwe mogelijkheden ontstaan voor terugwinning van fosfaat en stikstof.

Onderzoek uitgevoerd onder auspiciën van de STOWA met pilot plants bij het KIT heeft tekortkomingen laten zien in de daar gebruikte installatie die met name leidden tot talrijke verstoppingen. De resultaten hebben geleid tot tal van aanpassingen in het oorspronkelijke ontwerp gemaakt in Supersludge.

De business case laat zien dat de verwachte investeringen en operationele kosten kunnen worden verantwoord ten opzichte van de besparingen in de waterlijn, de vermeden kosten van slibafvoer en de opwekking van energie. De belangrijkste parameters in de business case zijn de operabiliteit van de plant, materiaal specificaties en de mogelijkheid om slib met een relatief hoog drogestofgehalte te kunnen verwerken.

Om de principes van het ontwerp te toetsen wordt momenteel een R&D-installatie gebouwd, welke in 2018 wordt bedreven in een experimenteel programma. De R&D plant moet beter inzicht gaan geven in de mogelijkheid om de gestelde prestatie-eisen te halen. Bij tevredenstellende resultaten zal worden besloten tot realisatie van een demonstratie-installatie op praktijkschaal. De bouw en het onderzoek zijn in het oorspronkelijke Supersludgeprogramma niet opgenomen.

9 Referenties

1. **Energiefabriek.** *Werkrapport De Energiefabriek.* sl : De Energiefabriek, 2009.
2. **Koppejan, J., Ten Asbroek, N.A.M., Zeevalkink, J.A.** *Procede Biomass. Voorstudie superkritieke vergasing van zuiveringslib.* 2011.
3. **Korving, L.** *Experimenteel onderzoek superkritisch vergassen van zuiveringslib (STOWA rapport 2016-16).*
4. **Herbig, S., Hauer, E., Boukis, N.** *Gasification of Dutch sewage sludge STOWA Project number DQL 432.601.* 2015.
5. **van Eekert, M. et al.** *Explorative research on innovative nitrogen recovery (STOWA rapport 2012-51).*