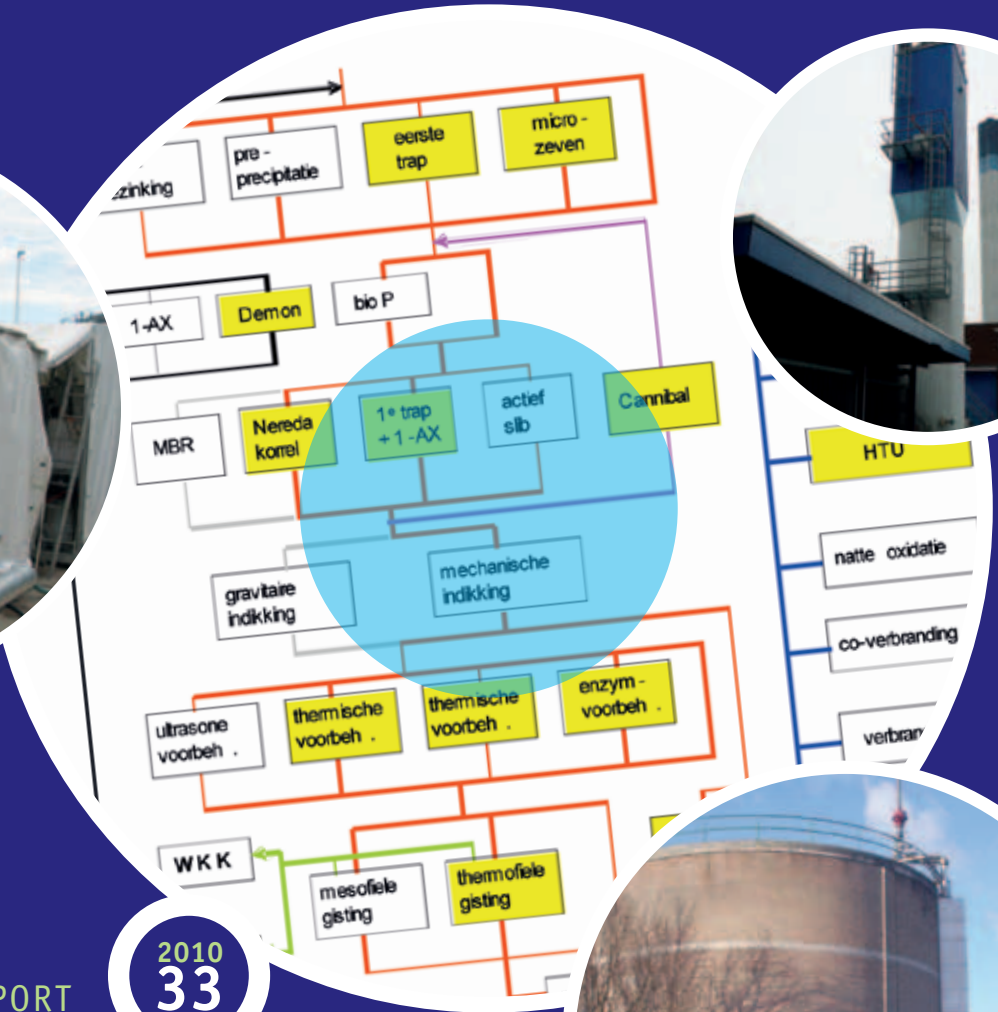


SLIBKETENSTUDIE II



RAPPORT

2010
33

SLIBKETENSTUDIE II
NIEUWE TECHNIEKEN IN DE SLIBKETEN

RAPPORT

2010

33

ISBN 978.90.5773.507.3



COLOFON

UITGAVE STOWA, Amersfoort, december 2010

PROJECTUITVOERING

W.M. Wiegant (Royal Haskoning)

D. Knezevic (Royal Haskoning, thans werkzaam bij Visser & Smit Hanab b.v.)

W.F. Koopmans (Royal Haskoning)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

R. van Dalen (Waterschap Veluwe)

J. Jonk (Waterschap Brabantse Delta)

K. de Korte (Waternet)

L.D. Korving (NV Slibverwerking Noord-Brabant)

C. Petri (Waterschap Rijn en IJssel)

H. Baten (Hoogheemraadschap Rijnland)

R. Peeters (DRSH)

M. Bennenbroek (GMB)

C.A. Uijterlinde (STOWA)

FOTO OMSLAG Foto gemaakt door Sustec
Foto gemaakt door N. Groeneveld
Foto gemaakt door W. Wiegant

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2010-33
ISBN 978.90.5773.507.3

TEN GELEIDE

De Slibketenstudie II is in de eerste plaats een aanvulling op en voortzetting van de eerste slibketenstudie, opgesteld in 2005. Met deze studie worden een aantal nieuwe technieken, zowel in de water- en sliblijn als in de slibeindverwerking, toegevoegd aan Slibketenstudie I, waarbij de focus vooral op energie en kosten ligt.

De Slibketenstudie II is tevens een aanvulling op enkele andere studies/bewegingen die zich met een andere insteek eveneens begeven op het terrein van energie en kosten voor het zuiveren van afvalwater. Dit zijn:

- De Energiefabriek, een initiatief van een aantal waterschappen om de behandeling van afvalwater energetisch neutraal of zelfs energieleverend te maken;
- Meerjarenafpraak energie-efficiency (MJA-3) gericht op een energie-efficiencyverbetering van 30%, te bereiken door alle waterschappen gezamenlijk in de periode 2005-2020;
- STOWA RWZI 2030, een project waarin de vraag centraal stond hoe de RWZI er in de toekomst uit zou moeten zien;
- Klimaatakkoord tussen de waterschappen en de Staat der Nederlanden. Dit akkoord houdt in dat de waterschappen in de periode 2010-2020 projecten en activiteiten zullen initiëren en ondersteunen die bijdragen aan:
 - het halen van de landelijke energiedoelstellingen en de doelstellingen voor de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen;
 - het ontwikkelen en toepassen van innovatieve duurzame technologie;
 - een duurzame ruimtelijke inrichting van Nederland.

Deze slibketenstudie is een belangrijke aanvulling, omdat de hele keten van influent tot en met de slibmineralisatie in beschouwing wordt genomen, en omdat het onafhankelijk is van lokale omstandigheden en kansen. Het speelt een rol bij de onderbouwing van fundamentele keuzes bij het inrichten van het afvalwaterzuiveringsproces en slibeindverwerkingsproces met het oog op de toekomst waarin innovatieve duurzame technologieën worden ingezet om grondstoffen terug te winnen, om doelstellingen met betrekking tot energiebesparing te realiseren en/of om de uitstoot van langcyclische CO₂ te verminderen.

Amersfoort, 28 december 2010

De directeur van de STOWA
Ir. J.M.J. Leenen

SAMENVATTING

INLEIDING

PROBLEEMSTELLING

De centrale probleemstelling van de slibketenstudie wordt als volgt verwoord:

Hoe kan met een minimaal eigen verbruik aan energie in de keten, zoveel mogelijk energie worden geproduceerd uit het CZV aanwezig in het afvalwater?

Bij de uitwerking van de diverse slibketenscenario's wordt primair voldaan aan de eisen die gesteld zijn aan het effluent van de afvalwaterzuiveringsinstallatie en is rekening gehouden met kwaliteits- en duurzaamheidsaspecten, kosten en wettelijke bepalingen, voorschriften en normen.

De onderhavige studie kan gezien worden als een uitbreiding of aanvulling van de eerste slibketenstudie, waarin verschillende nieuwe technieken, die momenteel in de belangstelling staan, zijn beschreven en doorgerekend volgens dezelfde berekeningsmethodieken voor energie en kosten.

CONTEXT

Er zijn nog enkele andere studies/bewegingen die zich met een andere insteek eveneens begeven op het terrein van energie en kosten voor het zuiveren van afvalwater. Dit zijn:

- de Energiefabriek;
- de meerjarenafspraken energie-efficiency (MJA-3);
- STOWA RWZI 2030;
- klimaatakkoord tussen de waterschappen en de Staat der Nederlanden.

In de slibketenstudie wordt weliswaar uitgegaan van een 'groene-weide-situatie' en is grotendeels theoretisch van opzet, maar speelt een rol bij de onderbouwing van fundamentele keuzes voor in te zetten (nieuwe) technieken of configuraties.

UITGANGSPUNTEN

De uitgangspunten die gehanteerd zijn voor Slibketenstudie II zijn in hoofdlijn overgenomen van de Slibketenstudie I. Sommige uitgangspunten zijn in waarde geactualiseerd.

De nieuwe technieken die geïntroduceerd zijn met de slibketenstudie II zijn modulair geïntegreerd in het bestaande rekenmodel voor de water- en sliblijn en/of het bestaande rekenmodel voor de slibeindverwerking.

TECHNIEKEN

De nieuwe technieken die modelmatig in energie en kosten nader zijn doorgerekend, zijn ingedeeld in categorieën en hieronder beknopt toegelicht. Tevens worden de nieuwe technieken beschreven die wel in overweging zijn genomen, maar niet nader zijn uitgewerkt.

VOORBEHANDELING

TWEETRAPSROCES

Het tweetraps actiefslibstelsysteem bestaat uit een hoog belast actief slibstelsysteem, waarin een groot deel van de organische vervuiling en het zwevend stof worden verwijderd, gevolgd door een tweede actiefslibstelsysteem, voornamelijk gericht op de verwijdering van stikstof. Door het toepassen van effluentrecirculatie vindt denitrificatie plaats in de eerste trap. Het proces is expliciet gericht op een combinatie met slibgisting of slibverbranding, waarbij zoveel mogelijk slib direct doorgevoerd wordt naar de gisting. Voordelen van het tweetrapsproces zijn de relatief lage investeringen en het lage eigen energieverbruik. Nadeel is dat de stikstofverwijdering soms problematisch is, afhankelijk van de samenstelling van het afvalwater en de toepassing van deelstroombehandeling.

MICROZEVEN

Door influent te zeven met microzeven (diameter < 0,5 mm) wordt veel slib, en dus CZV, voorafgaand aan het zuiveringsproces afgevangen. De reststroom is specifiek van samenstelling in vergelijking met primair slib (hoog gehalte aan cellulose), kan goed worden ontwaterd en leent zich voor de opwerking tot een secundaire brandstof. Het proces reduceert de hoeveelheid zwevende stof die naar de beluchting gaat, resulterend in een kleine beluchtingsruimte, een laag energieverbruik en lage investeringskosten. Het energieverbruik is iets hoger in vergelijking met voorbezinking. Terughoudendheid ten aanzien van het mogelijk intensieve onderhoud is volgens recent onderzoek niet op zijn plaats.

HOOFDPROCES

NEREDA

Nereda[®] is een innovatieve zuiveringstechnologie die het huishoudelijk en bedrijfsafvalwater met circa 20 - 40% minder energie zuivert, waarbij gebruik wordt gemaakt van snel bezinkbaar, aëroob korrelslib. Het systeem levert belangrijke ruimtewinst en bij grotere installaties ook financiële winst op ten opzichte van een conventioneel actiefslibstelsysteem. De bedrijfsvoering is vergelijkbaar met die van een sequencing batch reactor (SBR). De intensieve monitoring en besturing die inherent is aan een discontinue bedrijfsvoering kan als een nadeel worden opgevat. De eerste full-scale Nereda installatie wordt bij de rwzi Epe in 2011 opgestart.

CANNIBAL

Het Cannibal[®] proces beoogt de slibproductie te reduceren door een grotendeels anaëroob proces. In een deelstroom naast de retourstroom verblijft een deel van het retourslib zekere tijd in een reactor. Hierin wordt met intermitterende beluchting voorkomen dat de redoxpotentiaal te laag wordt. Het biologische mechanisme achter de slibreductie is nog niet duidelijk. Het vermoeden is dat in de reactor hydrolyse en verzuring optreedt, door anaërobe en facultatieve bacteriën. Het systeem produceert veel minder slib (circa 70% reductie). Deze reductie gaat vermoedelijk ten koste van een toename van het energieverbruik in de beluchte ruimte, want een groot deel van de hydrolyseproducten zal worden geoxideerd in de beluchte ruimte.

ANAMMOX IN DE HOOFDLIJN

Anammox in de hoofdlijn is een proces waarin de verwijdering van organische stof plaatsvindt in een actiefslibstelsysteem met korte slibleeftijd, en waarin de stikstof wordt verwijderd met behulp van een ééntraps nitrificatie - anammox proces. Ontkoppeling van de CZV-verwijdering en de N-verwijdering is energetisch gezien zeer gunstig. Het feit dat altijd circa 10% nitraat wordt gevormd is een nadeel. Lage effluentgehalten voor stikstof maken dus verdere behandeling noodzakelijk. De emissie van lachgas is in nader onderzoek. Het ééntraps nitrificatie - anammox proces heeft zich bewezen als deelstroombehandeling.

SLIBVOORBEHANDELING EN GISTING

WORMENREACTOR

In de wormenreactor, opgenomen in de sliblijn, wordt slib gereduceerd met behulp van oligochaete wormen. De wormen vermenigvuldigen zich door deling, en eten eigenlijk alle soorten slib, natuurlijk wel afhankelijk van de voedingswaarde en de verhouding tussen organisch en anorganisch materiaal. De reductie van slib is het voornaamste voordeel van dit systeem. De moeilijke beheersbaarheid en procesregeling kunnen als de belangrijkste nadelen worden opgevat. Een combinatie van een wormenreactor gevolgd door een (koude) vergisting, waarmee een totale drogestofreductie kan worden gerealiseerd van 50 tot 70%, wordt nader onderzocht.

THERMOFIELE VERGISTING

Thermofiele vergisting wordt doorgaans toegepast bij temperaturen tussen 50 en 60°C. Het proces resulteert in een snellere omzetting in vergelijking met mesofiele vergisting, maar het is de vraag of er ook méér wordt afgebroken. Thermofiele vergisting is iets gevoeliger voor de ammoniakconcentratie, maar verder is er weinig reden om aan te nemen dat thermofiele gisting minder stabiel zou zijn dan mesofiele. Bovendien wordt vordering gemaakt op het gebied van de procesregeling. Het voordeel is de lagere investering (door de kortere verblijftijd). Thermofiele vergisting is een in de praktijk toegepaste technologie.

THERMISCHE HYDROLYSE

Thermische hydrolyse van slib bij verhoogde temperatuur en druk is een behandeling voorafgaand aan de slibgisting, resulterend in een toename van de afbreekbaarheid van secundair slib en daarmee een toename van de biogasproductie. De conversieprocessen verlopen sneller, waardoor ook de verblijftijd kan worden verkort. Bovendien daalt de viscositeit van het slib, zodat de slibconcentratie in de gisting verhoogd kan worden. Tenslotte verbetert de ontwaterbaarheid van het uitgegiste slib. Nadelen zijn de investering, de hoge ammoniakconcentratie na vergisting en het feit dat het proces alleen toepasbaar is voor secundair slib. Het systeem is als batchproces bewezen.

ENZYMATISCHE HYDROLYSE

Door toevoeging van enzymen, vooral cellulolytische enzymen die cellulose omzetten in glucose, wordt de vergistbaarheid van slib verbeterd. Het heeft vooral effect op secundair slib. De verbeterde slibafbraak bij dezelfde verblijftijd of de kortere verblijftijd leidt tot meer biogas en minder slib. Het effect van de enzymen is nog onduidelijk, evenals de kosten en de energie benodigd om de enzymen te produceren. De werking van de enzymen is wel bewezen, vooral bij slib met een hoog gehalte aan cellulose.

BIOGASBENUTTING

PRODUCTIE VAN GROEN GAS

Biogas bestaat voornamelijk uit methaan en kooldioxide, CH_4 en CO_2 . Het CH_4 gehalte varieert van 50% tot 65%. De opwerking tot groen gas is er op gericht om zoveel CO_2 te verwijderen dat de verbrandingswaarde van het gas daarna identiek is aan de verbrandingswaarde van aardgas. De bewezen technieken voor opwerking zijn onderscheidend in de manier waarop CO_2 uit het biogas wordt verwijderd, namelijk

- membraanscheiding;
- CO_2 absorptie (gaswassing);
- CO_2 adsorptie met behulp van VPSA (Vacuüm Pressure Swing Adsorption);
- cryogeen.

Vanuit oogpunt van duurzaamheid kan opwerking een interessant proces zijn. Nadeel is dat er binnen de inrichting geen warmte vrijkomt die ingezet kan worden om de gistingstanks op temperatuur te houden. Bovendien is de productie van groen gas duurder dan de inzet van een WKK-installatie, tenzij de opbrengst van groen gas hoger is (ordegrootte € 0,60 per m^3 of meer).

SLIBEINDVERWERKING

DROGEN MET LAAGWAARDIGE WARMTE

Voor het drogen van mechanisch ontwaterd zuiveringsslib kan gebruik worden gemaakt van laagwaardige warmte (vanaf circa 80°C). Opgewarmde lucht kan door het slib worden geblazen, waarbij vocht wordt opgenomen. De vrijkomende droogdampen worden gekoeld (waarbij het vocht wordt gecondenseerd), weer opgewarmd en opnieuw door het slib geblazen. Het slib kan worden gedroogd tot circa 90% d.s. Veelal worden banddrogers toegepast. Het voornaamste voordeel van lage temperatuur droging is de mogelijkheid om laagwaardige warmte te benutten, die anders weggekoeld had moeten worden. Bovendien zijn de investeringskosten relatief laag, omdat er relatief lage temperaturen worden toegepast waarvoor geen hoogwaardige componenten nodig zijn. Daar staat tegenover dat de installatie altijd afhankelijk is van de levering van restwarmte, dat de omvang van de installatie relatief groot is en stikstof geloosd wordt via het condensaat. Door het gesloten ventilatiesysteem wordt de geuremissie van de installatie beperkt.

SUPERKRITISCHE VERGASSING

Superkritische vergassing is een nieuwe technologie voor de productie van schoon stookgas uit natte biomassastromen. Het proces wordt onder hoge druk bedreven op 200 - 400 bar en bij een temperatuur van $500 - 700^\circ\text{C}$ gedurende enkele minuten verhit. De aanwezige koolstofketens vallen onder deze omstandigheden uiteen, resulterend in een stookgas. Het geproduceerde stookgas bestaat voor het grootste gedeelte uit waterstof, kooldioxide, stikstof en verder nog kleine hoeveelheden methaan. Als voordelen van het proces worden genoemd een hoog energetische rendement in vergelijking met verbranding en atmosferische vergassing, de directe omzetting van ammoniumstikstof tot stikstofgas waardoor een deelstroombehandeling overbodig is, een minder groot afval probleem in verhouding tot fermentatie en de lage teer vorming. Het proces heeft zich nog pas op laboratoriumschaal bewezen, maar het is een veelbelovende technologie die fundamenteel verschilt van andere beschouwde thermische technologieën.

VERGASSING

Bij vergassing wordt vast organisch materiaal onder invloed van een hoge temperatuur (800 - 1.500°C) afgebroken tot eenvoudige gasvormige verbindingen, zoals CO, CH₄ en H₂. Dit gas wordt synthese gas genoemd. In de gemodelleerde installatie is gekozen voor een tweetrapsvergassingssysteem, waarbij zuurstof (verkregen uit een luchtscheidingsinstallatie) zal worden toegevoegd. Het vergassingssysteem zal bestaan uit een circulerend wervelbedvergasser (werktemperatuur circa 900°C) en een verslakkende stofwolkvergasser (werktemperatuur circa 1.400°C). In de stofwolkvergasser worden de teercomponenten uit de wervelbedvergasser verder afgebroken en wordt as uit de wervelbedvergasser verslakt.

HYDRO THERMAL UPGRADING (HTU)

In het Hydro Thermal Upgrading (HTU)-proces wordt biomassa in (vloeibaar) water bij een druk van circa 120 - 180 bar en een temperatuur van 300 - 350°C (in de buurt van het kritische punt van water), in afwezigheid van zuurstof, omgezet in een zogenaamde biocrude: een hoogcalorische, met zware ruwe olie te vergelijken brandstof. Door de hoge druk wordt verdamping van water vermeden. De techniek is geschikt voor de behandeling van natte biomassa (zonder voorafgaande droging) en wordt gecombineerd met het uitwassen van mineralen hetgeen resulteert in een hoogwaardig product dat geleverd kan worden in de verbrandingsinstallaties en (deels) geschikt is voor upgrading. Het proces wordt momenteel op pilotschaal onderzocht, maar staat nog ver van commerciële toepassing.

NIET OPGENOMEN, MAAR WEL IN OVERWEGING GENOMEN

HOGEDRUK GISTING

Bij hoge druk gisting lost steeds meer van de geproduceerde CO₂ op in de waterfase en dissocieert het tot bicarbonaat. Het geproduceerde biogas bestaat bij een druk boven de 5 bar voor meer dan 90% uit methaan, terwijl dit bij atmosferische druk doorgaans 55 - 65% is. Het hoge methaangehalte van het biogas tot aardgaskwaliteit, zonder verdere opwerking, is het voornaamste voordeel. De hoge investeringskosten voor apparatuur vanwege de hoge druk, zijn het voornaamste nadeel. Proeven zijn uitgevoerd op laboratoriumschaal.

CO-VERGISTING

Co-vergisten is gericht op het optimaliseren van het gistingsproces, waarbij het zuiveringsslib samen met andere, gemakkelijk afbreekbare organische reststoffen wordt vergist. Deze organische reststoffen kunnen bijvoorbeeld putvetten, swill of slibben afkomstig uit de voedingsmiddelenindustrie. Deze optimalisatie wordt op verschillende rwzi's, die over een slibgisting beschikken, toegepast om wat extra biogas te kunnen produceren. De samenstelling van deze reststoffen bepaalt in grote lijn het effect op de energiebalans. Co-vergisten is bewezen technologie, maar aangezien het niet bekend is welke reststoffen bij het vergistingsproces betrokken zullen worden, is een nadere definiëring van de samenstelling niet mogelijk. Besloten is om deze technologie niet verder mee te nemen in deze studie.

LIQUIFIED BIOGAS

Liquefied biogas (LBG), waarvoor ook wel de termen liquefied biomethane (LBM) of bio-LNG) worden gebruikt, is biomethaan dat vloeibaar is gemaakt door het te koelen tot ongeveer -160°C. Biomethaan is biogas dat is opgewaardeerd/gezuiverd tot >97% methaan.

Als gevolg daarvan heeft biomethaan een hogere energie-inhoud dan groengas (84 - 88% methaan). Het vloeibaar maken van biomethaan is een bewerking ter bevordering van de afzet van biogas (geschikt voor transport) en derhalve is besloten om de techniek niet mee te nemen in deze studie. De techniek is bewezen, maar de schaalgrootte en daarmee de kosten, zijn doorslaggevend.

PULVERIZING AIR DRYER (PAD)

De werking van de Pulverizing Air Dryer (PAD) berust op een combinatie van lage temperatuur droging en de verschillen in luchtdruk en luchtsnelheid (snelheidsgradiënten) die optreden in een cycloon. Het proces vindt trapsgewijs plaats in meerdere in serie geschakelde cyclonen.

Het te drogen slib wordt in de vorm van kleine deeltjes (maximale afmeting 3 cm) gedoseerd in een leiding met een hoge luchtsnelheid. De temperatuur van de lucht ligt in de range van 40 - 50°C. De luchtstroom wordt naar een eerste cycloon geleid waar partiële droging plaatsvindt. De bovenloop van de cycloon bestaat uit vochtige lucht met een temperatuur van circa 30°C. De slibdeeltjes worden in de cycloon afgescheiden door de centrifugaalkrachten en via de onderuitloop van de cycloon weer via een luchtleiding naar de volgende cycloon gevoerd.

NATTE TORREFACTIE (TORWASH)

De essentie van TORWASH is dat de biomassa in een drukvat in aanwezigheid van water thermisch behandeld wordt, zodat torrefactiereacties zich afspelen in de vloeistof bij verhoogde druk en temperatuur. De grootste winst is dat er alleen mechanische energie in het drogen van de biomassa gestoken hoeft te worden. Vooraf drogen is overbodig en door de chemische veranderingen in de biomassa kan water, wat alleen nog maar fysisch gebonden is, met mechanische middelen afgedreven worden. Thermisch drogen is dus overbodig. Met TORWASH kan ook zeer natte en vezelige biomassa opgewerkt worden, die ongeschikt is voor simpele uitpersing, omdat de biomassa veerkrachtig is en het water vooral chemisch en biologisch gebonden is. Het TORWASH proces bevindt zich in de onderzoeksfase.

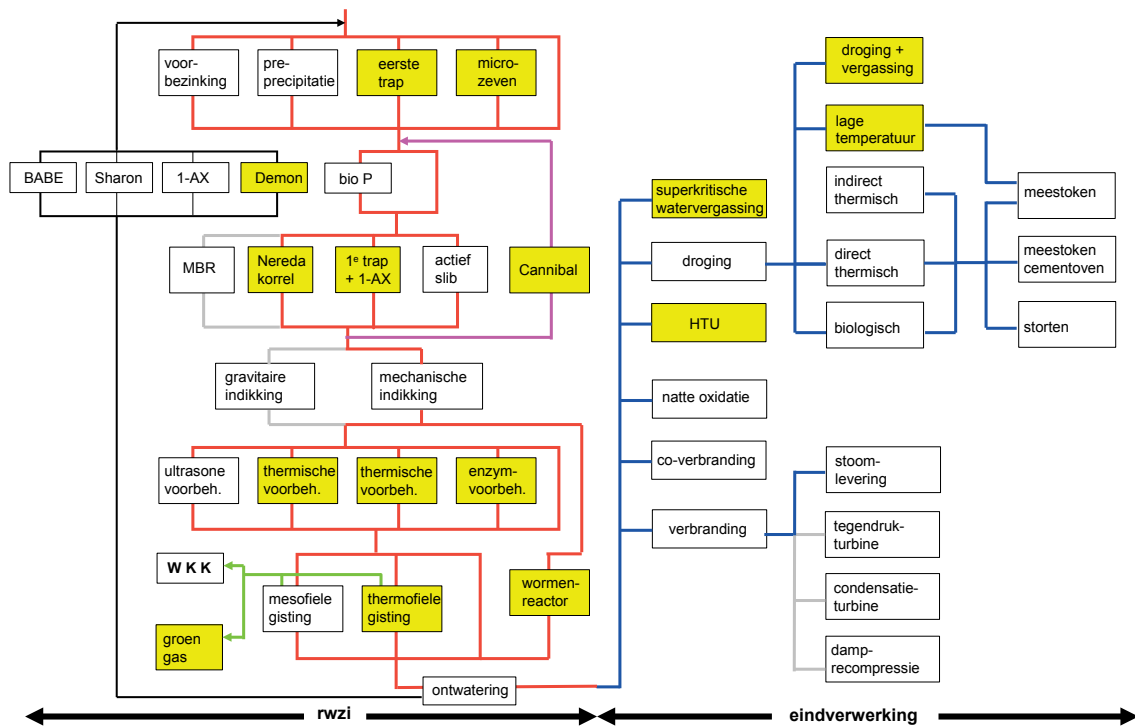
(FLASH) PYROLYSE

Onder pyrolyse wordt verstaan het thermisch ontleden van organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof. In de praktijk wordt pyrolyse uitgevoerd bij een temperatuur tussen 450 en 750°C. Bij deze temperatuur ontleden hogere koolwaterstoffen tot componenten met een lagere molecuulmassa. Hierbij ontstaan de volgende fracties:

- pyrolyse gas bestaande uit een niet condenseerbare fractie;
- een water en olie mengsel, bestaande uit condenseerbare koolwaterstoffen;
- pyrolysecokes.

Pyrolyse wordt veelal toegepast als voorbehandelingstechniek en niet als eindverwerkings-techniek. Met het toepassen van pyrolysetechnieken ter verwerking van diverse afvalstoffen bestaat een ruime praktijkervaring met capaciteiten tot circa 10 ton/uur. Een kritische procesparameter voor het verder opschalen is veelal de warmteoverdracht. Daarnaast is er vaak geen bestemming voor alle restproducten die vrijkomen.

FIGUUR S.1 OVERZICHT VAN DE ELEMENTEN VAN DE WATER- EN SLIBLIJN VAN DE RWZI EN DE VERSCHILLENDE TECHNIEKEN VOOR DE EINDVERWERKING. DE NIEUWE TECHNIEKEN ZIJN GEEL AANGEGEVEN



ANALYSE

ALGEMEEN

Het produceren van zoveel mogelijk energie uit het CZV aanwezig in het afvalwater met een minimaal eigen verbruik aan energie in de keten, kan worden gerealiseerd door:

- eerst zoveel als mogelijk organische stof uit het afvalwater te verwijderen, door toepassing van voorbezinking met of zonder dosering van chemicaliën, door toepassing van micro-zeeving van het afvalwater, of met behulp van een hoog belast actiefslibstelsysteem, zodat
- het energieverbruik voor de oxidatie van resterend BZV en voor de nitrificatie en denitrificatie zo gering mogelijk is;
- en
- zoveel als mogelijk energie te winnen uit het afgescheiden slib door toepassing van slib-gisting.

Het totale energieverbruik op een rwzi bestaat voor een zeer belangrijk deel uit de energie die nodig is voor de oxidatie van BZV en stikstof in de beluchte ruimten, en de winst van energie (het negatieve energieverbruik) door de toepassing van energieproductie uit het tijdens de vergisting van slib gewonnen biogas.

De energie die nodig is voor de verwijdering van BZV en stikstof wordt sterk verminderd door toepassing van voorbehandeling. Daarom leveren voorbezinking met of zonder chemicaliëndosering, of een hoogbelast actiefslibstelsysteem een belangrijke bijdrage in de reductie van het energieverbruik.

Een belangrijk bijkomend voordeel van de verwijdering van zwevende stof uit het afvalwater is de geringere slibproductie van navolgende stappen. Hierdoor wordt het volume van de navolgende stappen beperkt, en daarmee de investeringskosten.

De productie van energie bij de slibgisting is gebaat bij een zo hoog mogelijke productie van (primaire) slib, en bij een zo ver mogelijke (anaërobie) afbraak van het slib. De afbraak van het secundaire slib kan worden verbeterd door de toepassing van voorbehandelingsmethoden, zoals ultrasone, enzymatische of thermische voorbehandeling, die alle leiden tot een verbetering van de afbraak van het secundaire slib tijdens de gisting, en daarmee tot een hogere energieproductie.

RWZI

Een analyse van de uitkomsten van de berekeningen werd uitgevoerd aan de hand van de berekende kosten en het berekende energieverbruik. Uit de analyse bleek dat de volgende technieken en met name combinaties van deze technieken, energetisch en kostentechnisch interessant zijn:

- een tweetrapsproces;
- Anammox in de hoofdlijn;
- Nereda in de hoofdlijn;
- thermische voorbehandeling van het slib.

Het voordeel van een tweetrapsproces is afhankelijk van de toepassing van een goede en effectieve tussenbezinking. Bovendien is een gunstige verhouding tussen BZV en stikstof in het influent een voorwaarde om het proces energetisch en financieel gunstig te kunnen bedrijven.

Nereda en Anammox in de hoofdlijn zijn beide gunstig te noemen. Het voordeel van het toepassen van een hoogbelaste installatie met Anammox in de hoofdlijn is volledig afhankelijk van de - nog aan te tonen - toepasbaarheid van het proces bij de temperatuur van het afvalwater.

Alle typen voorbehandeling zijn energetisch gunstig, met een eerste trap van een tweetrapsproces als gunstigste. Het energetische voordeel van thermische voorbehandeling van het slib, ligt vooral in de verbeterde ontwatering.

Biologische P-verwijdering is energetisch gunstiger dan chemische P-verwijdering, doordat energieverbruik is toegekend aan het gebruik van chemicaliën.

Slibgisting met energieopwekking in een WKK levert voordeel op. Vanuit het oogpunt van duurzaamheid kan opwerking van biogas tot de kwaliteit van aardgas ('groen gas') een interessant proces zijn. Nadeel is dat er binnen de inrichting geen warmte vrijkomt die ingezet kan worden om de gistingstanks op temperatuur te houden.

SLIBEINDVERWERKING

Superkritische vergassing en lage-temperatuur-droging zijn als nieuwe technieken energetisch én kostentechnisch interessant, waarvan de eerste meer onderzoek en de tweede praktijktoepassing verdient.

Net als bij de slibketenstudie I kan worden geconcludeerd dat de kosten weinig onderscheidend zijn. Voor zover dit wel het geval is, worden de kosten bepaald in de waterlijn. In energetisch opzicht worden de grote variaties voornamelijk door de slibeindverwerking bepaald.

Bij de slibeindverwerking is het effect van het droge stofgehalte van het slib op het energieverbruik en de kosten interessant. Hiervoor zijn berekeningen uitgevoerd en de volgende algemene conclusies kunnen uit de resultaten worden getrokken. Sommige van de varianten zijn niet gevoelig voor het drogestofgehalte van het slib, zoals natte oxidatie, indirecte droging met verbranding in een wervelbed, HTU-proces, en superkritische vergassing, maar de overige technieken wel. Het sterkst wordt directe thermische droging (aardgas), gevolgd door meestoken in een cementoven beïnvloed.

DE VOLLEDIGE SLIBKETEN

De energie-inhoud van de belangrijkste componenten van de rwzi en de eindverwerking kunnen een redelijk beeld geven van de onderlinge verhoudingen binnen de gehele keten. Uit een gerichte slibketen analyse konden de volgende conclusies worden getrokken:

- lage temperatuurdroging is energetisch voordeliger dan indirecte slibdroging en verbranding;
- slibgisting levert veel energetisch voordeel op. De hoeveelheid energie die wordt gewonnen bij de slibgisting is aanzienlijk groter dan de verminderde energiewinst bij de eindverwerking. Alleen bij een belangrijk hoger drogestofgehalte dan nu is aangenomen, of een energetisch nog gunstiger slibeindverwerking, zou de conclusie dat slibgisting overbodig is, gerechtvaardigd zijn;
- een tweetrapsproces, gecombineerd met een energetisch gunstige eindverwerking kan leiden tot een energetisch gunstige slibketen.

Bestudering van het energieverbruik en de kosten van een aantal varianten voor de waterlijn bij verschillende eindverwerkingstechnieken leert, dat het effect van de eindverwerking op het totale energieverbruik en de totale kosten voor alle varianten sterk op elkaar lijkt. Dit betekent dat de slibeindverwerking ongeveer dezelfde invloed heeft op de totale slibketen, onafhankelijk van de keuzes voor technieken op de rwzi. De keuze voor de beschouwde slibeindverwerkingstechnieken is vrijwel niet afhankelijk van de opzet van de bestaande rwzi's.

CONCLUSIES

De volgende conclusies zijn getrokken uit de berekeningsresultaten:

- Technieken om relatief veel slib te maken – méér dan in vergelijking met reguliere voorbezinking – leveren meer slib (vóór vergisting) op, en dat levert in een slibgisting meer energie op. Dit geldt voor processen als een tweetrapsproces, pre-precipitatie en Anammox in de waterlijn. Voor pre-precipitatie is het voordeel bijna afwezig als energieverbruik aan chemicaliëndosering wordt toegekend. Anammox in de waterlijn is een vrijwel hypothetisch proces dat nog dient te worden getest in de praktijk. Maximalisering van de slibproductie vóór vergisting mag natuurlijk niet ten koste gaan van de effluentkwaliteit, zodat een tweetrapsproces niet altijd toepasbaar is.

- Technieken om de energieopbrengst van slibgisting te maximaliseren, kunnen een duidelijk voordeel hebben. Thermische voorbehandeling van secundair slib levert een hogere biogasopbrengst en/of hogere droge stofgehaltenes, resulterend in een kostenvoordeel ten opzichte van het niet toepassen ervan. Dit voordeel is wel schaalafhankelijk;
- Technieken om juist veel minder slib te produceren, zoals de biologische slibreductie in de Cannibal[®] en de *oligochaete* slibreductie, leveren natuurlijk veel minder energie op. Vanwege lagere kosten voor de slibeindverwerking, kunnen dergelijke technieken wel kosteneffectief zijn, zoals kan gelden voor het Cannibal[®] proces.
- Lage temperatuur droging (LTD) laat zich onder voorwaarden aftekenen als een slibverwerkingstechniek met een lage investering en een lage bijdrage aan de productie van langcyclische CO₂. Deze voorwaarden houden in dat:
 - de slibdroging bij een laagwaardige warmtebron moet worden uitgevoerd;
 - er afzet moet zijn voor het gedroogde slib bij een kolencentrale en/of een cementoven.
- Het HTU-proces en superkritische vergassing zijn zowel energetisch als financieel nog erg onzeker. Vooral superkritische vergassing is vanuit theoretisch oogpunt energetisch veelbelovend, maar vereist nog een grote ontwikkeling;
- De keuzes voor rwzi en slibeindverwerking kunnen vrijwel volledig onafhankelijk van elkaar gemaakt worden in een 'groene-weide-situatie'. Deze conclusie is mede gebaseerd op de bedrijfseconomische aanname dat de slibeindverwerking vol bezet is;
- Superkritische vergassing is veelbelovend, maar nog onvoldoende bewezen. Grote voordelen zijn het hoge energetische rendement, het feit dat er geen vergaande mechanische ontwatering noodzakelijk is en de omzetting van ammoniumstikstof naar stikstof in de lucht met een hoog rendement;
- Vergassing van gedroogd zuiveringsslib leent zich voor een combinatie met alle vormen van droging en kan ook bij de afzet van het syngas worden gecombineerd met een elektriciteitscentrale. Deze totale combinatie kan resulteren in een hoog energetisch rendement;
- Met de beschikbare technieken is de productie van groen gas duurder dan de inzet van een WKK-installatie, tenzij de opbrengst van groen gas hoger is (ordegrootte € 0,60 per m³ of meer). Dit bedrag wordt hoger in geval dat de warmte van de WKK-installatie met een hoger rendement kan worden benut.

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

SLIBKETENSTUDIE II

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	INLEIDING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Slibketenstudie en het vervolg	1
	1.2 Context van de studie	1
	1.3 Leeswijzer	3
2	UITGANGSPUNTEN	4
	2.1 Algemeen	4
	2.2 Vergelijking met de uitgangspunten van slibketenstudie I	4
	2.3 Vergelijking met de uitgangspunten van de MJA-3	5
3	SELECTIE VAN UITGEWERKTE TECHNIEKEN	7
	3.1 Tweetraps actiefslibproces	7
	3.2 Microzeven	8
	3.3 Nereda	8
	3.4 Cannibal	9
	3.5 Anammox in de hoofdlijn	11
	3.6 Wormenreactor	13
	3.7 Hogedruk gisting	14
	3.8 Thermofiele gisting	14

3.9	Thermische hydrolyse	16
3.10	Enzymatische hydrolyse	18
3.11	Co-vergisting	18
3.12	Productie van groen gas	18
3.13	Liquefied biogas (LBG)	20
3.14	Lage temperatuur droging (LTD)	21
3.15	Pulverizing Air Dryer (PAD) technologie	22
3.16	Superkritische vergassing	24
3.17	Vergassingstechnologie	26
3.18	Hydro Thermal Upgrading	28
3.19	Natte torrefactie (Torwash)	29
3.20	Pyrolyse	30
3.21	Nieuwe sanitatie	30
3.22	Selectie en motivatie voor nadere uitwerking	30
4	VOORBEHANDELING	33
4.1	Tweetraps-actiefslibproces	33
4.1.1	Modelparameters	33
4.2	Toepassing van microzeven als voorbehandeling	33
4.2.1	Modelparameters	33
4.3	Resultaten	34
4.3.1	Tweetraps actiefslibsysteem	35
4.3.2	Microzeven	35
5	HOOFDPROCES	38
5.1	Nereda®-proces	38
5.1.1	Modelparameters	38
5.1.2	Resultaten	39
5.2	Cannibal® proces	39
5.2.1	Modelparameters	39
5.2.2	Resultaten	40
5.3	CZV verwijdering met Anammox in de hoofdlijn	42
5.3.1	Modelparameters	42
5.3.2	Resultaten	42
6	SLIBVOORBEHANDELING EN -GISTING	45
6.1	Wormenreactor	45
6.1.1	Modelparameters	45
6.1.2	Resultaten	45
6.2	Thermofiele slibgisting	47
6.2.1	Modelparameters	47
6.2.2	Resultaten	47
6.3	Thermische hydrolyse	49
6.3.1	Modelparameters	49
6.3.2	Resultaten	49
6.4	Voorbehandeling van slib door enzymatische hydrolyse	51
6.4.1	Modelparameters	51

7	BIOGASBENUTTING	52
7.1	Groen gas	52
7.1.1	Modelparameters	52
7.1.2	Resultaten	53
8	SLIBEINDVERWERKING	54
8.1	Drogen met laagwaardige warmte	54
8.1.1	Modelparameters	54
8.1.2	Resultaten	55
8.2	Superkritische vergassing	55
8.2.1	Modelparameters	55
8.2.2	Resultaten	56
8.3	Vergassing	56
8.3.1	Modelparameters	56
8.3.2	Resultaten	56
8.4	Hydro Thermal Upgrading (HTU)	56
8.4.1	Modelparameters	56
8.4.2	Resultaten	58
9	ANALYSE	59
9.1	De water- en sliblijn	59
9.2	De slibeindverwerking	65
9.2.1	Vergelijking van enkele specifieke scenario's voor slibketenstudie II	65
9.3	Elementen van de energiebalans over rwzi, eindverwerking en gehele keten	69
9.3.1	Effect van het drogestofgehalte op energie en kosten van de slibeindverwerking	74
9.4	De combinatie van rwzi en eindverwerking	75
9.5	Conclusies uit de analyse	77
10	BESPIEGELING EN CONCLUSIES	78
10.1	Bespiegeling	78
10.2	Evaluatie van de conclusies uit de eerste slibketenstudie	80
10.3	Conclusies uit deze studie	82
11	REFERENTIES	84
	BIJLAGEN	
1	OVERALL PROCESSHEMA	89
2	UITGANGSPUNTEN	93
	ZIE RAPPORT 2010-34: SLIBKETENSTUDIE II, NIEUWE TECHNIEKEN IN DE SLIBKETEN BIJLAGEN TE DOWNLOADEN VANAF WWW.STOWA.NL	
3	BEREKENINGSRISULTATEN VAN DE REFERENTIECONFIGURATIE VOOR DE WATER- EN SLIBLIJN MET ALLE SLIBEINDVERWERKINGS-TECHNIEKEN	
4	OVERZICHT NETTO PRIMAIRE ENERGIEBEHOEFTE OF -OVERSCHOT PER WATERZUIVERINGSVARIANT	
5	PROCESBEREKENINGEN EN SCHEMA'S SLIBEINDVERWERKING	
6	ECONOMISCHE BEREKENINGEN SLIBEINDVERWERKING	
7	OVERZICHT SLIBVERWERKINGSKETENS PER WATERZUIVERINGSVARIANT	

1

INLEIDING

1.1 SLIBKETENSTUDIE EN HET VERVOLG

Eind 2005 is door STOWA een studie uitgebracht waarin de slibverwerkingsketen aan een nadere analyse is onderworpen. De voornaamste aspecten die in de ketenstudie zijn geanalyseerd, zijn energie, (fossiele) CO₂-emissie en verwerkingskosten. Terwijl er primair voldaan wordt aan de eisen die gesteld zijn aan het effluent van de afvalwaterzuiveringsinstallatie, luidde de centrale probleemstelling van de slibketenstudie als volgt:

Hoe kan met een minimaal eigen verbruik aan energie in de keten, zoveel mogelijk energie worden geproduceerd uit het CZV aanwezig in het afvalwater?

Daarbij is aangetekend, dat bij de bepaling en uitwerking van de diverse slibketenscenario's rekening is gehouden met kwaliteits- en duurzaamheidsaspecten, kosten en wettelijke bepalingen, voorschriften en normen.

De onderhavige studie kan gezien worden als een uitbreiding van de slibketenstudie I, waarin verschillende nieuwe technieken zijn beschreven die van invloed zijn op de slibketen en die momenteel meer of minder sterk in de belangstelling staan.

1.2 CONTEXT VAN DE STUDIE

De slibketenstudie II is in de eerste plaats een aanvulling op en voortzetting van de slibketenstudie I, opgesteld in 2005. Met deze studie worden een aantal nieuwe technieken, zowel in de water- en sliblijn als in de slibeindverwerking, toegevoegd aan slibketenstudie I, volgens dezelfde berekeningsmethodiek voor energie en kosten. De water- en sliblijn wordt daarbij gedefinieerd als alle procesonderdelen die tot de rwzi behoren, waaronder ook de slibvergisting en de slibontwatering.

Maar er zijn nog enkele andere studies/bewegingen die zich met een andere insteek eveneens begeven op het terrein van energie en kosten voor het zuiveren van afvalwater. Dit zijn:

- de Energiefabriek;
- de meerjarenafpraak energie-efficiency (MJA-3);
- STOWA RWZI 2030;
- klimaatakkoord tussen de waterschappen en de Staat der Nederlanden.

ENERGIEFABRIEK

De studie naar 'de Energiefabriek'¹ is een initiatief van een aantal waterschappen om de behandeling van afvalwater energetisch neutraal of zelfs energieleverend te maken. Er zijn enige belangrijke verschillen aan te geven in de uitgangspunten in vergelijking met de slibketenstudie. De belangrijkste verschillen zijn:

- bij de Energiefabriek wordt uitgegaan van de bestaande situatie, terwijl in deze studie wordt uitgegaan van een 'groene-weide-situatie';

- bij de Energiefabriek worden potentiële energiebronnen van buiten de inrichting meegenomen; dat is hier niet het geval;
- bij de Energiefabriek wordt alleen de inrichting in beschouwing genomen, en niet de gehele keten tot en met de eindverwerking (mineralisatie van het slib), zoals hier het geval is.

MEERJARENAFSPRAAK ENERGIE-EFFICIENCY (MJA-3)

De doelstelling van de MJA-3 is een energie-efficiencyverbetering van 30%, te bereiken door alle waterschappen gezamenlijk in de periode 2005 - 2020. Dat is een verbetering van gemiddeld 2% per jaar. Waterschappen die deelnemen aan MJA-3 moeten eens in de vier jaar een energie-efficiency plan (EEP) opstellen. Daarin worden concrete maatregelen voorgesteld, zowel binnen de inrichting van de rwzi als binnen de keten. De slibketenstudie kan bij het opstellen van de EEP's een rol spelen ter onderbouwing van fundamentele keuzes voor in te zetten (nieuwe) technieken.

STOWA RWZI 2030

Met het oog op een dreigend tekort aan grondstoffen heeft de afvalwatersector zich verenigd om hierbij vooral kansen te zien. Het terugwinnen van grondstoffen is in het project 'Op weg naar de rwzi van 2030' uitgewerkt in een drietal richtingen: nutriënten, energie en water (NEW). Daarbij stond de vraag centraal: Hoe ziet de rwzi er in de toekomst uit? En ook bij het beantwoorden van deze vraag, speelt het gelijkwaardig vergelijken van (nieuwe) slibverwerkingsroutes, vooral op het gebied van energie en kosten, een belangrijke rol, waaraan de slibketenstudie een invulling geeft.

KLIMAATAKKOORD UNIE - RIJK

De Unie van Waterschappen en het Rijk willen een impuls geven aan de klimaatactiviteiten van de waterschappen en hebben hiertoe het 'klimaatakkoord Unie - Rijk' afgesloten. Dit akkoord houdt in dat de waterschappen in de periode 2010 - 2020 projecten en activiteiten zullen initiëren en ondersteunen die bijdragen aan:

- het halen van de landelijke energiedoelstellingen en de doelstellingen voor de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen;
- het ontwikkelen en toepassen van innovatieve duurzame technologie;
- een duurzame ruimtelijke inrichting van Nederland.

Om aan dit akkoord te kunnen voldoen, vooral op het gebied van de energie-efficiency en de uitstoot van langcyclische CO₂, kan de strategie van de slibverwerking, en daarmee de slibketenstudie, belangrijk bijdragen.

SLIBKETENSTUDIE I

De conclusies van de eerste slibketenstudie zullen aan het eind van dit rapport worden vergeleken met de conclusies uit deze slibketenstudie.

Waar nodig of wenselijk zal worden gerefereerd aan deze studies.

1.3 LEESWIJZER

Slibketenstudie II hanteert in principe dezelfde uitgangspunten als die voor slibketenstudie I. Daar waar nodig zijn de waarden geactualiseerd, zoals de tarieven voor energie. In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de belangrijkste uitgangspunten die gewijzigd zijn. In bijlage 2 is een uitvoerige beschrijving van de definities en uitgangspunten opgenomen.

Hoofdstuk 3 beschrijft op hoofdlijnen de nieuwe technieken die van invloed zijn op de slibverwerking en die voor verdere uitwerking in overweging zijn genomen. Van elke techniek zijn de voor- en nadelen genoemd en is het ontwikkelingsstadium toegelicht. Er is een selectie uitgevoerd van de technieken die verder meegenomen worden in deze nieuwe slibketenstudie. Voor een compleet overzicht van de nieuwe technieken en de plaats in de water- en sliblijn, of de slibeindverwerking, wordt verwezen naar bijlage 1.

De geselecteerde technieken zijn in de navolgende vijf hoofdstukken (hoofdstuk 4 t/m 8) met het oog op de modellering (o.a. modelparameters) nader toegelicht en per hoofdstuk met elkaar vergeleken. Het betreft technieken die betrekking hebben op:

- de voorbehandeling;
- het hoofdproces van de water- en sliblijn;
- de slibvoorbehandeling en -gisting;
- de biogasbenutting;
- de slibeindverwerking.

Per techniek is het volgende opgenomen:

- een beschrijving van hoe de techniek in de bestaande modellen voor de water- en sliblijn en de eindverwerking is opgenomen, en welke modelparameters wijzigen bij toepassing van de techniek of technologie;
- een beschrijving van de voornaamste invloeden die de toepassing van de technieken met zich meebrengt voor belangrijke bedrijfsvoeringsparameters, zoals:
 - slibproductie;
 - verbruik van energie en chemicaliën;
 - investerings- en exploitatiekosten.

Hoofdstuk 9 betreft de analyse van de berekeningsresultaten van diverse slibverwerkingsroutes, aan de hand van het model. De analyse wordt ondersteund met grafieken, waarvan een deel is opgenomen in bijlage 3. In bijlage 4, 5 en 6 zijn de overzichtstabellen opgenomen met de berekeningsresultaten. Bijlagen 4, 5, 6 zijn opgenomen in een apart bijlagenrapport: "2010-34 Slibketenstudie II. Nieuwe technieken in de slibketen. Bijlagen". Dit rapport is te downloaden vanaf www.stowa.nl.

Het rapport wordt afgesloten met de conclusies en aanbevelingen die in hoofdstuk 10 zijn opgenomen.

2

UITGANGSPUNTEN

2.1 ALGEMEEN

In bijlage 2 zijn de uitgangspunten van slibketenstudie II weergegeven, zoals behorende bij dit rapport en de berekeningen. De berekeningen en bespiegelingen die in dit rapport worden gepresenteerd hebben alle betrekking op rwzi's van 100.000 i.e. in een groene-weide-situatie. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verschillen in de uitgangspunten tussen slibketenstudie I en II en de verschillen met de MJA-3.

2.2 VERGELIJKING MET DE UITGANGSPUNTEN VAN SLIBKETENSTUDIE I

Verschillen in de uitgangspunten van slibketenstudie I (2005):

- 1 i.e. à 54 g BZV komt overeen met 1,40 i.e. van 150 gTZV/dag; dit is het gevolg van de aannames die over de samenstelling van het afvalwater zijn gemaakt;
- voor de waardering van elektriciteit uit zuiveringsslib wordt uitgegaan van een elektrisch rendement van 47% o.b.v. de volgende brandstofmix van 2009:

• kolen	21% (E-rendement= 40%);
• aardgas	59% (E-rendement= 50%);
• nucleair	6%
• overige fossiele brandstoffen	5%
• duurzaam	9%
- de P-eis voor een rwzi van 100.000 i.e. wordt gehandhaafd op 1 mg/l. Dit wordt beschouwd als de Europese stand der techniek;
- warmte geproduceerd door gasmotoren (WKK-installatie) wordt intern gebruikt voor het op temperatuur houden van de gistingstanks. De resterende warmte wordt in de modellering beschouwd als niet bruikbaar. Energie nodig voor eventuele koeling, wordt eveneens buiten beschouwing gelaten;
- op de rwzi geproduceerde energie (in alle vormen) wordt alleen als benutting meegeteld indien hiermee daadwerkelijk elders het gebruik van fossiele energie wordt vermeden (en niet alleen als het kan);
- indien het gebruik van restwarmte uit externe stromen van toepassing is, zal in de rekenmodellen een verrekening plaatsvinden naar het vermeden gebruik van fossiele energie;
- indien energierijke reststromen (bijv. bij co-vergisting) worden toegepast, zal in de rekenmodellen een verrekening plaatsvinden naar het vermeden gebruik van fossiele energie;
- bij de inzet van gedroogd slib in een cementoven wordt uitgegaan van de vervanging van kolen;
- levering van laagwaardige warmte 'buiten de poort' van de rwzi is niet meegenomen in de bespiegelingen, omdat het te locatiespecifiek is.

In tabel 2.2 zijn de kengetallen weergegeven voor energiegerelateerde prijzen.

2.3 VERGELIJKING MET DE UITGANGSPUNTEN VAN DE MJA-3

Voor het opstellen van de Energie Efficiency Plannen (EEP's) het kader van de MJA-3, hebben de waterschappen bij hun berekeningen voornamelijk eigen uitgangspunten en aannames gehanteerd. De eigen uitgangspunten en aannames zijn vastgelegd, maar kunnen voor elk waterschap verschillend zijn. In het kader van de MJA-3 zijn wel enkele standaard uitgangspunten opgegeven.

Deze waarden zijn opgenomen in tabel 2.1 en komen overeen met de waarden die in de rekenmodellen van de slibketenstudie zijn gehanteerd.

TABEL 2.1 GEHANTEERDE STOOKWAARDE EN CO₂-EMISSIEFACTOR IN DE MJA-3 EN DE SLIBKETENSTUDIE

	Eenheid	Stookwaarde GJ/eenheid	CO ₂ -emissiefactor kg CO ₂ /GJ
Aardgas	Nm ³	0,03165	56,8
Elektriciteit	MWh	9	74,6
Gas-/dieselolie	ton	42,7	74,3
Methaan	Nm ³	0,0359	54,9
Primaire energie	TJ	1000	56,1
Rwzi biogas	Nm ³	0,0233	84,2

In tabel 2.2 zijn de aangehouden kengetallen voor energiekosten gegeven, waarbij de waarden in slibketenstudie I en II met elkaar zijn vergeleken.

TABEL 2.2 AANGEHOUDEN KENGETALLEN VOOR ENERGIE

Parameter	Slibketenstudie I Aangenomen waarde ¹⁾ (€)	Eenheid	Slibketenstudie II Aangenomen waarde ¹⁾ (€)
Elektriciteitsverbruik	0,05	per kWh	0,135
Terugleververgoeding elektriciteit	0,03	per kWh	0,08
Diesel	0,90	per liter	0,90
Aardgas	0,17	per m ³	0,30
Stoom (155°C, 5 bar) ²⁾	5,37	per GJ	10,40
Water	1,00	per m ³	1,00
Houtchips	11,50	per m ³	23,00
Zuivere zuurstof	40,00	per ton	40,00

¹⁾ bedragen inclusief BTW.

²⁾ uitgaande van een ketelrendement van 90%.

Bij de MJA-3 zijn geen energieverbruiken toegerekend aan de gebruikte chemicaliën, omdat het niet beschouwd kan worden als primaire energie. Toch mogen maatregelen die het energieverbruik beperken worden opgevoerd als energiebesparende maatregelen. Daarom is in deze studie het verbruik van chemicaliën als energieverbruik opgevat. De daarbij gehanteerde waarden zijn gegeven in tabel 2.3.

TABEL 2.3 ENERGIEVERBRUIK BIJ PRODUCTIE VAN CHEMICALIËN¹

Chemicaliën	MJ/kg
Natronloog (NaOH)	17,0
IJzerchloride (per kg Fe)	15,7
Zoutzuur (HCl)	6,2
Polyelectroliet (per kg)	16
Methanol (100%)	20

De voor de berekening gebruikte afvalwaterkarakteristieken zijn samengevat in tabel 2.4.

TABEL 2.4 AFVALWATERGEGEVENS

Parameter	Eenheid	Waarde
Debiten		
DWA	m ³ /h	1.200
RWA	m ³ /h	4.400
Totale aanvoer	m ³ /dg	20.206
Concentraties		
CZV	mg/l	523
BZV	mg/l	191
Nkj	mg/l	48
Pt	mg/l	8
OB	mg/l	191

Deze afvalwaterkarakteristieken zijn ook gebruikt in de studie naar de Energiefabriek.

3

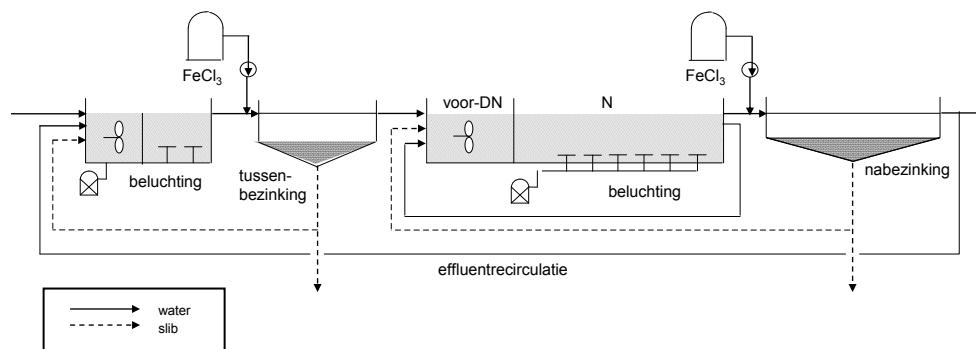
SELECTIE VAN UITGEWERKTE TECHNIEKEN

In dit hoofdstuk worden de technieken beschreven die in beschouwing zijn genomen bij de selectie van de nader uit te werken systemen. Allereerst wordt de techniek kort beschreven, daarna volgt een korte beschouwing van de voor- en nadelen en wordt ingegaan op het ontwikkelingsstadium van het proces.

3.1 TWEETRAPS ACTIEFSLIBPROCES

Het tweetraps actiefslibproces (ook wel A/B proces genoemd)⁴ bestaat feitelijk uit twee actiefslibsystemen achter elkaar. Het eerste systeem is hoog belast en verwijdert met betrekkelijk weinig energie-inbreng een groot deel van de organische vervuiling en van de zwevende stof. Er vindt verwijdering plaats door ab- en adsorptie, maar ook door oxidatie van eenvoudig afbreekbare CZV en BZV. Hierdoor kan het volume van de tweede of B-trap worden beperkt. In de tweede trap vindt de stikstofverwijdering plaats, en omzetting van de rest van de organische componenten. Een schematische weergave van het proces wordt gegeven in figuur 3.1. Door het toepassen van effluentrecirculatie vindt denitrificatie voor een groot deel plaats in de eerste trap.

FIGUUR 3.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET TWEETRAPS ACTIEFSLIBPROCES



VOOR- EN NADELEN

Voordelen van het tweetrapsproces zijn de relatief lage investeringen en het lage energieverbruik. De moeilijkheid om tot lage effluentconcentraties te komen, met name voor stikstof, kan als een belangrijk nadeel worden opgevat.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Er zijn meerdere rwzi's in Nederland die volgens het tweetrapsprincipe zijn opgezet en worden bedreven, te weten de rwzi's Dokhaven, Nieuwveer, Utrecht en Garmerwolde. Het principe ligt volledig in lijn met de trend om meer energie terug te winnen uit het te behandelen afvalwater.

3.2 MICROZEVEN

Door influent te zeven met microzeven (poriegrootte < 500 µm) kan bespaard worden op zuiveringskosten. Het heeft ook een aanzienlijk effect op de productie van zuiveringsslib.

Het residu dat bij het zeven vrijkomt, kan mechanisch worden ontwaterd en thermisch worden gedroogd om er een secundaire brandstof van te maken, bestemd voor bijvoorbeeld kolen-gestookte energiecentrales.

Het voorbehandelen van influent door het toepassen van filtratie of zeping is al enige tijd geleden onderzocht⁵. Toen werd geconcludeerd dat het mogelijk was, maar dat verder onderzoek nodig was. Recent onderzoek is veel positiever.

VOOR- EN NADELEN

De reductie in de hoeveelheid zwevende stof naar de beluchting levert belangrijk ruimte- en kostenvoordeel op. Een gering nadeel is het hogere energieverbruik ten opzichte van voorbe-zinking, maar dit wordt gecompenseerd door de voordelen. Terughoudendheid ten aanzien van het mogelijk intensieve onderhoud is volgens recent onderzoek⁶ niet op zijn plaats.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Momenteel houdt een STOWA project zich bezig met microzeving van het influent. De resul-taten van het onderzoek in Nederland zijn nog niet officieel gepubliceerd. Vooralnog wordt dus gebruik gemaakt van tussenrapportages met daarin de eerste bevindingen. De model-parameters die hier worden gebruikt zijn grotendeels gebaseerd op de resultaten van dit onderzoek^{iv}. Verder zijn gegevens beschikbaar van leveranciers, (voornamelijk Salsnes-filter), en is er patentinformatie (WO 94/26387).

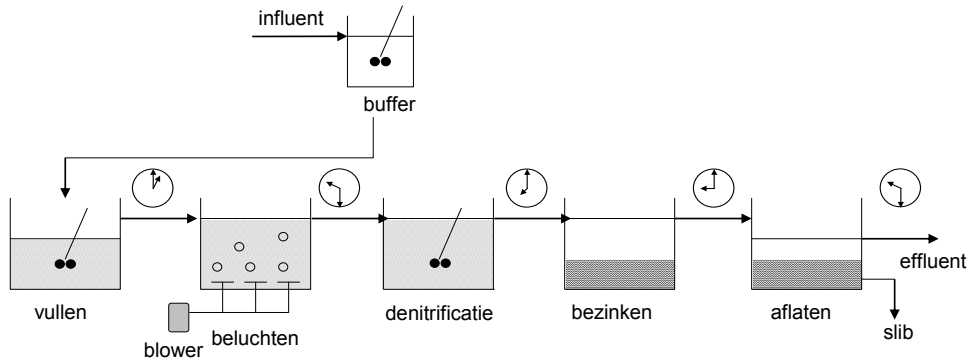
3.3 NEREDA

Nereda[®] is een innovatieve zuiveringstechnologie (door DHV gepatenteerd) die het huishou-delijk en bedrijfsafvalwater met circa 20 - 40% minder energie zuivert waarbij gebruik wordt gemaakt van aëroob korrelslib⁷. Conventioneel slib groeit in vlokken, bezinkt langzaam en laat zich moeilijk scheiden van gezuiverd afvalwater. De bacteriën in een Nereda[®]-installatie groeien in korrels, waardoor bezinkruimte achterwege kan blijven, en het zuiveringssysteem minder ruimte in beslag neemt. Nereda[®] maakt het mogelijk om bestaande conventionele installaties eenvoudig uit te breiden.

De bedrijfsvoering is vergelijkbaar met die van een *sequencing batch reactor* (SBR) met gewoon (vlokkig) slib⁸, behalve dat de cyclustijden anders zijn en het slibgehalte hoger, door de goede bezinkbaarheid van het slib. In Dinxperlo worden de volgende cyclustijden gehanteerd: vullen en aflaten gecombineerd: circa 1 uur, beluchten / mengen 1 tot 3 uur, bezinken 0,25 tot 0,5 uur. Richtlijnen voor het ontwerp van SBR-reactoren^{9,10} kunnen voor de berekeningen worden toegepast. Voor de Nereda[®] zullen aangepaste dimensioneringsgrondslagen voor het slibgehalte, de bezinksnelheid en voor de beluchting geldig zijn. Een Nereda[®]-reactor wordt vaak toegepast in combinatie met een nabehandelingsstap, die kan bestaan uit lamellen-bezinkers, trommelzeven of zandfilters. De werking van het proces is schematisch weergegeven in figuur 3.2.

FIGUUR 3.2

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN SBR PROCES. IN HET NEREDA® PROCES WORDEN AFLATEN EN VULLEN GECOMBINEERD



VOOR- EN NADELEN

Het Nereda®-systeem levert belangrijke ruimtewinst en bij grotere installaties ook financiële winst op ten opzichte van een conventioneel actiefslibstelsysteem. De intensieve monitoring en besturing die inherent is aan een discontinue bedrijfsvoering kan als een nadeel worden opgevat.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

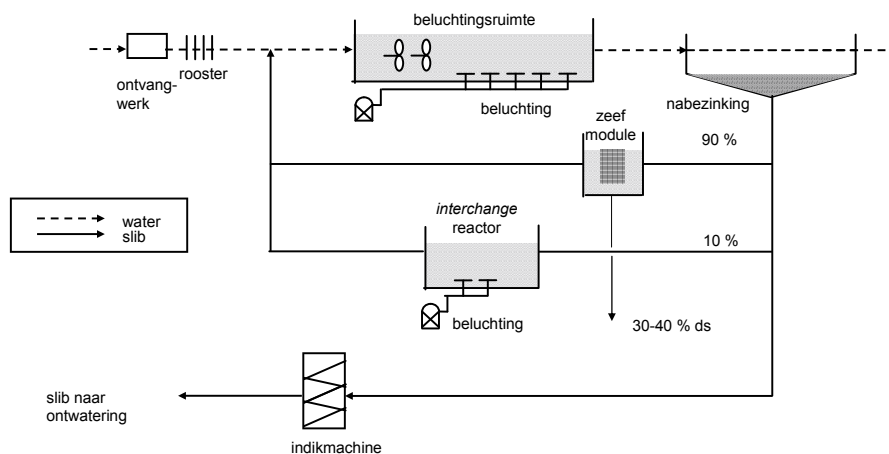
STOWA heeft in 2003 de duurzame mogelijkheden van de Nereda® technologie onderkend en heeft een ontwikkelingstraject samen met de TU Delft en DHV doorlopen. Verschillende pilot-onderzoeken zijn uitgevoerd om in Nederland op afvalwaterzuiveringen het effect van het korrelslib te kunnen demonstreren. De eerste full-scale Nereda installatie wordt bij de rwzi Epe in 2011 opgestart.

3.4 CANNIBAL

Het Cannibal® proces beoogt de slibproductie te reduceren door een grotendeels anaëroob proces. In een deelstroom naast de retourstroom verblijft een deel van het retourslib zekere tijd in een reactor. Hierin wordt met intermitterende beluchting voorkomen dat de redoxpotentiaal te laag wordt.

Het biologische mechanisme achter de slibreductie is nog niet duidelijk. Het vermoeden is dat in de reactor hydrolyse en verzuring optreedt, door anaërobe en facultatieve bacteriën. Deze processen zijn te vergelijken met de eerste afbraakprocessen bij slibgisting, compostering of aërobe stabilisatie.

Een trommelscherm behandelt eerst een deelstroom van het retourslib of er wordt een deelstroom van het actief slib gefilterd. Het verwijderde materiaal is enigszins te vergelijken met het materiaal dat tijdens de voorbehandeling met microzeven wordt verwijderd. Het materiaal dat is gehydrolyseerd in de reactor, wordt vervolgens geoxideerd in de beluchtingsruimte. Bij het niet-toepassen van voorbezinking is de besparing het grootst.

FIGUUR 3.3 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET CANNIBAL[®] PROCES EN DE POSITIE IN HET ZUIVERINGSSCHEMA

Bij toepassing van het Cannibal[®]-proces zou de reductie in de slibproductie zeer groot zijn, in de orde van grootte van 60 - 70%, tot nog wel hogere waarden. Dit is recentelijk in Nederland in pilotinstallaties ook aangetoond^{11,12}. Deze reductie gaat vermoedelijk ten koste van een toename van het energieverbruik in de beluchte ruimte, want een groot deel van de hydrolyseproducten zal worden geoxideerd in de beluchte ruimte. Er zouden aanwijzingen zijn dat er zelfs sprake kan zijn van energiebesparing doordat facultatieve bacteriën in het actief slib een lagere endogene respiratiebehoefte hebben¹³. De oxidatie van slib lijkt min of meer te vergelijken met aërobe stabilisatie, behalve dat in de Cannibal[®]-reactor oxidatie van de gevormde hydrolyseproducten niet in de tank zelf plaatsvindt, maar in de beluchte ruimte¹⁴. Een deel van de geclaimde winst gaat dus verloren aan energie voor de toegenomen luchtbehoefte in de aërobe ruimte.

Het proces is gepatenteerd door Siemens. Gezien de onbekendheid van de optredende fenomenen, kan het proces het beste als een 'black box' worden opgevat. Beschrijvende parameters zijn:

- verbruik van energie voor de beluchting;
- afbraak van het slib-droge stof;
- toename van CZV, N_{KJ} en TP in de terug te voeren stroom;
- afname van de energie die benodigd is voor de ontwatering.

De Cannibal[®]-reactor bestaat uit de volgende elementen:

- in- en uitvoer;
- zeping van het slib, die echter niet altijd noodzakelijk wordt geacht, en geen onderdeel van de reactor is;
- *interchange* reactor;
- beluchting;
- menging.

De *interchange* reactor is uitgevoerd als een SBR-reactor met grove bellenbeluchting die wordt gestuurd op de redoxpotential. Deze reactor verbruikt enige energie.

Het extra energieverbruik in de hoofdlijn is hoogstwaarschijnlijk direct gerelateerd aan de mate van afbraak van het slib. Net als bij slibgisting zal door de afbraak van slib BZV en stikstof vrijkomen, dat ook weer verwijderd dient te worden, en dat dus ook energieverbruik in de hoofdlijn met zich meebrengt.

VOOR- EN NADELEN

De aanzienlijke slibreductie is natuurlijk het voornaamste voordeel van de Cannibal[®]. Nadelen zijn het grotere energieverbruik, maar ook de geringe slibproductie kan als een nadeel worden opgevat. De productie van zuiveringsslib is namelijk één van de weinige manieren om zware metalen uit het afvalwater te verwijderen. De goeddeels onbekende investeringen in het systeem kunnen mogelijk een belet zijn bij de toepassing.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Pilotproeven zijn uitgevoerd en de slibreductie is aangetoond. Binnenkort zal de rwzi Zeevolde zijn voorzien van een Cannibal[®]-reactor op praktijkschaal.

3.5 ANAMMOX IN DE HOOFDLIJN

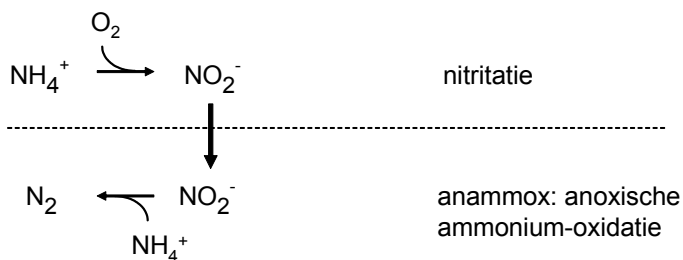
Anammox in de hoofdlijn is een proces waarin de verwijdering van organische stof plaatsvindt in een actiefslibstelsysteem met korte slibleef tijd, en waarin de stikstof wordt verwijderd met behulp van een ééntraps nitritatie - Anammox proces.

Er is veel belangstelling voor een nog te testen proces waarin de verwijdering van organische stof gebeurt in een actiefslibstelsysteem met korte slibleef tijd, en waarin de stikstof wordt verwijderd met behulp van een ééntraps nitritatie - Anammox proces.

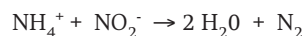
Anammox is anoxische oxidatie van ammonium door autotrofe Anammox bacteriën. Het proces is gebaseerd op de reactie van nitriet met ammonium (zie figuur 3.4).

FIGUUR 3.4

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE REACTIES IN EEN NITRITATIE-ANAMMOX SYSTEEM



De vereenvoudigde reactievergelijking van dit proces is:



De Anammox bacteriën gebruiken ammonium, nitriet en bicarbonaat als substraat. Het bicarbonaat fungeert hierbij als C-bron voor de celopbouw. De oxidatie van nitriet tot nitraat zorgt voor de benodigde elektronen om CO₂ te reduceren tot organisch koolstof. De volledige reactievergelijking is als volgt¹⁵:



In het proces wordt circa 10% van het ammonium omgezet in nitraat (afhankelijk van de slibopbrengst die weer een functie is van de slibleeftijd), het resterende wordt omgezet in stikstofgas. De optimale condities voor deze bacteriën zijn een pH tussen de 7 en 8,5 en temperatuur van 30 - 37°C.

Ten aanzien van de ontwikkeling van lachgas kan worden opgemerkt dat deze een belangrijk nadeel van nitritatie-systemen vormt. In een 'normale' rwzi wordt circa 0,08% (kg N₂O per kg influent N) van het stikstof in het influent omgezet tot N₂O gas. Dit is een voorlopige waarde, gebaseerd op slechts enkele metingen¹⁶. De emissie vanuit deelstroombehandeling is ook onderzocht. Een SHARON systeem heeft een N₂O-emissie van circa 1,7% van de behandelde N, een Anammox systeem 0,6%¹⁷ en een ééntraps nitritatie-Anammox systeem 1,2%¹⁸.

Bij een deelstroom van circa 20% van de aangevoerde N zal de emissie van lachgas voor een 'normale' rwzi toenemen van circa 0,08% tot 0,40% bij toepassing van een SHARON. Bij toepassing van een nitritatie-Anammox systeem neemt dit toe tot 0,30%. Dit is een toename met respectievelijk een factor 5,0 en 3,8. Gezien het belang van de emissie van lachgas (300 x grote bijdrage aan het broeikas effect dan CO₂) heeft het zin de emissie van lachgas op te nemen in beschouwingen over duurzaamheid en emissiereductie van broeikasgassen op rwzi's.

Er kan aan de hand van deze voorlopige emissiegetallen worden berekend dat een zeer aanzienlijke reductie in de energievraag voor de beluchting noodzakelijk is voordat de stikstofverwijderende deelstroomtechnieken 'klimaatneutraal' genoemd mogen worden. Let wel dat dit een voorlopige conclusie is: de kerngetallen van de N₂O-emissies zijn nog niet definitief vastgesteld. Onderzoek hiernaar is gaande.

VOOR- EN NADELEN

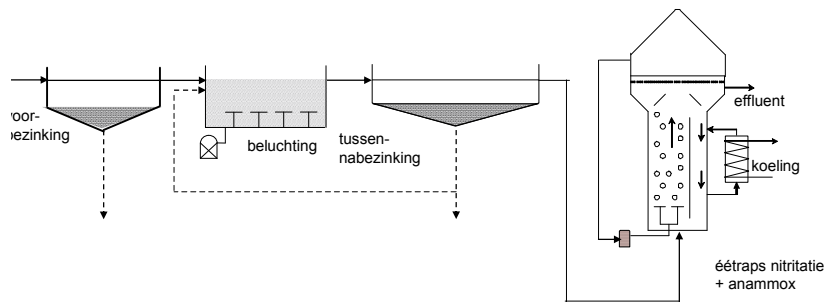
Ontkoppeling van de CZV-verwijdering en de N-verwijdering is energetisch gezien zeer gunstig. Het geringe energieverbruik voor de verwijdering van stikstof en de geringe ruimte voor de verwijdering van organische vervuiling kunnen als belangrijke voordelen van dit systeem worden gezien. De emissie van lachgas kan als een belangrijk nadeel worden opgevat. Het is nog niet duidelijk hoe de CO₂-uitstoot (inclusief lachgas) dient te worden beoordeeld. Ook het feit dat altijd circa 10% nitraat wordt gevormd is een nadeel. Lage effluentgehalten voor stikstof maken dus verdere behandeling noodzakelijk.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Het proces kan goed worden toegepast voor deelstroombehandeling¹⁹ en dat wordt in de praktijk al op verschillende locaties gedaan²⁰. Het probleem is dat de bacteriën buitengewoon langzaam groeien, de verdubbelingstijd bedraagt 11 dagen. Bij een lagere temperatuur zal de groei nog aanzienlijk langzamer verlopen. In figuur 3.5 is het nog grotendeels hypothetische proces weergegeven, waarbij opgemerkt dat voorbezinking vanzelfsprekend niet noodzakelijk is. Er is grote belangstelling voor de toepassing van het proces in de hoofdstroom.

FIGUUR 3.5

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN ACTIEFSLIBSYSTEEM MET GECOMBINEERDE NITRITATIE-ANAMMOX IN DE HOOFDLIJN

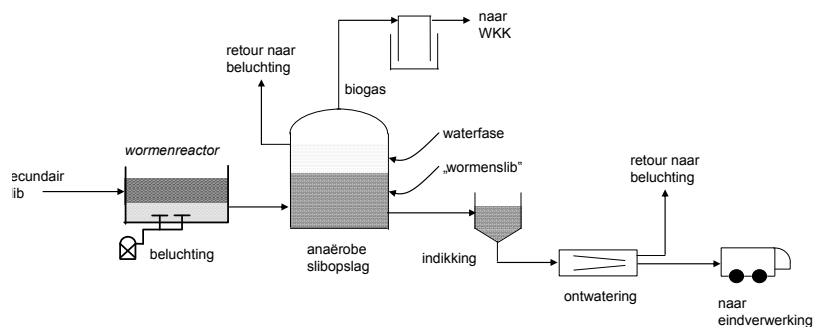


3.6 WORMENREACTOR

Reductie van slib met behulp van oligochaete wormen is al lang onderwerp van onderzoek²¹. De oligochaete wormen vermenigvuldigen zich door deling, en eten eigenlijk alle soorten slib, natuurlijk wel afhankelijk van de voedingswaarde en de verhouding tussen organisch en anorganisch materiaal. De wormen bevinden zich niet in de zuivering zelf, maar doen hun werk in een wormenreactor bij de slibverwerking. In een nieuw reactorconcept zijn de wormen geplaatst in een gaas, hierdoor worden de wormen in de reactor gehouden en kunnen de compacte wormenkeutels gescheiden van het afvalslib opgevangen worden. Een schematische opzet is te zien in figuur 3.6.

FIGUUR 3.6

SCHEMATISCHE OPZET VAN SLIBLIJN MET WORMENREACTOR



Eerder werd geconcludeerd dat het proces niet goed beheersbaar was²¹, maar daar is kennelijk verandering in gekomen. Systemen die een scheiding verzorgen tussen (te hergebruiken) wormen²², wormenfeces en verwekt slib worden momenteel nog niet als een bewezen techniek gezien. Van de circa 73% afbraak van het slib worden wormen geproduceerd (circa 3% van de aangeboden hoeveelheid droge stof) en wormenfeces (circa 25% van de aangeboden droge stof)²³. Een probleem in de praktijk is het vereiste lage ammoniumstikstofgehalte en de zuurstofvoorziening²⁴.

Voor- en nadelen

De reductie van slib is het voornaamste voordeel van dit systeem. De moeilijke beheersbaarheid en procesregeling kunnen als de belangrijkste nadelen worden opgevat.

Ontwikkelingsstadium

- Langdurige pilotproeven zijn uitgevoerd op de rwzi Wolvega, waar het proces in een pilotproef is toegepast²⁵. Het daarop geënte systeem (BOS: *Biodedegradation of Oligochaete-treated Sludge*) bestaat uit behandeling in een reactor met geïmmobiliseerde wormen, gevolgd door vergisting van het slib, bestaande uit wormen, wormenfeces en het overgebleven slib in een afgesloten slibopslag of een slibvergister (koud). De totale drogestofreductie na vergisting bedraagt 50 tot 70%.

3.7 HOGEDRUK GISTING

Proeven bij het Van Hall Instituut in Leeuwarden hebben uitgewezen dat de druk bij het gistingproces kan oplopen tot 24 bar. Als gevolg van de hoge druk lost steeds meer van de geproduceerde CO₂ op in de waterfase en dissocieert het tot bicarbonaat. Het geproduceerde biogas bestaat bij een druk boven de 5 bar voor meer dan 90% uit methaan, terwijl dit bij atmosferische druk doorgaans 55 - 65 % is.

Het proces biedt de volgende perspectieven:

- geproduceerd biogas kan zonder kwalitatieve opwerking (90% methaan) en zonder toepassing van een compressor in een decentraal gasnet worden gebracht;
- de hoge druk biedt mogelijkheden voor toepassing van nanofiltratie of omgekeerde osmose voor zuivering van de waterfase, zonder gebruik te maken van pompen;
- de hoge druk kan bijdragen aan een betere indikking van het biologische slib door het wegpersen van de waterfase;
- de verzadiging van kooldioxide in de waterfase leidt tot de mogelijkheid om het broeikasgas af te vangen en op te slaan;
- het gehalte aan waterstofsulfide (H₂S) kan op een vergelijkbare wijze als het CO₂, worden verlaagd, waardoor biogas met een zeer laag gehalte aan H₂S kan worden geproduceerd.

VOOR- EN NADELEN

Het hoge methaangehalte van het biogas, tot aardgaskwaliteit, is het voornaamste voordeel, en de hoge investeringskosten zijn het voornaamste nadeel.

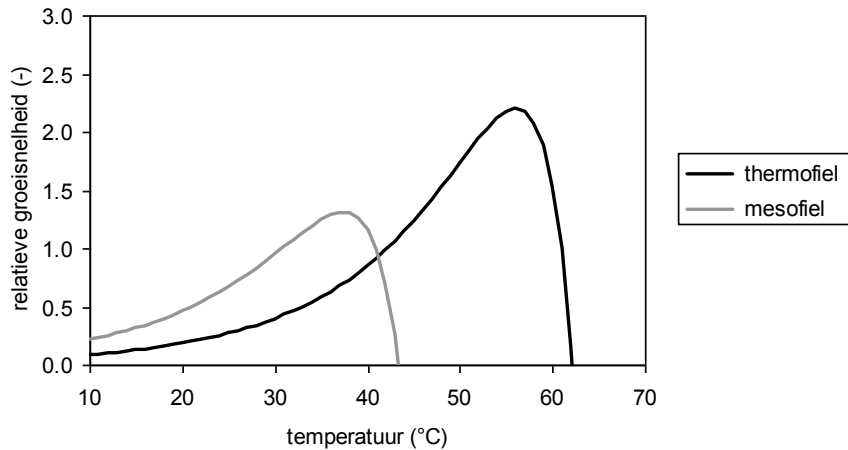
ONTWIKKELINGSSTADIUM

Proeven zijn uitgevoerd op laboratoriumschaal.

3.8 THERMOFIELE GISTING

Bacteriën zijn doorgaans mesofiel, dat wil zeggen, hun optimale activiteit vertonen ze in het temperatuurgebied van 28 - 40°C. Bij hogere temperaturen, van circa 45 tot 70°C en nog wel hoger, vertonen andere bacteriën de hoogste activiteit, de thermofiele bacteriën. Deze bacteriën hebben, inherent aan de hoge temperaturen, een hogere activiteit dan mesofiele bacteriën. In figuur 3.7 wordt het verloop van de activiteit bij mesofiele en thermofiele bacteriën schematisch weergegeven.

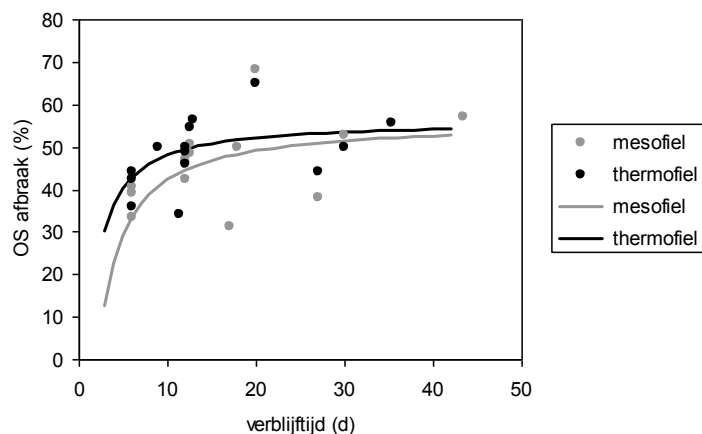
FIGUUR 3.7 VERLOOP VAN DE ACTIVITEIT VAN MESOFIELE EN THERMOFIELE BACTERIËN



Thermofiele gisting wordt doorgaans toegepast bij temperaturen tussen 50 en 60°C. Thermofiele gisting wordt soms wel als voorbehandelings- en pasteurisatiestap toegepast.

Thermofiele gisting levert weliswaar snellere omzetting op dan mesofiele, maar het is de vraag of er ook méér wordt afgebroken. Data uit een literatuuroverzicht²⁶ geven daar weinig aanleiding toe, zie figuur 3.8. Thermofiele vergisting is wel iets gevoeliger voor de ammoniakconcentratie, maar verder is er weinig reden om aan te nemen dat thermofiele gisting minder stabiel zou zijn dan mesofiele.

FIGUUR 3.8 THEORETISCHE (CURVES) EN PRAKTISCHE (PUNTEN) AFBRAAK VAN ORGANISCHE STOF TIJDENS DE SLIBGISTING ALS FUNCTIE VAN DE VERBLIJFTIJD



In een recente publicatie wordt een aanzienlijke toename van de gasproductie bij de overstap van mesofiele naar thermofiele bedrijfsvoering geclaimd, van 0,48 naar 0,60 m³ biogas per kg organische droge stof. Het is echter onduidelijk of de toename wel echt aan deze overstap, en niet aan de (gelijktijdige) overstap op pre-precipitatie is toe te schrijven²⁷.

VOOR- EN NADELEN

De lagere investeringen (door de lagere verblijftijd) zijn het voornaamste voordeel van thermofiele gisting. De gevoeligheid van het proces voor verstoring wordt doorgaans als het voornaamste nadeel aangemerkt.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Thermofiele vergisting is een in de praktijk toegepaste technologie.

3.9 THERMISCHE HYDROLYSE

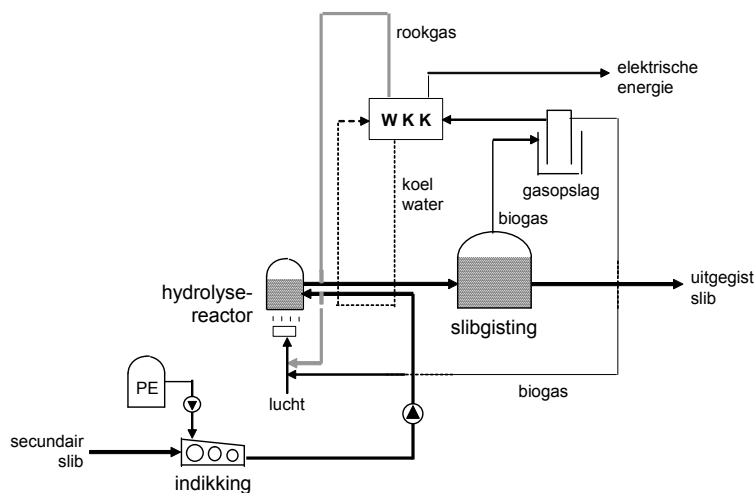
Thermische hydrolyse van slib bij verhoogde druk en temperatuur, heeft in zijn algemeenheid de volgende effecten:

- de afbreekbaarheid van secundair slib neemt sterk toe, door de bijna complete hydrolyse van het celmateriaal²⁸, de afbraak van organisch stof bedraagt bij een verblijftijd van 15 dagen 62%, dat is aanzienlijk hoger dan zonder hydrolyse²⁹; de afbreekbaarheid van primair slib zou nauwelijks toenemen²⁸;
- de biogasproductie (uit secundair slib) neemt dus ook sterk toe, met 40 - 50%³⁰;
- door de hydrolyse verlaagt de viscositeit sterk, en kunnen hoge drogestofconcentraties in de voeding van de gisting worden gehandhaafd, van bijvoorbeeld 11% tot 12%²⁹;
- de verblijftijd in de slibgisting kan sterk worden verlaagd, een verblijftijd van drie dagen kan worden toegepast³¹, hoewel een verblijftijd van 9 tot 12 dagen meer gebruikelijk is³²;
- de ammoniakconcentraties stijgen sterk door de hogere drogestofconcentratie en de toegenomen hydrolyse;
- de ontwaterbaarheid van het slib verbetert sterk³¹. Testresultaten geven een toename van het drogestofgehalte na ontwatering van circa 22 tot circa 29% aan³³.

In figuur 3.9 is een schematische opzet van de inpassing van de thermische hydrolysereactor in de sliblijn te zien. Opwarming van het ingaande slib kan plaatsvinden door warmtewisseling met het uitgaande slib, warmtewisseling met de WKK-installatie en door rookgassen toe te voegen aan de verbrandingslucht van de ketel die biogas stookt voor de opwarming tot de gewenste temperatuur (140 - 160°C).

De hoeveelheid biogas die dient te worden gestookt hangt af van de ontwateringsgraad van het ingaande slib, van de bedrijfstemperatuur van de hydrolysereactor en van de toepassing van warmtewisseling van uit- en ingaande stroom. Het thermische hydrolyseproces kan in verschillende vormen worden uitgevoerd.

FIGUUR 3.9 SCHEMATISCHE OPZET VAN THERMISCHE HYDROLYSE



Het Cambi[®] proces is een *batch* proces, zonder warmtewisseling van de in- en uitgaande stroom van de reactor. Een belangrijk doel van het proces is het mogelijk maken van landbouwkundige toepassing van het slib. Door de hoge kosten van de installatie en vooral vanwege de hoge energievraag is het bijna noodzakelijk het slib van de voren te ontwateren met trommelzeef of een zeebandpers, tot ongeveer 18 tot 20%. Bij lagere drogestofgehalten wordt de energievraag van de opwarming zo hoog, dat teveel biogas nodig is voor de opwarming. In de grote praktijkinstallatie van rwzi Ringsend te Dublin (1,6 miljoen i.e.) bleek dat de hoeveelheid energie die voor het proces benodigd is voor 80% onttrokken kan worden aan de warmteproductie (koelwater en rookgassen) van de WKK-installatie³⁴. Na de hydrolyse kan eventueel enige verdunning plaatsvinden. Eén en ander impliceert wel dat twee keer ontwatering moet worden toegepast, vóór en na de slibgisting. Na de hydrolyse wordt verdunning toegepast, die ook helpt voor het bereiken van de gewenste vergistingstemperatuur van 39°C.

Bij een ingaande drogestofconcentratie van ongeveer 12% droge stof is al circa 40% van het biogas nodig, tenzij warmtewisseling van uit- en ingaande stroom wordt toegepast. Dit wordt wel toegepast bij twee andere systemen voor thermische hydrolyse, Biothelys[®] van Veolia, dat een *batch* proces is, en bij TurboTec[®] van Sustec, dat als een continuproces wordt bedreven.

VOOR- EN NADELEN

De verbetering van de slibafbraak en de slibontwatering zijn de voornaamste voordelen van de thermische hydrolyse. Nadelen zijn de investeringen en het feit dat het proces alleen toepasbaar is voor secundair slib.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Het Cambi[®] proces heeft zich op praktijkschaal bewezen. Momenteel vindt praktijkonderzoek plaats naar de mogelijkheid om het batch proces om te zetten in een continu proces. Een vergelijkbaar proces, bekend onder de naam Biothelys[®], wordt in Frankrijk op praktijkschaal bedreven. Het Turbotec[®] systeem wordt in Limburg op pilotschaal toegepast.

3.10 ENZYMATISCHE HYDROLYSE

Door toevoeging van enzymen, vooral cellulolytische enzymen die cellulose omzetten in glucose, wordt de vergistbaarheid van slib verbeterd. Net als bij andere voorbehandelingsmethoden heeft de voorbehandeling vooral effect op secundair slib.

VOOR- EN NADELEN

De verbeterde slibafbraak bij dezelfde verblijftijd of de kortere verblijftijd leidt tot meer biogas en minder slib, maar onduidelijkheid over de kosten en het effect van de enzymen kunnen als voornaamste nadelen worden aangemerkt.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Er is veel onderzoek uitgevoerd naar de effecten van de toevoeging van enzymen, waaronder een STOWA onderzoek in 1991. De werking van de enzymen is wel bewezen, vooral bij slib met een hoog gehalte aan cellulose, maar het effect is voornamelijk een hogere afbraaksnelheid die niet altijd opweegt tegen de hogere kosten.

3.11 CO-VERGISTING

Co-vergisten is gericht op het optimaliseren van het gistingsproces, waarbij het zuiverings-slib samen met andere, gemakkelijk afbreekbare organische reststoffen wordt vergist. Deze organische reststoffen kunnen bijvoorbeeld putvetten, *swill* of slib afkomstig uit de voedingsmiddelenindustrie. Deze optimalisatie wordt op verschillende rwzi's, die over een slibgisting beschikken, toegepast om wat extra biogas te kunnen produceren. De samenstelling van deze reststoffen bepaalt in grote lijn het effect op de energiebalans.

Daar het niet bekend is welke reststoffen bij het vergistingsproces betrokken zullen worden, is een nadere definiëring van de samenstelling niet mogelijk. Besloten is om deze technologie niet verder mee te nemen in deze studie.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Co-vergisten is bewezen technologie. Eventueel praktijkonderzoek richt zich voornamelijk op de specifieke reststoffen die men voornemens is mee te vergisten om de neveneffecten en de effecten op de energiebalans vooraf vast te stellen.

3.12 PRODUCTIE VAN GROEN GAS

Biogas en stortgas bestaan voornamelijk uit methaan en kooldioxide, CH_4 en CO_2 . Het CH_4 gehalte varieert van 50% tot 65%. Het restgas bestaat voornamelijk uit CO_2 en in lage concentraties H_2S , N_2 en O_2 . Het gas is altijd vochtig (H_2O). Daarnaast kan het gas vele sporenelementen bevatten, afhankelijk van de gebruikte biomassa in de vergister of het afval van de stort. De opwerking van het gas tot groen gas bestaat in ieder geval uit het verwijderen van zoveel CO_2 dat de verbrandingswaarde van het gas daarna identiek is aan de verbrandingswaarde van aardgas, zoals geleverd door Gasunie. Het gas heeft dan een CH_4 percentage van ongeveer 89%. Dat is hoger dan van aardgas, maar aardgas bevat ook butaan en propaan, terwijl groen gas uitsluitend CH_4 bevat. Bijna altijd is het nodig om ook H_2S en H_2O te verwijderen en stof en diverse sporen uit te filteren.

De technieken voor opwerking zijn onderscheidend in de manier waarop CO₂ uit het biogas wordt verwijderd, namelijk

- membraanscheiding;
- CO₂ absorptie (gaswassing);
- CO₂ adsorptie VPSA (Vacuüm Pressure Swing Adsorption);
- cryogeen.

Biogas dat bij slibgisting wordt geproduceerd kan op verschillende manieren worden ingezet:

- inzet voor verwarmingsdoeleinden in de nabije omgeving van de gistinginstallatie (gistingstanks, gebouwverwarming, nabijgelegen procesindustrie etc.);
- door opwerking tot aardgaskwaliteit (groen gas) en inbreng in het Nederlandse aardgasnet (lagedruk distributienet);
- door opwerking tot biomethaan voor toepassing elders (bijvoorbeeld als transportbrandstof). Dit kan in de vorm van Compressed BioMethane (CBM) of liquefied biomethane (LBM, ook wel bio-LNG of liquefied biogas (LBG)).

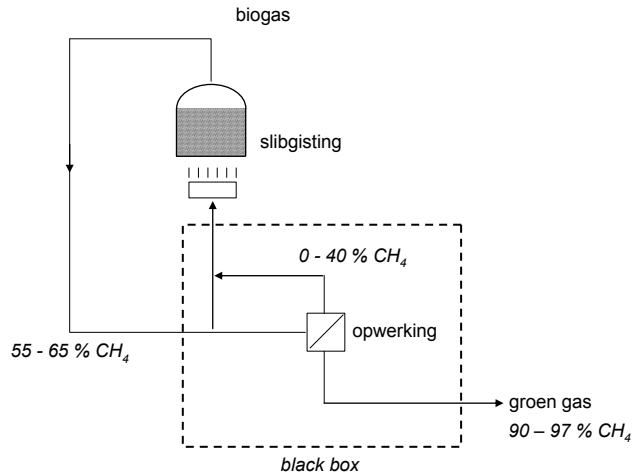
Voor de definitie van de verschillende begrippen wordt verwezen naar bijlage 2.

Er is veel belangstelling voor het opwerken van biogas tot een kwaliteit die zodanig is dat het gas ergens anders toegepast kan worden. Hiervoor dient het methaangehalte van het biogas dat níét nodig is voor de verwarming van de slibgisting te worden verhoogd tot bijna 100%. Er zijn verschillende technieken voor de opwerking van het gas:

- scheidingsmethoden kunnen de gasstroom scheiden in een stroom met de gewenste kwaliteit en een stroom met een aanzienlijk lagere methaanconcentratie, die weer kan worden gebruikt voor de opwarming van de slibgisting; de scheiding kan worden teweeggebracht door bijvoorbeeld *pressure swing* of *temperature swing*, waarbij door wisseling van de omstandigheden van druk of temperatuur de gewenste scheiding wordt teweeggebracht;
- adsorptiemethoden scheiden het CO₂ af uit het biogas; de overblijvende stroom is dan op de gewenste methaanconcentratie.

De vorming van groen gas kan voor de doelen van het huidige project worden opgevat als een *black box*, zie figuur 3.10. Er zijn geen gasverliezen opgenomen, deze zijn doorgaans minimaal³⁵.

FIGUUR 3.10 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE PRODUCTIE VAN GROEN GAS UIT BIOGAS



De opwerkingstechniek heeft in deze benadering alleen het ingaande biogas, het uitgaande biogas voor de opwarming van de slibgisting en de resterende hoeveelheid groen gas. De eventuele terugvoer van lagere kwaliteit biogas en de scheidingsmethode zelf vallen buiten het bestek van deze studie, en zijn voor de verdere berekeningen niet van belang.

Opwerking van biogas heeft als nadeel dat er binnen de inrichting geen warmte vrijkomt die ingezet kan worden om de gistingstanks op temperatuur te houden. Hieraan kan tegemoet worden gekomen door het gebruik van een warmtepomp. Warmtepompen nemen bij lage temperatuur warmte op die bij hoge temperatuur weer wordt afgegeven door toepassing van een compressor en turbine. De warmtepomp vraagt daarmee elektrische energie die thermische energie oplevert. De laagwaardige warmte-inhoud van bijvoorbeeld effluent (10 tot 25°C) kan daarmee worden opgewaardeerd tot warmte van circa 50°C. In energietermen kan de toevoer van een elektrisch vermogen van bijvoorbeeld 0,5 MW een thermisch vermogen van circa 2 MW opleveren. Het effluent daalt daarmee enkele graden (2 tot 5°C) in temperatuur. Andersom kan een warmtepomp ook voor koeling worden gebruikt.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Er zijn diverse technieken voor opwerking van biogas tot groen gas, sommige bewezen en andere nog in het onderzoek stadium.

3.13 LIQUEFIED BIOGAS (LBG)

Biomethaan is biogas dat is opgewaardeerd/gezuiverd tot >97% methaan. Als gevolg daarvan heeft biomethaan een hogere energie-inhoud dan groengas (84 - 88% methaan). Liquefied biogas (LBG), waarvoor ook wel de termen liquefied biomethane (LBM) of bio-LNG) worden gebruikt, is biomethaan dat vloeibaar is gemaakt door het te koelen tot ongeveer -160°C.

Het is goed mogelijk om van biogas, via biomethaan, liquefied biogas (LBG) te maken. In biogas zitten minder gassen dan in aardgas. De enige verontreinigingen zijn kooldioxide, H₂S en waterdamp, die gemakkelijk en goedkoop kunnen worden afgescheiden. Vervolgens wordt van het resulterende bio-methaan, LBG gemaakt. Van een kubieke meter bio-methaan kan 1,6 liter LBG worden gemaakt. Er gaat 2,38 liter LBG in een kilogram bio-methaan met een calorische waarde van meer dan 50 MJ. LBG is hiermee de vloeibare biobrandstof met een hogere energiedichtheid dan benzine of diesel per kg.

Vloeibaar bio-methaan is een hernieuwbare vloeibare biobrandstof met de volgende voordelen t.o.v. andere biobrandstoffen:

- LBG heeft een lagere uitstoot van fijn stof dan biodiesel en bio-ethanol;
- LBG geeft een lagere CO₂-uitstoot (well-to-wheel) dan biodiesel en bio-ethanol;
- LBG reduceert de NO_x-uitstoot tot bijna nul.

Aanvankelijk waren de kosten voor het vloeibaar maken van biogas op kleine schaal te hoog, maar geleidelijk worden SSL-installaties (Small Scale Liquefaction) haalbaar. Als er over SSL wordt gesproken, dan betreft dit nog altijd wel een schaalgrootte van minimaal 20.000 m³/dag. De kosten voor het vloeibaar maken van het bio-LNG bedragen dan 10 tot 20% van de kosten om het bio-LNG te produceren.

Ontwikkelingsstadium

De techniek is bewezen, maar de schaalgrootte en daarmee de kosten, zijn doorslaggevend.

3.14 LAGE TEMPERAATUUR DROGING (LTD)

Voor het drogen van mechanisch ontwaterd zuiveringsslib kan gebruik worden gemaakt van laagwaardige warmte (80 tot 90°C). Opgewarmde lucht kan door het slib worden geblazen, waarbij vocht wordt opgenomen. De droogdampen worden gecondenseerd en weer opgewarmd en opnieuw door het slib geblazen. Er wordt vooral gedacht aan het benutten van de warmte in het koelwater en de rookgassen die vrijkomen bij de WKK-installatie behorende bij de slibgisting. Het slib kan worden gedroogd tot circa 90% d.s.

Op sommige locaties is een grote hoeveelheid laagwaardige warmte beschikbaar, bijvoorbeeld warmte die vrijkomt bij een elektriciteitscentrale, een afvalverbrandingsinstallatie of een WKK-installatie. Deze warmte kan bijvoorbeeld vrijkomen in de vorm van koelwater met een temperatuur in de orde grootte van 80°C, in de vorm van rookgassen met een temperatuur veelal boven 150°C of in de vorm van lagedruk stoom. Het aftappen van lagedruk stoom uit de turbine resulteert in een afname van de elektriciteitsopbrengst, maar het verbranden van gedroogd zuiveringsslib levert een hoger elektrisch rendement op in vergelijking met het verbranden van niet-gedroogd zuiveringsslib.

Vaak wordt deze warmte nu niet nuttig toegepast en (deels) geëmitteerd of weggekoeld naar de omgeving. Het emitteren naar de omgeving kost vaak energie in de vorm van geforceerde lucht- of waterkoeling.

Technieken om slib te drogen met laagwaardige warmte benutten de beschikbare warmtestromen in combinatie met geforceerde ventilatie. De ventilatielucht wordt verwarmd bijvoorbeeld door indirecte warmtewisseling met het koelwater of door direct contact met de gasmotor. Vervolgens wordt deze onverzadigde lucht in contact gebracht met mechanisch ontwaterd zuiveringsslib. Het vocht in het slib verdampt onder adiabatische condities ($\Delta Q = 0$).

Onbenutte restwarmte met een voldoende hoog temperatuurniveau ($T > 80^\circ\text{C}$) is niet beschikbaar bij elektriciteitscentrales en AVI's. Wel is het mogelijk om door het aftappen van lagedruk stoom uit de turbine, warmte beschikbaar te maken voor het drogen van zuiveringsslib. Dit betekent wel dat de elektriciteitsopbrengst van de AVI of elektriciteitscentrale afneemt, maar het verbranden van gedroogd zuiveringsslib levert een hoger elektrisch rendement

op ten opzicht van het verbranden van niet-gedroogd zuiveringsslib. Dat wil zeggen dat het verlies aan elektriciteitsproductie door het aftappen van stoom wordt goedgemaakt door de hogere opbrengst aan elektriciteit in de biomassa- of elektriciteitscentrale.

Het gesloten ventilatiesysteem met condensatie en opwarming zorgt er tevens voor dat de guremissie van de installatie wordt beperkt. De stikstofemissie in de vorm van ammonium is minder of vergelijkbaar met het thermisch drogen (circa 1,5 kg N/ton d.s. behandeld slib).

VOOR- EN NADELEN

Het voornaamste voordeel van lage temperatuur droging is de mogelijkheid die geboden wordt om laagwaardige warmte te benutten, die anders weggekoeld had moeten worden. Bovendien zijn de investeringskosten relatief laag, omdat er geen bijzondere bouwmaterialen gebruikt hoeven te worden. Daar staat tegenover dat de installatie altijd afhankelijk is van de levering van restwarmte, dat de omvang van de installatie relatief groot is, stikstof geloosd wordt via het condensaat en er een afzet gevonden moet worden voor de gedroogde reststof als secundaire brandstof.

Afzet als secundaire brandstof is in Nederland mogelijk bij kolencentrales en cementovens, of speciale slibverbrandingsinstallaties. De kwikconcentratie kan echter een limiterende factor zijn. Behalve dat de kwikemissie-eis van 0,05 mg/m³, is de maximale toename van de kwikuitstoot van alle kolencentrales bij de verbranding van biomassa beperkt tot 30 kg kwik per jaar.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Lage temperatuur droging is een bewezen technologie. Onderzoek richt zich voornamelijk op de praktische inpassing van de combinatie van een geschikte (laagwaardige) warmtebron en droogtechniek.

3.15 PULVERIZING AIR DRYER (PAD) TECHNOLOGIE

De werking van de Pulverizing Air Dryer (PAD) berust op een combinatie van lage temperatuur droging en de verschillen in luchtdruk en lichtsnelheid (snelheidsgradiënten) die optreden in een cycloon. Het proces vindt trapsgewijs plaats in meerdere in serie geschakelde cyclonen.

Het te drogen slib wordt in de vorm van kleine deeltjes (maximale afmeting 3 cm) gedoseerd in een leiding met een hoge lichtsnelheid.

De temperatuur van de lucht ligt in de range van 40 - 50°C. De luchtstroom wordt naar een eerste cycloon geleid waar partiële droging plaatsvindt. De bovenloop van de cycloon bestaat uit vochtige lucht met een temperatuur van circa 30°C. De slibdeeltjes worden in de cycloon afgescheiden door de centrifugaalkrachten en via de onderuitloop van de cycloon weer via een luchtleiding naar de volgende cycloon gevoerd.

In de leidingen tussen de cyclonen wordt onderweg lucht toegevoerd om te helpen bij het droogproces. De toegevoerde lucht neemt in temperatuur toe, maar verhoogt de temperatuur van het ruwe product niet zodanig dat er veranderingen optreden aan de samenstelling van het te drogen materiaal. Dit beperkt het verlies aan organische componenten en beperkt de guremissie. Door de optredende schuifkrachten in de cycloon wordt het materiaal wel verder verkleind, waardoor de snelheid van het droogproces wordt bevorderd.

Na de tweede cycloon wordt de temperatuur van de ingebrachte lucht verhoogd in de range van 80 - 100°C en vindt verdergaande droging plaats. De bovenloop van de cycloon bestaat uit vochtige lucht van circa 55°C. De slibdeeltjes worden in de cycloon afgescheiden en doorgevoerd naar de volgende cycloon. De laatste cycloon zorgt uiteindelijk voor de afscheiding van het gereed product met een droge stofgehalte van circa 85%.

Ervaring heeft uitgewezen dat het vochtgehalte in het slib met 8 tot 15% is gedaald na het passeren van een cycloon. Afhankelijk van de aard van het te drogen materiaal worden vier tot acht cyclonen doorlopen, waarbij gebruik wordt gemaakt van twee tot drie warme luchtventilatoren met een luchtdebiet van circa 11.000 Nm³/h en een vermogen van 150 kW_e elk. Het energieverbruik is 70-80 kWh_e per ton afgescheiden water.

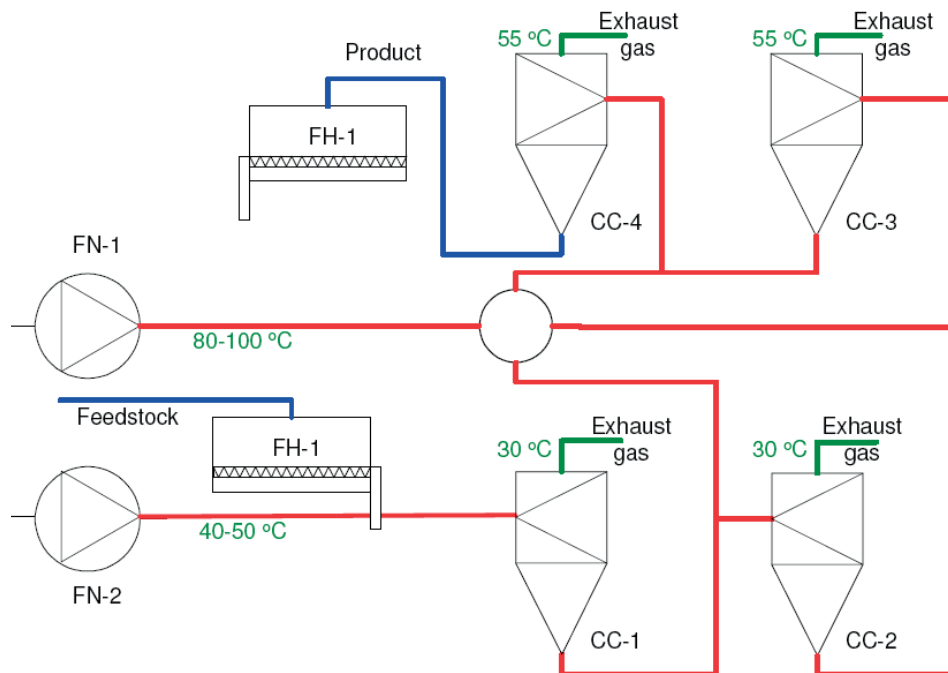
De niet-thermische PAD technologie zou de volgende voordelen ten opzichte van thermisch drogen hebben:

- het energieverbruik is aanzienlijk lager;
- de exploitatiekosten zijn aanzienlijk lager, lage energiekosten en lage onderhoudskosten vanwege normale temperatuur en weinig bewegende delen;
- lage investeringskosten en gering oppervlaktebeslag;
- minimale tot geen afgasbehandeling vereist;
- vochtgehalte in het eindproduct tot minder dan 20%;
- vrijwel geen verlies van vluchtige organische componenten;
- verlaagt de deeltjes grootte tot minder dan 200 µm als gevolg van optredende schuifkrachten in de cycloon.

Technische specificaties voor een installatie met een verwerkingscapaciteit van circa 5 ton/ uur inputmateriaal:

- twee of drie warme luchtventilatoren, 150 kW_e elk, afhankelijk van invoermateriaal en doorzet;
- per ventilator 11.000 Nm³/uur;
- vier tot acht cyclonen afhankelijk van de eigenschappen van het invoermateriaal;
- vochtgehalte reductie van 8 tot 15% per cycloon;
- afmetingen na vergruizing tot 200 µm;
- afmetingen input maximaal 3 cm;
- ruimtebeslag l x b x h = 15 x 15 x 10 m.

FIGUUR 3.11 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE PULVERIZING AIR DRYER (PAD)



ONTWIKKELINGSSTADIUM

Er is een installatie op praktijkschaal (5 tot 10 ton/uur) in bedrijf in Amerika, onder andere in Marietta in Oklahoma. Er zijn met succes praktijkproeven uitgevoerd met verschillende te drogen materialen. De referentielijst laat zien dat het input drogestofgehalte doorgaans hoger is dan 30% d.s.

3.16 SUPERKRITISCHE VERGASSING

Superkritische vergassing is een nieuwe technologie voor de productie van schoon stookgas uit natte biomassastromen³⁶. In het verleden is superkritische oxidatie voornamelijk gebruikt voor het vernietigen van chemisch afval. Superkritische vergassing is hierop een variant en wordt in vergelijkbare apparatuur toegepast.

Het proces wordt onder hoge druk bedreven op 200 - 400 bar en bij een temperatuur van 500 - 700 °C gedurende enkele minuten verhit. De aanwezige koolstofketens vallen onder deze omstandigheden uiteen, resulterend in een stookgas. Het geproduceerde stookgas bestaat voor het grootste gedeelte uit waterstof, kooldioxide en verder nog kleine hoeveelheden methaan. Het reactiemengsel wordt daarna afgekoeld en in een CO₂-absorber wordt de waterstof gescheiden van de rest van de producten. Na verdere reiniging wordt waterstof als product verkregen dat gebruikt kan worden voor energieproductie in gas turbines of brandstofcellen. Een typische samenstelling van het productgas is: 61% H₂, 32,5% CO₂, 5% CH₄, 1% C₂-C₄ en 0,5% CO.

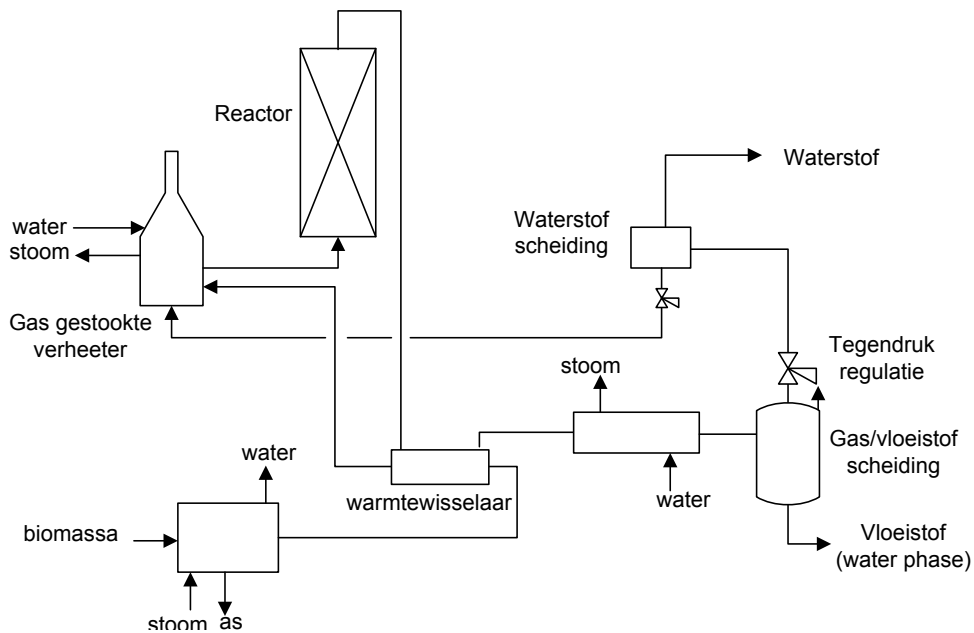
Als voordelen van het proces worden genoemd een hoge efficiency in vergelijking met verbranding en atmosferische vergassing, een minder groot afval probleem in verhouding tot fermentatie en de lage teer vorming. Verder is de vorming van CO te verwaarlozen door de verschuiving van het water-gasshift evenwicht naar de kooldioxide kant en zijn ook vervuilde voedings te gebruiken. Exacte getallen omtrent efficiency en schaalgroottes ontbreken.

Vergassing in superkritisch water ($T_c = 373.95^\circ\text{C}$, $P_c = 220,64 \text{ bar}$) is een relatief nieuwe techniek geschikt voor natte biomassa en reststromen. De kenmerken van het proces zijn:

- vergassing vindt plaats in de afwezigheid van zuurstof. Het geproduceerde gas bevat N_2 , H_2 , CH_4 en CO_2 en water. Het geproduceerde gas komt vrij bij hoge druk (250 - 300 bar) en is niet verdund met stikstof (stikstof is altijd aanwezig in de gassen die vrijkomen bij vergassing met lucht). Dit is nadelig, onafhankelijk van het gebruik van het gas);
- stikstofgas komt vrij door de omzetting van organische stikstof, bijvoorbeeld eiwitten;
- het proces vindt plaats bij een temperatuur van 600 - 650°C, met een verblijftijd van typisch 0,5 - 2 minuten;
- de C naar gas conversie (maat van effectiviteit van gas productie) is sterk afhankelijk van temperatuur en concentratie;
- het proces maakt het mogelijk om sequentieel mineralen af te voeren (grotendeels uit de waterfase);
- de samenstelling van gas kan beïnvloed worden door temperatuur en gebruik van katalysatoren;
- een prinsipeschema van het proces is geïllustreerd in figuur 3.12.

FIGUUR 3.12

SCHEMA VAN HET SUPERKRITISCH VERGASSINGSPROCES



De condities in de reactor (temperatuur, druk, concentratie, katalysatoren) bepalen de gassamenstelling en de effectiviteit van vergassing (C naar gasconversie).

VOOR- EN NADELEN

Het hoge energetische rendement van superkritische vergassing is het voornaamste voordeel, maar de toepasbaarheid van het geproduceerde synthegas en dat het proces zich nog pas op laboratoriumschaal heeft bewezen zijn de voornaamste nadelen. De voorbewerking van zuiveringslib wordt (vanwege de aanwezigheid van haren) vooralsnog als een belangrijk probleem gezien³⁷.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Het proces bevindt zich op dit moment nog in de experimentele fase. Er wordt op pilot schaal onderzoek uitgevoerd naar de inzet van allerlei soorten biomassa. Resultaten voor zuiverings-slib zijn niet specifiek bekend. Ook wordt gekeken naar het optimaliseren van procescondities en het beïnvloeden van de samenstelling van het synthese gas dat bij het proces vrijkomt.

3.17 VERGASSINGSTECHNOLOGIE

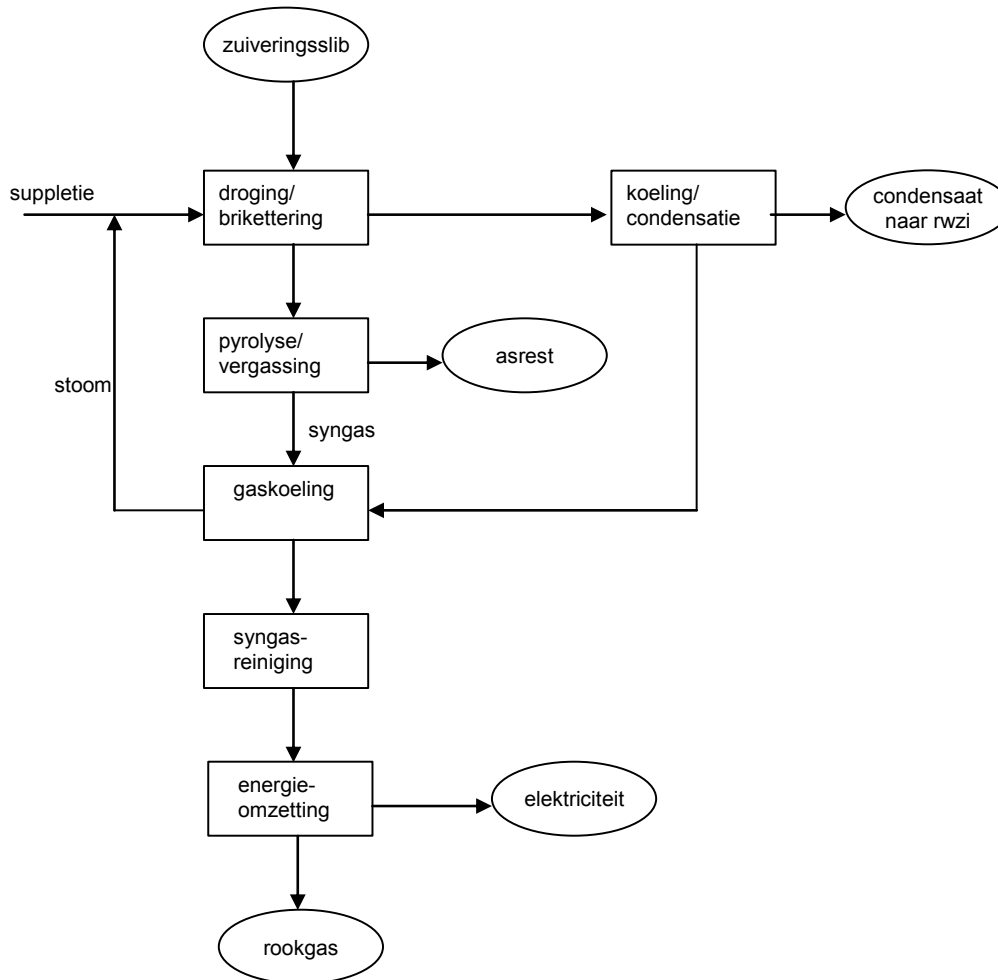
Vergassing kan worden omschreven als het omzetten van een koolstofrijke vaste brandstof in laagmoleculaire gasvormige verbindingen³⁸. Dit gebeurt door de vaste stof bij atmosferische of verhoogde druk te verhitten (550 – 1.500°C) en een zogenaamd vergassend medium toe te voeren. Dit medium zal in het algemeen lucht, zuurstof, stoom (al dan niet gemengd met lucht) of waterstof zijn. Onder deze condities optredende chemische reacties geven aanleiding tot de vorming van een brandbaar gasmengsel. Bij toepassing van lucht of zuurstof als vergassend medium wordt een ondermaat zuurstof toegevoerd, in tegenstelling tot bij verbranding.

Vergassing kan worden beschouwd als een op pyrolyse volgende processtap. Bij vergassing wordt er naar gestreefd zoveel mogelijk gas te produceren uit de brandstof. Grotere koolstofmoleculen worden afgebroken tot kleinere stabiele verbindingen zoals kooldioxide, koolmonoxide, methaan en waterstof. De procestemperatuur en het vergassend medium spelen een belangrijke rol in de uiteindelijke samenstelling van het geproduceerde gas.

De volgende processtappen worden doorlopen (zie ook figuur 3.12 met processchema):

- slibontvangst en -opslag;
- slib(voor)droging tot circa 90 - 95% d.s. waarbij deels gebruik kan worden gemaakt van de energie die bij het afkoelen van het syngas vrij komt. Na stofafscheiding worden de droogdampen gekoeld en wordt het condensaat afgevoerd naar de rwzi;
- vergassing van het gedroogde slib waarbij de asrest wordt afgescheiden;
- het geproduceerde syngas wordt gekoeld tot circa 230°C. De vrijkomende warmte wordt hergebruikt voor het droogproces;
- het syngas wordt gereinigd door middel van:
 - ontstofting;
 - dehalogenering en metalenverwijdering (zure wassing);
 - verwijderen HCN;
 - ontzwaveling (verwijdering H₂S);
 - actief koolfiltratie (waaronder Hg-verwijdering).
- bijstoken syngas in een elektriciteitscentrale.

FIGUUR 3.13 ALGEMEEN PROCESSHEMA VOOR VERGASSING VAN ZUIVERINGSSLIB



VOOR- EN NADELEN

Met vergassing is het mogelijk om een hoger energetisch rendement te realiseren doordat het gas kan worden gebruikt in een elektriciteitscentrale. De syngasreiniging is beperkt van omvang, omdat verbranding heeft plaatsgevonden bij een ondermaat zuurstof. Bovendien zijn de scheidingsrendementen hoog, omdat de concentraties aan verontreinigingen hoog zijn. De residuen zijn beperkt tot de asrest, die weer kan worden ingezet voor de terugwinning van fosfaat.

De technologie voor zuiveringsslib is echter bewerkelijk, omdat het slib eerst gedroogd moet worden. Mede als gevolg van de hoge procestemperatuur, verloopt de technische ontwikkeling langzamer dan verwacht.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

In Nederland is er nog geen vergassingsinstallatie voor zuiveringsslib operationeel. Wel heeft er co-vergassing plaatsgevonden in de kolenvergasser in Buggenum. In het buitenland (Duitsland) vindt vergassing plaats van gedroogd zuiveringsslib. Verder komt het vergassen van biomassa steeds meer in de belangstelling te staan.

Het toevoegen van zuiveringsslib heeft echter vaak invloed op de samenstelling van de asresten en de emissie van Hg en Cd.

3.18 HYDRO THERMAL UPGRADING

In het Hydro Thermal Upgrading (HTU)-proces wordt biomassa in (vloeibaar) water bij een druk van ca. 120 - 180 bar en een temperatuur van 300 - 350°C (in de buurt van het kritische punt van water), in afwezigheid van zuurstof, omgezet in een zogenaamde biocrude: een hoogcalorische, met zware ruwe olie te vergelijken brandstof. Door de hoge druk wordt verdamping van water vermeden.

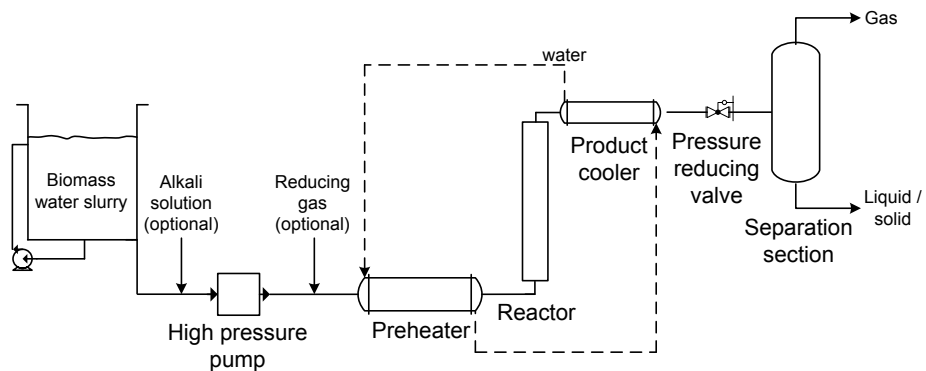
De techniek is geschikt voor de behandeling van natte biomassa (zonder voorafgaande droging) en wordt gecombineerd met het uitwassen van mineralen hetgeen resulteert in een hoogwaardig product dat geleverd kan worden in de verbrandingsinstallaties en (deels) geschikt is voor upgrading.

De verbrandingswaarde ervan is 30 - 35 MJ_{LHV}/kg. Bij hydrothermische omzetting worden de koolstofketens in de biomassa gebroken waarbij zuurstof voor een groot gedeelte wordt vrijgemaakt. De zuurstof en koolstof komen vrij als kooldioxide evenals kleine hoeveelheden waterstof, methaan en koolmonoxide. De resterende biocrude is niet in water oplosbaar en is ongeveer 54 massa%_{droog} van de voeding.

Het netto thermisch rendement van de HTU-conversie bedraagt ongeveer 75 - 80%_{LHV} bij stand-alone toepassing met gebruik van hout of andere biomassa met een vochtgehalte van 35%. De biocrude kan worden gebruikt als stookolie of is op te werken tot vloeibare/gasvormige brandstoffen. HTU is specifiek geschikt voor natte reststoffen maar kan ook veel droge materialen goed verwerken. De voeding zal in het algemeen verkleind moeten zijn, bijvoorbeeld gehakseld of gechipt. Over een economische schaalgrootte is niet veel bekend, een schaal van 70 MW_{th} input voor organisch afval is gemeld in de literatuur.

Het typische processchema is gegeven op Figuur 3.14³⁹

FIGUUR 3.14 DE OPZET VAN HET TYPISCHE PROCES VAN HYDROTHERMISCHE VERWERKING VAN BIOMASSA



VOOR - EN NADELEN

Het voordeel van het HTU-proces is dat het specifiek geschikt is voor natte reststoffen, en daarmee een hoog thermisch rendement behaalt. De voornaamste nadelen zijn de opwerking van de vloeibare reststoffen en het ontwikkelingsstadium.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Het proces wordt momenteel op pilot schaal onderzocht, maar staat nog ver van commerciële toepassing. Ondanks meerdere onderzoeken zijn het mechanisme en de kinetiek nog niet volledig vastgesteld.

3.19 NATTE TORREFACTIE (TORWASH)

TORWASH is een nieuwe opwerkingstechniek voor biomassa, die torrefactie integreert met het uitwassen en drogen. Opwerking en voorbereiding van biomassa kunnen leiden tot brandstof met verbeterde eigenschappen en tot vergroting van de inzet van biomassastromen. Drogen, uitwassen en torrefactie zijn drie van dergelijke technieken, die echter ook een aantal nadelen kennen. Drogen is een relatief eenvoudige voorbereiding, die de calorische waarde van de biomassa verhoogt, maar het kost tijd en energie. Ook uitwassen is een relatief simpele voorbereiding, waarmee zouten kunnen worden verwijderd, die problemen opleveren bij het stoken in een ketel. Er resteert een kletsnatte biomassa, die achteraf gedroogd moet worden.

Torrefactie is een chemische omzetting, die zowel een energieverdichting als een verbetering van logistieke eigenschappen tot gevolg heeft. De maalbaarheid verbetert eveneens door degradatie van de vezelstructuur. Voorafgaand aan torrefactie moet echter eerst gedroogd worden. TORWASH is torrefactie van natte biomassa, waarbij torrefactie gecombineerd wordt met het uitwassen van zouten en die thermische droging vooraf overbodig maakt.

De essentie van TORWASH is dat de biomassa in een drukvat in aanwezigheid van water thermisch behandeld wordt, zodat torrefactiereacties zich afspelen in de vloeistof bij verhoogde druk en temperatuur. De grootste winst is dat er alleen mechanische energie in het drogen van de biomassa gestoken hoeft te worden. Vooraf drogen is overbodig en door de chemische veranderingen in de biomassa kan water, wat alleen nog maar fysisch gebonden is, met mechanische middelen afgedreven worden. Thermisch drogen is dus overbodig. Met TORWASH kan ook zeer natte en vezelige biomassa opgewerkt worden, die ongeschikt is voor simpele uitpersing, omdat de biomassa veerkrachtig is en het water vooral chemisch en biologisch gebonden is.

Een andere doelstelling van TORWASH is om zouten in de biomassa uit te wassen. De torrefactiereacties maken de zouten los, die meteen oplossen in het aanwezige water. Dit water kan - zoals eerder genoemd - eenvoudig worden afgedreven. Zo worden ook biomassastromen geschikt gemaakt voor gebruik als brandstof, die tot nu toe problemen opleverden met corrosie en bedagglomeratie vanwege het te hoge zoutgehalte. Voor het TORWASH concept is een octrooiaanvraag ingediend.

TORWASH is in principe toepasbaar op alle biomassastromen, maar de meeste winst valt te halen bij brandstoffen (waartoe ook zuiveringslib behoort), die een of meerdere van de volgende eigenschappen hebben:

- vezelig, waarvoor een energie-intensieve voorbereiding is nodig is, bijv. malen;
- een hoog gehalte chloor en/of alkalimetalen;
- een hoog vochtgehalte, zeker wanneer water chemisch of biologisch gebonden is;
- gevoelig voor microbiel bederf.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Het TORWASH proces bevindt zich in de onderzoeksfase. Er zijn in 2006 verkennende experimenten uitgevoerd in een autoclaaf van 0,45 liter.

3.20 PYROLYSE

Onder pyrolyse wordt verstaan het thermisch ontleden van organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof. In de praktijk wordt pyrolyse uitgevoerd bij een temperatuur tussen 450 en 750°C. Bij deze temperatuur ontleden hogere koolwaterstoffen tot componenten met een lagere molecuulmassa. Hierbij ontstaan de volgende fracties:

- pyrolyse gas bestaande uit een niet condenseerbare fractie;
- een water en olie mengsel, bestaande uit condenseerbare koolwaterstoffen;
- pyrolysecokes.

Pyrolyse wordt veelal toegepast als voorbehandelingstechniek en niet als eindverwerkings-techniek. Daarbij heeft deze technologie de volgende voordelen:

- het slib wordt omgezet in beter afzetbare en homogener fracties zoals olie en gas, hoewel de scheidingsprocessen geen 100% rendement halen;
- pyrolyse wordt uitgevoerd bij relatief lage temperaturen, in een reducerende omgeving. De meeste zware metalen worden in niet-geoxideerde vorm in de cokes geconcentreerd. Dit opent perspectief om ze in relatief zuivere vorm gedeeltelijk uit de cokes te verwijderen;
- er worden weinig dioxines gevormd.

Er worden diverse pyrolysetechnieken toegepast, waarbij onderscheid wordt gemaakt in:

- enkelvoudig of geïntegreerd proces. Bij een enkelvoudig pyrolyseproces worden de cokes elders (als brandstof) ingezet. Bij het geïntegreerde proces worden de cokes op locatie verwerkt/verbrand;
- verblijftijd en warmtetoever. Door de verblijftijd en de warmtetoever te variëren, kan de opbrengst van sommige fracties worden bevorderd. Bij trage pyrolyse worden vooral cokes gevormd, bij hoge warmtetoever en korte verblijftijden stijgt de opbrengst aan oliën en gassen;
- reactortype en warmtetoever. Trommelovens, statische ovens etc.

ONTWIKKELINGSSTADIUM

Met het toepassen van pyrolysetechnieken ter verwerking van diverse afvalstoffen bestaat een ruime praktijkervaring met capaciteiten tot circa 10 ton/uur. Een kritische procesparameter voor het verder opschalen is veelal de warmteoverdracht. Daarnaast is er vaak geen bestemming voor alle restproducten die vrijkomen.

3.21 NIEUWE SANITATIE

Nieuwe sanitatie wordt buiten de scope van deze studie gehouden. De modellering is betrokken op een rwzi van influent tot effluent en mineralisatie van het slib, waarbij de samenstelling van het influent als uitgangspunt is aangenomen. Nieuwe sanitatie zou vooral een groot effect hebben op de samenstelling van het influent van de rwzi.

3.22 SELECTIE EN MOTIVATIE VOOR NADERE UITWERKING

In tabel 3.1 wordt een beknopte motivatie gegeven waarom de techniek wel of niet is geselecteerd (groen is geselecteerd, rood is niet-geselecteerd).

TABEL 3.1 TECHNIEKEN IN DE WATER- EN SLIBLIJN

No.	Techniek	Argumentatie
1	Tweetrapsproces	<ul style="list-style-type: none"> • proces waarbij zoveel mogelijk slib direct wordt doorgevoerd naar de gisting; • expliciet gericht op een combinatie met slibgisting of slibverbranding.
2	Microzeven	<ul style="list-style-type: none"> • veel slib (CZV) wordt voorafgaand aan het zuiveringsproces afgevangen; • nieuwe reststofstroom die geschikt is voor verbranding.
3	Nereda	<ul style="list-style-type: none"> • wordt in de praktijk toegepast; • er is veel belangstelling voor; • financieel interessant proces.
4	Cannibal	<ul style="list-style-type: none"> • veel minder slibproductie (ca. 70% reductie); • installatie op praktijkschaal is in wording.
5	Anammox in hoofdlijn	<ul style="list-style-type: none"> • wordt beschouwd als een perspectiefvol proces; • sterk energiebesparend in de waterlijn.
6	Wormenreactor	<ul style="list-style-type: none"> • proefresultaten met een pilot installatie bieden nog weinig perspectief; • geen specifiek voordeel ten opzichte van andere biologische processen om organisch bestanddeel in slib af te breken.
7	Hogedruk gisting	<ul style="list-style-type: none"> • proef uitgevoerd op het laboratorium Van Hall Instituut; • hoge druk resulteert in hoog methaangehalte in biogas (boven 5 bar 90% CH₄, geen 100% scheiding); • geen opwerking nodig voor inbreng in decentraal gasnet; • techniek gericht op verhogen CH₄-gehalte van het biogas; • naar verwachting hoge investeringen door hoge druk;
8	Thermofiele gisting	<ul style="list-style-type: none"> • biedt perspectief op een sneller afbraakproces; • inpassing is eenvoudig; • vorderingen worden gemaakt op het gebied van procesregeling.
9	Thermische hydrolyse	<ul style="list-style-type: none"> • behandeling van het slib voorafgaand aan de slibgisting; • veel belangstelling voor; • hogere biogasproductie; • betere ontwaterbaarheid.
10	Enzymatische hydrolyse	<ul style="list-style-type: none"> • resulteert in een verdergaande afbraak van het organische bestanddeel; • energie benodigd om enzymen te produceren is onbekend.

TABEL 3.1 TECHNIEKEN IN DE WATER- EN SLIBLIJN (VERVOLG).

No.	Techniek	Argumentatie	
11	Co-vergisting	<ul style="list-style-type: none"> • mee te vergisten reststromen zijn niet gedefinieerd; • energetische waarde van de mee te vergisten reststromen dient te worden meegerekend; • valt deels buiten de scope van dit project. 	Red
12	Productie van groen gas	<ul style="list-style-type: none"> • vanuit duurzaamheid een interessant proces; • dit is feitelijk een vergelijking van systemen en zou ook buiten de scope geplaatst kunnen worden; • globale vergelijking van beschikbare afzetmogelijkheden van biogas is gewenst. 	Green
13	Liquified biogas	<ul style="list-style-type: none"> • bewerking ter bevordering van de afzet van biogas (geschikt voor transport); • minder geschikt voor kleinschalige toepassing. 	Red
14	Lage temperatuur droging	<ul style="list-style-type: none"> • toepassing voor laagwaardige energie; • combinatie mogelijkheden om de warmte die vrijkomt bij de WKK nuttig in te zetten; 	Green
15	Pulverizing Air Dryer (PAD)	<ul style="list-style-type: none"> • technologie moeilijk verklaarbaar; • geen bewezen technologie voor zuiveringslib op praktijkschaal. 	Red
16	Super kritische vergassing (bij 600°C en 300 bar)	<ul style="list-style-type: none"> • geen bewezen technologie op praktijkschaal; • pilot-installatie in Nederland beschikbaar; • veelbelovende technologie die fundamenteel verschilt van andere beschouwde thermische technologieën 	Green
17	Vergassingstechnologie	<ul style="list-style-type: none"> • technologie die op praktijkschaal wordt toegepast en momenteel sterk in ontwikkeling is, ook voor slib; • hoog energetisch rendement is haalbaar door inzet van het syngas in een e-centrale; • gering rookgasvolume en daarmee beperkte investering voor rookgasreiniging. 	Green
18	HTU-proces	<ul style="list-style-type: none"> • veel soorten natte biomassa grondstoffen kunnen tegelijk worden gebruikt; • interessante techniek voor de productie van vloeibare transport brandstof; • besparing mogelijk op de mechanische ontwatering. 	Green
19	Natte torrefactie (Torwash)	<ul style="list-style-type: none"> • thermisch drogen van slib wordt overbodig; • vergelijkbaar met thermische hydrolyse. 	Red
20	(Flash) Pyrolyse	<ul style="list-style-type: none"> • vereist voorafgaande thermische droging; • ontleedt in een gas, een koolstofrijk, vast residu en een teerachtige substantie; • pyrolyse is een oude techniek waarvan de afzet/opwerking van alle drie residuen (gas, olie, cokes), m.n. teerachtige substantie, weinig perspectief biedt; • flash pyrolyse wordt op pilot schaal getest. 	Red
21	Nieuwe sanitatie	<ul style="list-style-type: none"> • valt buiten de scope van deze studie; • groot effect op de samenstelling van het influent. 	Red

Deze geselecteerde technieken komen grotendeels overeen met de technieken die bij de 'de Energiefabriek' ook werden geselecteerd. Anaërobe behandeling van afvalwater en behandeling in algenvijvers werden in dit project ook behandeld, maar niet als volwaardige behandelingstechniek voor Nederlands huishoudelijk afvalwater beoordeeld. De 'biologische brandstofcel' is hier ook niet opgenomen, omdat deze zich nog slechts op labschaal bevindt. Min of meer hetzelfde geldt voor biologische productie van ethanol en waterstof als alternatief voor slibgisting.

4

VOORBEHANDELING

Voorbezinking, al dan niet voorzien van een dosering voor extra effectiviteit (pre-precipitatie) is de geijkte manier om het navolgende hoofdstroomproces te ontlasten. Bovendien levert het een hoge slibproductie op, die weer de mogelijkheid geeft tot een hogere energieproductie bij de slibgisting. Alternatieven voor voorbezinking zijn het tweetrapsproces en de toepassing van microzeven. De laatste twee werden niet eerder in beschouwing genomen.

4.1 TWEETRAPS-ACTIEFSLIBPROCES

4.1.1 MODELPARAMETERS

De volgende rendementen van de eerste trap zijn aangenomen:

- CZV : 80%
- BZV : 60%
- TKN : 30%
- TP : 60%
- ZS : 85%

Er wordt uitgegaan van oxidatie van 15% van BZV en CZV. Er is tevens aangenomen dat het slib uit de A-trap een CZV/os ratio van 1,8 heeft.

PRAKTIJKREFERENTIES

In het ontwerp van de rwzi Nieuwveer is uitgegaan van 70% BZV-verwijdering in de eerste trap. Op grond van de analyseresultaten van de afgelopen jaren blijkt dat in de eerste jaren inderdaad 70 - 80% BZV-verwijdering haalbaar was. Daarna is het rendement bewust gedrukt in verband met de stikstofverwijdering in de tweede trap. Indien de stikstofverwijdering in de tweede trap op een alternatieve manier plaatsvindt (bijvoorbeeld met een eenstaps Anamox systeem), kan vol worden ingezet op de verwijdering in de eerste trap; deze optie wordt besproken in § 5.3. Op de rwzi Utrecht wordt, bij toepassing van deelstroombehandeling, een effluentgehalte van totaalstikstof juist onder de 10 mg/l gehaald, maar daar is wel dosering van een C-bron (glycerol) voor nodig. De rwzi Garmerwolde kan ook niet zonder dosering van een C-bron.

4.2 TOEPASSING VAN MICROZEVEN ALS VOORBEHANDELING

4.2.1 MODELPARAMETERS

De volgende rendementen van het toepassen van microzeven zijn aangehouden:

- CZV : 40%
- BZV : 10%
- TKN : 5%
- TP : 5%
- ZS : 55%

Er kan worden aangenomen dat het afgezeefde materiaal grotendeels uit papierachtig materiaal bestaat, met een drogestofgehalte van 30 - 40%. De in ontwerpberekeningen gebruikelijke aanname van 40% afbraak van de zwevende stof in het slib wijzigt niet door de voorbehandeling.

Uit de proeven in Blaricum blijkt dat zeefgoed voor circa 80% uit cellulose bestaat, terwijl in primair slib 30% cellulose wordt aangetroffen. Daarmee zal de CZV van zeefgoed niet gelijk zijn aan de CZV van primair slib. Als aangenomen mag worden dat de concentratie cellulose het grootste verschil is tussen beide producten en dat primair slib een CZV heeft gelijk aan 1,6 - 1,8 g CZV/g ODS. Dan kan er volgens berekend worden dat de CZV van het zeefgoed in de orde grootte van 1,3 - 1,4 g CZV/g ODS is.

$$CZV_{zg} = f_{zg,cell} \times CZV_{cell} + f_{zg,ov} \times \frac{CZV_{ps} - f_{ps,cell} \times CZV_{cell}}{f_{ps,ov}} \quad (1)$$

Waarin:

zg	zeefgoed
ps	primair slib
cell	cellulose
ov	overig, niet nader gedefinieerd materiaal, in primair slib dan wel zeefgoed en anders dan cellulose

Door het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) is de samenstelling van het zeefgoed onderzocht. Op basis van een door Waternet representatief gevonden monster is een bovenste verbrandingswaarde van 17,85 MJ/kg d.s. gemeten. Op basis van de chemische samenstelling⁴⁰ wordt een verbrandingswaarde van 17,4 MJ/kg d.s. berekend. Gelijk aan de conclusie van ECN lijkt het redelijk om uit te gaan van een bovenste verbrandingswaarde van 17 - 18 MJ/kg d.s.

De grootste capaciteit zeefinstallatie van Salsnes-filter (type SF6000) behandelt circa 550 m³/h. Dit betekent dat er 5 - 6 zeven nodig zijn voor de behandeling van DWA (3.000 m³/h) en circa 16 zeven voor de volledige behandeling van al het inkomende afvalwater (9.000 m³/h). De kale som van één eenheid wordt geschat op € 80.000,- tot € 100.000,-. Dit zijn de kosten exclusief bouwkundige en elektrotechnische voorzieningen en alle bijbehorende randapparatuur.

Waternet raamt voor een installatie met een capaciteit van 2.000 m³/h een *all-in* investeringssom van € 2.000.000,-. De afzet in de papierverwerkende industrie of als materiaal voor het bijstoken in een kolencentrale kost circa € 20 - 40 per ton product (exclusief transport).

4.3 RESULTATEN

Een tweetrapsproces met slibgisting, of de toepassing van microzeven zijn alternatieven voor een rwzi met voorbezinking en slibgisting. Voor de vergelijking is gekozen voor een installatie met biologische P-verwijdering. Het tweetrapsproces wordt vergeleken met zowel gewone voorbezinking als pre-precipitatie. De resultaten zijn samengevat in tabel 4.1.

4.3.1 TWEETRAPS ACTIEFSLIBSYSTEEM

Een tweetraps actiefslibstelsysteem gebruikt minder energie en chemicaliën dan rwzi's met voorbezinking en slibgisting, en ook minder dan een rwzi met pre-precipitatie en slibgisting. Vergeleken met toepassing van pre-precipitatie is het verschil niet zo heel groot, maar bij dit laatste proces worden veel chemicaliën verbruikt. Het is duidelijk dat de verschillen in energieverbruik met rwzi's die geen voorbezinking of geen slibgisting hebben, aanzienlijk is. Het energieverbruik van een tweetrapsproces met slibgisting is nog slechts 60% van dat van een rwzi zonder slibgisting en voorbezinking.

De investeringen zijn wat hoger dan van de referentievarianten zonder voorbezinking, maar iets lager dan van de variant met voorbezinking en slibgisting. De exploitatiekosten zijn echter beduidend lager.

4.3.2 MICROZEVEN

Het toepassen van microzeven leidt tot een aanzienlijke vermindering van de vracht aan zwevende stof naar de biologische installatie. De slibproductie van het zuiveringsproces gaat omlaag, en tegelijkertijd wordt er een mogelijk herbruikbaar product gemaakt, waarvan de afzet vooralsnog onduidelijk is. Van het materiaal zijn de afzetkosten voorlopig geschat op € 30,- per ton. Ter vergelijking is in tabel 4.1 een variant opgenomen, waarin het gewonnen materiaal alsnog aan de slibgisting wordt toegevoegd.

Toepassing van microzeven leidt tot een geringer energieverbruik voor de beluchting dan de overige voorbehandelingstechnieken. Het totale energieverbruik - als het gezeefde materiaal alsnog naar de gisting zou worden gebracht - is te vergelijken met dat van het tweetraps actiefslibstelsysteem.

Het is echter reëel denkbaar dat het uitgezeefde materiaal, dat goed te ontwateren is, een alternatieve route volgt (bijvoorbeeld droging en toepassing als secundaire brandstof). Van een dergelijke alternatieve route mag een hoger energetisch rendement worden verwacht in vergelijking met vergisting. Dit is niet nader gemodelleerd.

Op grond van uitgevoerde proeven op praktijkschaal⁶ wordt de stookwaarde van het zeefgoed geschat op 18 MJ/kg d.s. Na mechanische ontwatering kan een droge stofgehalte van circa 50% worden bereikt. De stookwaarde van het uitgeperste materiaal bedraagt daarmee circa 8 MJ/kg zeefgoed. Bij een productie aan zeefgoed van circa 24 g d.s./i.e./dag en een capaciteit van 100.000 i.e. levert dat een hoeveelheid zeefgoed op van 876 ton d.s./jaar brandstof op, overeenkomend met 13,5 Tj/jaar. Uitgaande van een elektrisch rendement voor een kolencentrale van 40% resulteert dit in circa 1.500.000 kWh/jaar.

Indien het zeefgoed wordt doorgevoerd naar de slibgisting, wordt het afbraakpercentage van de droge stof geschat op 30% (cellulose), overeenkomend met 263 ton d.s./jaar of 250.000 m³ biogas, overeenkomend met een stookwaarde van 23,3 MJ/m³. Bij een omzetrendement van 37% resulteert dit in circa 600.000 kWh/jaar. In dit geval kan het vergistingsresidu met een droge stofgehalte van circa 25% (stookwaarde circa 2,5 MJ/kg) nog in energie worden omgezet. Dit kan nog resulteren in een energieproductie van circa 680.000 kWh/jaar. Per saldo levert de directe afzet van het zeefgoed circa 15% meer elektriciteit.

TABEL 4.1

VERGELIJKING TWEETRAPSproces EN TOEPASSING VAN MICROZEVEN MET OVERIGE PROCESSEN. AFKORTINGEN: VB: VOORBEZINKING;
PREP: PRE-PRECIPITATIE

variant	1	2	3	4	5	6	7
installatie							
voorbehandeling	geen	geen	VBT	PreP	1e trap	microzeef	microzeef
hoofdlijn	actief slib	actief slib	actief slib	actief slib	actief slib	actief slib	actief slib
slibreductie	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen
slibvoorbehandeling	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen
slibgisting	geen	mesofiel	mesofiel	mesofiel	mesofiel	geen	mesofiel
deelstroombehandeling	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen
dimensies							
A-trap	m3				656		
voor/tussenbezinking	n x m dia		1 x 47.30	1 x 47.30	2 x 43.20		
biologische ruimten	m3	16.800	12.730	7.590	7.150	10.950	11.520
anammox in hoofdlijn							
Cannibal							
wormenreactor							
nabezinking	n x m dia	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90
slibgisting	m3	0	1.482	1.539	1.590	0	725
slibproductie							
droge stof totaal	kg/d	4.445	3.095	3.049	2.918	4.650	4.188
chemisch slib	kg/d	0	28	149	0	64	79
organische stof	kg/d	3.111	1.841	1.688	1.689	3.448	2.980
afbraak organische stof	%	0	43	50	52	0	29
microzeefgoed							
droge stof totaal	kg/d	0	0	0	0	2.382	2.382
verbruik chemicaliën							
FeCl3	kg/d	27	25	77	76	28	29
PE	kg/d	56	37	33	31	28	24

*: wordt toegevoegd aan het slib

TABEL 4.1

VERGELIJKING TWEETRAPSPROCES EN TOEPASSING VAN MICROZEVEN MET OVERIGE PROCESSEN (VERVOLG)

variant	1	2	3	4	5	6	7
verbruik energie							
voorbehandeling							
biologie	0,0	0,0	0,3	0,3	33,5	0,0	0,0
anammox	209,8	217,4	187,1	167,3	66,9	180,2	183,3
nabezinking	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
slibindikking	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
slibgisting	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
slibontwatering	0,0	7,0	7,1	7,4	7,7	0,0	3,1
overig	14,8	11,3	10,3	10,2	9,7	15,5	14,0
totaal	37,5	37,5	41,9	41,9	51,6	41,9	41,9
productie energie							
productie biogas	286	293	266	255	197	255	259
gistings- en groen gas	0	754	1.241	1.778	1.770	0	338
totaal verbruik	0	71	117	168	167	0	32
opbrengst / verbruik	286	222	149	87	30	255	227
kosten	0	24	44	66	85	0	12
investering	27.965	29.510	31.450	29.980	30.790	30.895	31.985
exploitatie							
kapitaalslasten	2.185	2.300	2.470	2.365	2.405	2.420	2.505
bedrijfsvoering	1.816	1.555	1.461	1.363	1.202	1.423	1.367
totaal	4.001	3.855	3.931	3.728	3.607	3.843	3.872
kosten per i.e.							
investering	279,7	295,1	314,5	299,8	307,9	309,0	319,9
exploitatie	40,00	38,60	39,30	37,30	36,10	38,40	38,70

5

HOOFDPROCES

In dit hoofdstuk worden enige alternatieven voor het actiefslibproces besproken, alsmede de aërobe slibreductietechniek Cannibal®.

5.1 NEREDA®-PROCES

5.1.1 MODELPARAMETERS

Modelparameters zijn in principe dezelfde als die in voor een SBR reactor worden gebruikt. De waarden van de parameters zijn ontleend aan de pilot-installatie van Ede⁷, en aan informatie die werd verkregen van de leverancier van het proces, DHV⁴¹:

• slibgehalte	:	8	g/l
• CZV-belasting			
• ruw	:	0,14	kg CZV.kg ds ⁻¹ .d ⁻¹
• voorbezonden	:	0,12	kg CZV.kg ds ⁻¹ .d ⁻¹
• slibproductie			
• ruw	:	510	g CZV.kg ds ⁻¹
• voorbezonden	:	400	g CZV.kg ds ⁻¹
• effluent ZS (gebaseerd op gegevens van rwzi Dinxperlo)			
• ruw	:	30	mg/l
• voorbezonden	:	30	mg/l
• cyclus			
• vullen en aflaten	:	1	h
• bezinken	:	0,25	h
• cyclusduur	:	variabel	

Energiebesparing wordt veroorzaakt door het niet nodig zijn van:

- recirculatie van voordentrificatietank naar anaërobe tank;
- recirculatie van aëratietank naar voordentrificatie;
- recirculatie van slib van nabezinktank naar aëratietank;
- menging en voortstuwing in anaërobe tank, voordentrificatietank en aëratietank.

Dit zou een besparing opleveren van 15 - 30% ten opzichte van een conventionele actiefslib-installatie. Voor de beluchting zou theoretisch iets meer energie nodig zijn dan in een actiefslibproces, vanwege het korrelvormige slib, dat een (theoretisch) moeizamere overdracht van zuurstof met zich meebrengt; aan de andere kant zou de alfa-factor aanzienlijk hoger zijn dan bij conventionele systemen, hetgeen tot ongeveer dezelfde energieverbruik in de beluchting zou leiden⁴².

5.1.2 RESULTATEN

Het Nereda[®] proces kan als alternatief dienen voor een conventionele installatie, mét of zonder voorbezinking en slibgisting. De slibproductie mag gelijk worden verondersteld aan die van een conventionele installatie. Het energieverbruik zal iets lager zijn. De voornaamste winst wordt behaald op de kosten. In tabel 5.1 wordt het Nereda[®]-proces vergeleken met enige referentieprocessen. De resultaten worden na tabel 5.1 besproken.

5.2 CANNIBAL[®] PROCES

5.2.1 MODELPARAMETERS

De in de literatuur aangegeven verlaging van de slibproductie wordt teweeg gebracht door:

- een verwijdering van materiaal uit het slib door microfiltratie; de hoeveelheid materiaal die wordt verwijderd zou ongeveer 20 - 30% (in kg DS/d) van de BOD-belasting (in kg BOD/d) bedragen⁴³; in Nederland is deze waarde lager, circa 3% van de BOD-belasting^{11,12};
- de afbraak van het slib door het verblijf in de anaërobe *interchange reactor*, deze afname zal ongeveer 60 - 70% bedragen⁴⁴.

In het berekeningsmodel zijn de volgende parameters gewijzigd:

- de factor voor opname van zwevende stof in het slib, die standaard 0,6 bedraagt, wordt verlaagd naar 0,2 als gevolg van de toepassing van zeping van het slib; een deel hiervan wordt afgescheiden, en een deel wordt afgebroken; er is uitgegaan van een afbraak van 90% van het verschil; een gering deel van het slib wordt afgescheiden;
- de afbraak van het overgebleven slib wordt gesteld op 70%; samen met de verwijdering van zwevende stof door de zeping levert dit een uiteindelijke reductie van de slibproductie op van 65%;
- er is ervan uitgegaan dat 8% van de vrijgekomen CZV als waterstofgas (H₂) wordt vrijgemaakt⁴⁵;
- tenslotte is uitgegaan van een verbetering van de alfa-factor, van 0,7 naar 0,8.

De verlaging van de factor voor opname van zwevende stof in het slib leidt tot de slibproductie van de filtratie. Hierdoor wordt CZV verwijderd uit het systeem, als wordt uitgegaan van een CZV van 1,2 voor de verwijderde zwevende stof (voornamelijk cellulose-achtige verbindingen).

De verhoogde afbraakcoëfficiënt van de zwevende stof in het slib leidt tot afbraak van slib, en deze afbraakproducten worden teruggevoerd naar de beluchte ruimte in de hoofdlijn. De vrachten naar de beluchte ruimte dienen dus toe te nemen. Hiervoor is een CZV van het afgebroken slib van 1 kg CZV/kg d.s. aangehouden.

Berekening van de beluchting kan nu beter op basis van een CZV balans plaatsvinden⁴⁶, dan de eerder gebruikte bepaling op basis van BZV en endogene ademhaling.

Als resultaat van de verlaging van de factor voor opname van zwevende stof in het slib zal de *in-reactor* slibproductie geringer zijn. Dit is in overeenstemming met de aanzienlijke lagere behoefte aan aërobe ruimte die werd berekend bij modellering⁴³.

5.2.2 RESULTATEN

De sterke verlaging van de slibproductie met gelijktijdige verhoging van het energieverbruik geeft een heel ander beeld te zien dan bij de meeste processen die in dit rapport aan de orde zijn. In tabel 5.1 is een vergelijking gegeven met referentieprocessen. Dat zijn conventionele installaties zonder voorbezinking en slibgisting, het toepassen van microzeven, en een conventionele installatie met voorbezinking en slibgisting. In de tabel is ook het Nereda[®]-proces opgenomen.

CANNIBAL[®]

Bij de kostenraming is uitgegaan van een raming van de totale investering voor de Cannibal[®]-reactor van € 1.540.000,-, inclusief behuizing voor zeving van het slib, reactortank, zeving, beluchting, elektrische werken, verzekeringen, engineering en patentkosten, alsmede BTW.

Uit de tabel kan worden geconcludeerd dat toepassing van het Cannibal[®]-proces gunstig is voor de kosten, maar ongunstig voor het energieverbruik (van de rwzi). Het energieverbruik voor de beluchting is 21% hoger dan dat van een rwzi zonder voorbezinking. Dit is wat hoger dan de leverancier aangeeft, maar wanneer de rwzi Zeewolde is voorzien van een Cannibal[®]-reactor, zal een en ander duidelijk worden.

De lagere bedrijfsvoeringskosten van een Cannibal[®]-systeem komen voornamelijk voor rekening van de aanzienlijke reductie in de slibproductie.

NEREDA[®]

Het lijkt geen twijfel dat aëroob korrelslib, zoals in het Nereda[®]-proces, voordelen biedt ten opzichte van conventionele actiefslibsystemen. Slibproducties en beluchtungsenergieverbruik zijn, bij gebrek aan feitelijke informatie, voorlopig gelijk gesteld aan dat van een conventionele installatie.

TABEL 5.1 VERGELIJKING VAN DE TOEPASSING VAN HET CANNIBAL®- EN HET NEREDA®-PROCES MET TWEE REFERENTIEPROCESSEN: 10: EEN SYSTEEM ZONDER VOORBEZINKING EN SLIBGISTING EN 11: SYSTEEM MET VOORBEZINKING EN SLIBGISTING

variant		10	11	12	13
installatie					
voorbehandeling	-	geen	VBT	geen	geen
hoofdlijn	-	actief slib	actief slib	Nereda	actief slib
slibreductie	-	geen	geen	geen	Cannibal
slibvoorbehandeling	-	geen	geen	geen	geen
slibgisting	-	geen	mesofiel	mesofiel	geen
deelstroombehandeling	-	geen	geen	geen	geen
dimensies					
1e-trap	m ³				
voor/tussenbezinking	n x m dia		1 x 47.30		
biologische ruimten	m ³	17.260	16.290	18.230	12.130
anammox in hoofdlijn					
Cannibal					2.840
wormenreactor					
nabezinking	n x m dia	4 x 38.90	4 x 38.90		4 x 38.90
slibgisting	m ³	0	1.500	1.470	0
slibproductie					
droge stof totaal	kg/d	5.167	4.032	3.426	3.179
chemisch slib	kg/d	700	930	29	1.098
organische stof	kg/d	3.127	1.861	2.074	1.456
afbraak organische stof	%	0	43	33	0
microzeefgoed					
droge stof totaal	kg/d	0	0	0	0
verbruik chemicaliën					
FeCl3	kg/d	189	236	27	269
PE	kg/d	65	48	45	41
verbruik energie					
voorbehandeling	kW	0,0	0,3	0,0	0,0
biologie	kW	188,4	160,7	183,7	199,6
anammox	kW	0,0	0,0	0,0	0,0
nabezinking	kW	0,3	0,3	0,0	0,3
slibindikking	kW	5,3	5,3	5,3	5,3
slibgisting	kW	0,0	7,2	7,0	0,0
slibontwatering	kW	17,2	13,4	11,4	10,6
overig	kW	37,5	41,9	9,1	37,5
totaal	kW	301	287	232	316
productie energie					
productie biogas	m ³ /d	0	1.255	763	0
gistings- en groen gas	kW	0	119	72	0
totaal verbruik	kW	301	168	160	316
opbrengst / verbruik	%	0	42	31	0
kosten					
investering	K EUR	28.955	32.950	26.775	29.910
exploitatie					
kapitaalslasten	K EUR / j	2.260	2.580	2.195	2.370
bedrijfsvoering	K EUR / j	1.995	1.668	1.614	1.755
totaal	K EUR / j	4.255	4.248	3.809	4.125
kosten per i.e.					
investering	Euro	289,6	329,5	267,8	299,1
exploitatie	Euro/j	42,60	42,50	38,10	41,30

5.3 CZV VERWIJDERING MET ANAMMOX IN DE HOOFDLIJN

5.3.1 MODELPARAMETERS

De volgende ontwerpparameters voor de systemen zijn aangehouden:

• slibleeftijd van het actiefslibstelsysteem	:	2	dagen
• verwijdering van CZV	:	95	%
• verwijdering van BZV	:	98	%
• verwijdering van zwevende stof	:	99	%

Het systeem vóór de stikstofverwijdering verwijdert voldoende CZV en BZV om aan de effluenten te voldoen. Een slibleeftijd van twee dagen is bijvoorbeeld in de Verenigde Staten voor een dergelijk systeem betrekkelijk gebruikelijk⁴⁷.

De vergistbaarheid van slib uit een waterlijn met een lage slibleeftijd zal aanzienlijk beter zijn dan die van slib uit een waterlijn met een hoge slibleeftijd. Naar aanleiding van een publicatie over dit onderwerp⁴⁸ is de maximale afbreekbaarheid van slib, die eerst constant was (40%) nu een functie gemaakt van de slibleeftijd:

$$M_S = 70,3 * \exp(-0,282 * SLT * 1.073^{(T-15)})$$

met SLT is de slibleeftijd in de waterlijn en T is de gemiddelde temperatuur van de beluchting. Voor de configuraties van de waterlijn maakt de wijziging nauwelijks verschil, maar dat geldt niet voor de optie die in deze paragraaf aan de orde is.

De parameters die voorlopig zijn aangehouden voor het tweetraps Anammox proces zijn de volgende:

• slibleeftijd van slib in het systeem	:	150	dagen
• capaciteit van de N-verwijdering	:	0,50	kg N.m ⁻³ .d ⁻¹
• verwijderingsrendement NH ₄ -N	:	98	%
• effluent NO ₃ -N	:	10	% van TKN _{IN}
• energieverbruik	:	1	kWh/kg N
• slibproductie	:	0,1	kg ds/kg N

De capaciteit van de N-verwijdering in de tweetraps Anammox reactor is gebaseerd op gerapporteerde capaciteiten bij circa 2 kg N.m⁻³.d⁻¹ bij 30°C, aangepast voor een temperatuur van 10°C. De kosten van de behandeling in een ééntraps nitritatie-Anammox behandeling zijn aan de hand van prijsopgave van leveranciers geschat.

5.3.2 RESULTATEN

Het voorgestelde systeem kan worden vergeleken met een conventioneel actiefslibstelsysteem met slibgisting. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.2.

TABEL 5.2

VERGELIJKING VAN TWEE SYSTEMEN: CONVENTIONELE ACTIEF SLIBINSTALLATIE MET EEN ACTIEF SLIBINSTALLATIE MET ÉÉNTRAPS

NITRITATIE-ANAMMOX REACTOR

variant		28	29
installatie			
voorbehandeling	-	VBT	VBT
hoofdlijn	-	actief slib	anammox
slibreductie	-	geen	geen
slibvoorbehandeling	-	geen	geen
slibgisting	-	mesofiel	mesofiel
deelstroombehandeling	-	geen	geen
dimensies			
A-trap	m ³		
voor/tussenbezinking	n x m dia	1 x 47.30	1 x 47.30
biologische ruimten	m ³	16.290	3.370
anammox in hoofdlijn			1.640
Cannibal			
wormenreactor			
nabezinking	n x m dia	4 x 38.90	4 x 38.90
slibgisting	m ³	1.500	1.859
slibproductie			
droge stof totaal	kg/d	4.032	4.291
chemisch slib	kg/d	930	807
organische stof	kg/d	1.861	1.919
afbraak organische stof	%	43	52
microzeefgoed			
droge stof totaal	kg/d	0	0
verbruik chemicaliën			
FeCl ₃	kg/d	236	209
PE	kg/d	48	53
verbruik energie			
voorbehandeling	kW	0,3	0,3
biologie	kW	160,7	61,2
anammox	kW	0,0	34,3
nabezinking	kW	0,3	0,3
slibindikking	kW	5,3	5,3
slibgisting	kW	7,2	9,2
slibontwatering	kW	13,4	14,3
overig	kW	41,9	41,9
totaal	kW	287	220
productie energie			
productie biogas	m ³ /d	1.255	1.780
gistings- en groen gas	kW	119	168
totaal verbruik	kW	168	52
opbrengst / verbruik	%	42	76
kosten			
investering	K EUR	32.950	33.050
exploitatie			
kapitaalslasten	K EUR / j	2.580	2.695
bedrijfsvoering	K EUR / j	1.668	1.600
totaal	K EUR / j	4.248	4.295
kosten per i.e.			
investering	Euro	329,5	330,5
exploitatie	Euro/j	42,50	43,00

Het is nog niet helemaal duidelijk wat de kosten voor een nog niet-bestaande eentraps nitrificatie-Anammox systeem zijn. Hier is voorlopig uitgegaan van niet al te hoge kosten:

$$K = 10.26 * B^{0,400}$$

met K is kosten en B is stikstofbelasting in kg/d, hetgeen neerkomt op (niet-civiele) kosten voor een installatie van 100.000 i.e. van circa € 1.450.000.-. Niettemin is een hoogbelast actiefslibstelsysteem met Anammox in de hoofdlijn met slibgisting marginaal duurder dan een conventionele installatie. De aanzienlijk hogere slibproductie is hier voor het belangrijkste deel debet aan.

6

SLIBVOORBEHANDELING EN -GISTING

De behandeling van slib voordat het wordt vergist kan interessant zijn omdat de afbreekbaarheid van het slib tijdens de slibgisting wordt vergroot, zodat er meer energie uit het slib vrijgemaakt kan worden. Aan de andere kant kan de slibvoorbehandeling ook leiden tot een verbetering van de ontwaterbaarheid van het slib.

6.1 WORMENREACTOR

6.1.1 MODELPARAMETERS

Het effect van de behandeling in een wormenreactor kan worden opgevat als een reductie in de slibproductie. Deze reductie wordt tweeweggebracht door de wormen zelf, óf de reductie treedt op tijdens de opslag die na de behandeling kan plaatsvinden, of tijdens de vergisting van de wormen en hun producten.

De parameters die zijn aangehouden voor de wormenreactor zijn:

• verblijftijd van slib in het systeem	:	10	uur
• reductie van de organische stof	:	30	%
• beluchting	:	0,32	kWh/kg ds
• energieverbruik	:	1	kWh/kg N
• slibproductie	:	0,1	kg ds/kg N

De parameters die geldig zijn voor de opslag zijn de volgende:

• hydraulische verblijftijd	:	3	dagen
• slibverblijftijd	:	50	dagen
• reductie organische stof	:	34%	
• slibgehalte uit	:	3,0	%

Methaanproductie en biogasproductie van het opslagsysteem worden berekend uit de reductie van de organische stof.

6.1.2 RESULTATEN

Resultaten van de berekeningen met en zonder wormenreactor, die wel of niet is voorzien van een opslagreactor, zijn samengevat in tabel 6.1.

TABEL 6.1

VERGELIJKING TUSSEN EEN CONVENTIONELE RWZI MET EEN INSTALLATIE DIE GEBRUIK MAAKT VAN DE WORMENREACTOR

variant		35	36	37
installatie				
voorbehandeling	-	geen	geen	geen
hoofdlijn	-	actief slib	actief slib	actief slib
slibreductie	-	geen	geen	geen
slibvoorbehandeling	-	geen	wormen	wormen
slibgisting	-	mesofiel	mesofiel	geen
deelstroombehandeling	-	geen	geen	geen
dimensies				
A-trap	m ³			
voor/tussenbezinking	n x m dia			
biologische ruimten	m ³	18.270	18.250	17.320
anammox in hoofdlijn				
Cannibal				
wormenreactor			1	1
nabezinking	n x m dia	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90
slibgisting	m ³	1.474	1.377	0
slibproductie				
droge stof totaal	kg/d	4.113	3.183	1.952
chemisch slib	kg/d	706	0	700
organische stof	kg/d	2.080	1.943	876
afbraak organische stof	%	33	33	0
microzeefgoed				
droge stof totaal	kg/d	0	0	0
verbruik chemicaliën				
FeCl ₃	kg/d	184	178	170
PE	kg/d	54	45	32
verbruik energie				
voorbehandeling	kW	0,0	0,0	0,0
biologie	kW	195,0	194,9	188,8
anammox	kW	0,0	0,0	0,0
nabezinking	kW	0,3	0,3	0,3
slibindikking	kW	5,3	5,3	5,3
slibgisting	kW	7,0	6,5	0,0
slibontwatering	kW	13,7	10,6	6,5
overig	kW	37,5	37,5	37,5
totaal	kW	307	300	279
productie energie				
productie biogas	m ³ /d	765	716	0
gistings- en groen gas	kW	72	68	0
totaal verbruik	kW	235	232	279
opbrengst / verbruik	%	23	23	0

6.2 THERMOFIELE SLIBGISTING

6.2.1 MODELPARAMETERS

De minimale verblijftijd zoals deze wordt toegepast in de berekening van de afbraak van organische stof dient te worden aangepast bij toepassing van onderscheid tussen mesofiele en thermofiele gisting. De formule voor de minimale sibleeftijd (= verblijftijd bij een volledig gemengd systeem) verandert van

$$SLT_T = 3,0 * 1,07^{(T-30)}$$

in

$$SLT_T = 2,85 * \text{MAX}\left(\left(1,08^{(T-30)} - 1,35^{(T-40)}\right), \left(1,08^{(T-42)} - 1,35^{(T-57)}\right)\right)^{-1}$$

de functie tussen de haken beschrijft de beide curves in figuur 6.1. Zoals aangegeven is er geen reden om de afbreekbaarheid van primair en secundair slib aan te passen.

6.2.2 RESULTATEN

Thermofiele vergisting van slib is een alternatief voor mesofiele vergisting. Het wordt al sinds 1949 op praktijkschaal toegepast⁵⁰. Het kan op alle plaatsen waar mesofiele vergisting wordt ingezet, ook worden ingezet, behalve dat het wat gevoeliger is voor hoge gehalten aan ammoniak. Er kan worden gekozen voor thermofiele vergisting worden gekozen omdat bij eenzelfde verblijftijd meer afbraak plaatsvindt, of omdat een kortere verblijftijd kan worden gehanteerd, zodat van eenzelfde gistingstank meer slib kan verwerken. De laatste reden lijkt het meest voor de hand te liggen. In tabel 6.2 worden thermofiele en mesofiele vergisting vergeleken.

Er is bij de thermofiele gisting uitgegaan van warmtewisseling tussen de stromen die de vergister in- en uitgaan. De warmte van de WKK-installatie is anders niet voldoende voor de opwarming. De kosten voor deze warmtewisseling zijn in de berekeningen opgenomen.

Aan de uitkomsten in de tabel is te zien dat de verschillen bij toepassen van thermofiele gisting zowel voor de verbeterde omzetting als voor de verkorting van de benodigde verblijftijd, marginaal zijn.

TABEL 6.2

VERGELIJKING TUSSEN THERMOFIELE EN MESOFIELE SLIBGISTING

variant		30	31	32
installatie				
voorbehandeling	-	VBT	VBT	VBT
hoofdlijn	-	actief slib	actief slib	actief slib
slibreductie	-	geen	geen	geen
slibvoorbehandeling	-	geen	geen	geen
slibgisting	-	mesofiel	thermofiel	thermofiel
deelstroombehandeling	-	geen	geen	geen
dimensies				
A-trap	m3			
voor/tussenbezinking	n x m dia	1 x 47.30	1 x 47.30	1 x 47.30
biologische ruimten	m3	16.290	16.520	16.520
anammox in hoofdlijn				
Cannibal				
wormenreactor				
nabezinking	n x m dia	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90
slibgisting	m3	1.500	1.498	899
slibproductie				
droge stof totaal	kg/d	4.032	3.944	4.023
chemisch slib	kg/d	930	931	931
organische stof	kg/d	1.861	1.774	1.853
afbraak organische stof	%	43	45	43
microzeefgoed				
droge stof totaal	kg/d	0	0	0
verbruik chemicaliën				
FeCl3	kg/d	236	236	237
PE	kg/d	48	48	48
verbruik energie				
voorbehandeling	kW	0,3	0,3	0,3
biologie	kW	160,7	162,0	162,0
anammox	kW	0,0	0,0	0,0
nabezinking	kW	0,3	0,3	0,3
slibindikking	kW	5,3	5,3	5,3
slibgisting	kW	7,2	9,2	6,7
slibontwatering	kW	13,4	13,1	13,4
overig	kW	41,9	41,9	41,9
totaal	kW	287	289	287
productie energie				
productie biogas	m3/d	1.255	1.328	1.258
gistings- en groen gas	kW	119	125	119
totaal verbruik	kW	168	164	168
opbrengst / verbruik	%	42	43	41
kosten				
investering	K EUR	32.950	33.105	32.845
exploitatie				
kapitaalslasten	K EUR / j	2.580	2.595	2.575
bedrijfsvoering	K EUR / j	1.668	1.652	1.669
totaal	K EUR / j	4.248	4.247	4.244
kosten per i.e.				
investering	Euro	329,5	331,1	328,5
exploitatie	Euro/j	42,50	42,50	42,40

6.3 THERMISCHE HYDROLYSE

6.3.1 MODELPARAMETERS

Het effect van de voorbehandeling kan worden opgevat als een wijziging in de factor K in de berekening van de afbraak van slib volgens Chen & Hashimoto⁵¹, die ook in de eerdere studie werd gebruikt. Deze formule voor de afbraak luidt:

$$\frac{R}{B} = \frac{\Theta - 1}{\Theta - 1 + K}$$

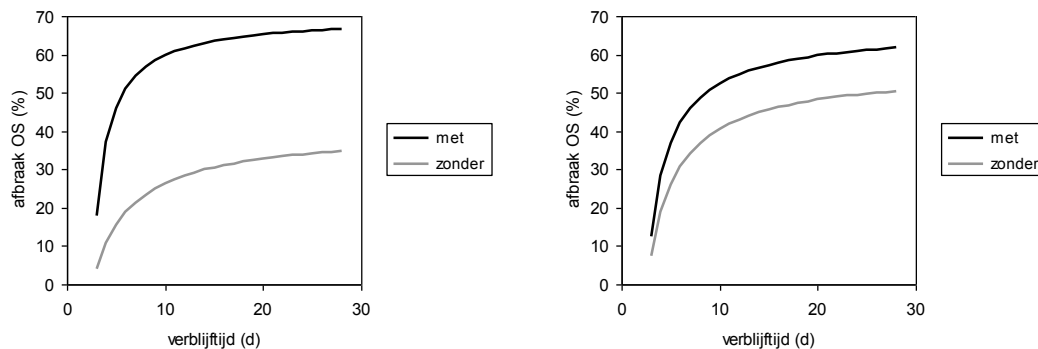
waarin R het percentage afbraak is van de organische stof, B het maximum haalbare percentage afbraak, Θ de dimensieloze sibleeftijd (sibleeftijd gedeeld door minimum sibleeftijd voor methaangisting) en K de afbraakconstante is. Door aanpassing van de waarden wordt automatisch een hogere ammoniakconcentratie in de slibgisting berekend.

TABEL 6.3 WAARDEN VAN PARAMETERS ZONDER EN MET THERMISCHE VOORBEHANDELING VAN SECUNDAIR SLIB

Parameter	Eenheid	Zonder voorbehandeling	Met voorbehandeling
maximale afbraak	% van organische stof	65	70
K	–	1,5	0,5

Als deze waarden worden uitgezet als functie van de verblijftijd, dan is duidelijk dat thermische voorbehandeling vooral veel oplevert als er geen sprake is van voorbezinking. Bij voorbezinking is de toename van de afbraak en van de biogasproductie aanzienlijk minder spectaculair (zie figuur 6.1).

FIGUUR 6.1 AFBRAAK VAN ORGANISCHE STOF MET EN ZONDER THERMISCHE VOORBEHANDELING VAN SECUNDAIR SLIB. LINKS: ALLEEN SECUNDAIR SLIB (GEEN VOORBEZINKING); RECHTS: PRIMAIR EN SECUNDAIR SLIB (WEL VOORBEZINKING)



Er is uitgegaan van de volgende effecten van de thermische voorbehandeling:

- de ontwateringsgraad van het slib stijgt met 7%;
- het PE-verbruik daalt met 20%.

6.3.2 RESULTATEN

Resultaten van de berekeningen met en zonder thermische voorbehandeling van (secundair) slib bij al dan niet toepassen van voorbezinking zijn samengevat in tabel 6.4.

TABEL 6.4 VERGELIJKING VAN THERMISCHE SLIBVOORBEHANDELING MET REFERENTIEVARIANTEN

variant		14	15	16	17
installatie					
voorbehandeling	-	geen	VBT	geen	VBT
hoofdlijn	-	actief slib	actief slib	actief slib	actief slib
slibreductie	-	geen	geen	geen	geen
slibvoorbehandeling	-	geen	geen	thermische	thermische
slibgisting	-	mesofiel	mesofiel	mesofiel	mesofiel
deelstroombehandeling	-	geen	geen	geen	geen
dimensies					
A-trap	m3				
voor/tussenbezinking	n x m dia		1 x 47.30		1 x 47.30
biologische ruimten	m3	16.800	12.730	16.960	11.370
anammox in hoofdlijn					
Cannibal					
wormenreactor					
nabezinking	n x m dia	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90	4 x 38.90
slibgisting	m3	1.463	1.482	548	835
slibproductie					
droge stof totaal	kg/d	3.389	3.095	2.750	2.805
chemisch slib	kg/d	0	28	0	0
organische stof	kg/d	2.072	1.841	1.435	1.560
afbraak organische stof	%	33	43	53	52
microzeefgoed					
droge stof totaal	kg/d	0	0	0	0
verbruik chemicaliën					
FeCl ₃	kg/d	20	25	16	17
PE	kg/d	45	37	38	34
verbruik energie					
voorbehandeling	kW	0,0	0,3	0,0	0,3
biologie	kW	217,4	187,1	218,6	179,8
anammox	kW	0,0	0,0	0,0	0,0
nabezinking	kW	0,3	0,3	0,3	0,3
slibindikking	kW	5,3	5,3	5,3	5,3
slibgisting	kW	7,0	7,1	2,6	4,2
slibontwatering	kW	11,3	10,3	9,2	9,3
overig	kW	37,5	41,9	37,5	41,9
totaal	kW	293	266	285	252
productie energie					
productie biogas	m ³ /d	754	1.241	1.230	1.479
gistings- en groen gas	kW	71	117	104	140
totaal verbruik	kW	222	149	181	112
opbrengst / verbruik	%	24	44	36	56
kosten					
investering	K EUR	29.510	31.450	29.015	30.530
exploitatie					
kapitaalslasten	K EUR / j	2.300	2.470	2.265	2.400
bedrijfsvoering	K EUR / j	1.555	1.461	1.344	1.342
totaal	K EUR / j	3.855	3.931	3.609	3.742
kosten per i.e.					
investering	Euro	295,1	314,5	290,2	305,3
exploitatie	Euro/j	38,60	39,30	36,10	37,40

Uit tabel 6.4 komt naar voren dat thermische hydrolyse - onder de gestelde voorwaarden - gunstiger is dan het niet toepassen ervan. Het is gunstiger bij het niet toepassen van voorbezinking dan bij het wel toepassen van voorbezinking.

Dit is het gevolg van de hoge concentratie die wordt bereikt door het toepassen van voorontwatering. De voornaamste besparing ligt niet alleen in de grotere energieproductie, maar ook in de vermindering van het PE-verbruik en de slibafzetkosten. De gemaakte aannames spelen dus een grote rol!

6.4 VOORBEHANDELING VAN SLIB DOOR ENZYMATISCHE HYDROLYSE

6.4.1 MODELPARAMETERS

In tabel 6.5 staan de aanpassingen van de modelparameters gegeven.

TABEL 6.5 WAARDEN VAN PARAMETERS ZONDER EN MÉT ENZYMATISCHE VOORBEHANDELING VAN SECUNDAIR SLIB

Parameter	Eenheid	Zonder voorbehandeling	Met voorbehandeling
maximale afbraak	% van organische stof	40	50
K	–	1,0	1,0

Volgens een leverancier van enzymen zou de totale afbreekbaarheid van het slib nauwelijks toenemen door de toevoeging van enzymen, zodat het belangrijkste voordeel ligt in de reductie van de verblijftijd in een groene-weide-situatie.

Hiermee is een dergelijk systeem in technologische zin te vergelijken met ultrasone voorbehandeling. Omdat de kosten van de enzymdosering niet bekend zijn, en omdat de resultaten naar verwachting nauwelijks zullen afwijken van vergisting bij hoge verblijftijden (circa 30 d), is deze optie verder niet uitgewerkt.

7

BIOGASBENUTTING

Met het oog op duurzaamheid wordt - naast de mogelijkheid om biogas te benutten in een WKK-installatie - gekeken naar efficiënte methoden om biogas op te werken tot aardgaskwaliteit.

7.1 GROEN GAS

7.1.1 MODELPARAMETERS

Groen gas is de groene equivalent van aardgas. Het is een verzamelnaam voor alle brandbare gassen verkregen uit hernieuwbare bronnen die in het gebruik als brandstof dezelfde kenmerken vertonen als aardgas. Aardgas uit het Slochteren veld in Groningen bestaat voor 81% uit methaan, voor 3,6% uit hogere gasvormige koolwaterstoffen, voor 0,4% uit zwavelwaterstof en voor de rest uit stikstof en kooldioxide (Bron: Gasterra).

Feitelijk is de route van biogas tot Groen gas de volgende:

- biogas reiniging en opwerking (drogen, zuiveren, concentreren);
- biogas conditionering (Wobbe, odorisatie);
- biogas invoeding (druk, meting, veiligheid).

Bij de productie van groen gas is geen plaats meer voor een WKK-installatie. Bij toepassing van een WKK installatie wordt uitgegaan van:

- elektriciteitsproductie : 35% van de energie in het biogas;
- warmteproductie : 50% van de energie in het biogas.

In deze studie wordt ervan uitgegaan dat de warmte alleen wordt gebruikt voor de opwarming van de slibgisting, en niet voor enige ander doel. Hierdoor wordt het rendement waarmee de geproduceerde warmte wordt aangewend, beperkt.

Bij het toepassen van groen gas is er echter geen warmte van een WKK-installatie beschikbaar om de gistingstank op te warmen. Voor die situatie wordt in deze berekeningen ervan uitgegaan dat het opwarmen van het slib en het op temperatuur houden van de gistingstank, met een warmtepomp wordt gerealiseerd. De warmtepomp kan de warmte bijvoorbeeld uit het effluent halen. Hiermee wordt de opbrengst aan groen gas gemaximaliseerd.

Met deze parameters kan eenvoudig de productie van groen gas worden berekend. Verder wordt uitgegaan van de volgende uitgangspunten voor de productie van groen gas:

- energieverbruik productie : 0,25 kWh/m³ groen gas (aardgasequivalenten);
- op druk brengen : 0,35 kWh/m³ groen gas (aardgasequivalenten).

De gebruikte kosten van de bewerking tot groen gas zijn gebaseerd op de kosten bij rwzi Beverwijk. Er is uitgegaan van de volgende (kale) kosten voor de installatie voor het maken van groen gas

$$K = 104 \times C$$

met K zijn de kosten in duizenden euro's en C is de capaciteit van de biogasverwerking in m³/d.

7.1.2 RESULTATEN

De berekende resultaten zijn samengevat in tabel 7.1. Er is uitgegaan van een opbrengst van het teruggeleverde groen gas van € 0,25 per m³. De energie-inhoud van groen gas is berekend voor de omzetting naar elektriciteit. Het in de tabel gepresenteerde energieverbruik is dat van een installatie met voorbezinking en mesofiele slibgisting, zoals van variant 30 in tabel 6.2.

TABEL 7.1 VERGELIJKING WKK EN PRODUCTIE VAN GROEN GAS. DE VERBRUIKEN EN KOSTEN ZIJN BETROKKEN OP DE GEHELE RWZI. DE ENERGIE-INHOUD IS GEGEVEN VOOR DE OMZETTING VAN GROEN GAS BIJ OMZETTING NAAR ELEKTRICITEIT

Variant		33	34
Beknopte beschrijving installatie			
voorbehandeling		VBT	VBT
slibgisting		ja	ja
WKK of groen gas		WKK	groen gas
Verbruik energie			
totaal	kW	286	309
Productie energie			
productie biogas	m ³ /d	1 265	1 265
gistingsgas	kW	119	0
groen gas	kW	0	136
Totaal verbruik	kW	167	173
Kosten			
investering			
totaal	K EUR	33 470	33 775
Exploitatie			
kapitaalslasten	K EUR / j	2 630	2 660
bedrijfsvoering	K EUR / j	1 682	1 750
totaal	K EUR / j	4 312	4 410
Kosten per i.e.			
investering	€	334.70	337.80
exploitatie	€/j	43.10	44.10

Uit de berekeningen volgt dat de productie van groen gas niet erg gunstig is. Als de prijs van groen gas hoger is dan nu is aangenomen, kan dit veranderen. Bij een opbrengst van tussen € 0,60 en € 0,70 per m³ is de productie van groen gas gelijkwaardig aan de inzet van een WKK. Het voordeel van de WKK-installatie wordt nog groter als er een afnemer in de buurt is voor de overtollige warmte of dat de WKK-installatie geplaatst wordt op een locatie waar warmte nodig is.

8

SLIBEINDVERWERKING

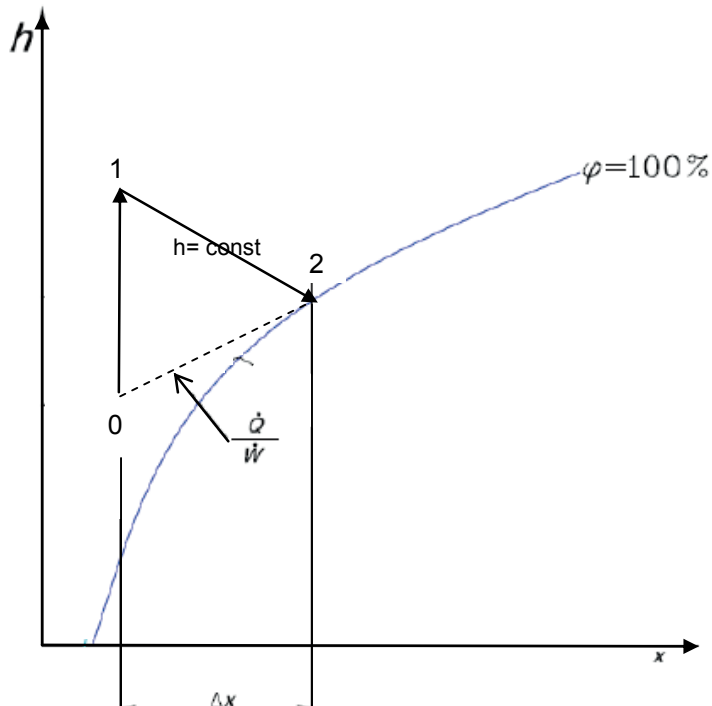
8.1 DROGEN MET LAAGWAARDIGE WARMTE

8.1.1 MODELPARAMETERS

Het proces vindt plaats in een aantal stappen:

- Opwarming van ventilatielucht door een bepaalde warmtebron tot een bepaalde temperatuur.
- In contact brengen van de opgewarmde lucht met het mechanisch ontwaterde slib, waarbij vocht uit het slib verdampt. Dit gebeurt zonder warmteverlies (adiabatisch); De lucht verlaat de voordroger in verzadigde toestand op een bepaalde evenwichts-temperatuur (die wordt door het model berekend). Slib wordt opgewarmd (tot dezelfde temperatuur) en (deels) gedroogd. Verder is het proces gelijk aan 'Indirecte thermische droging (rest-warmte), meestoken in een e-centrale'.
- Condensatie van het vocht uit de verzadigde lucht. Condensatie is mogelijk (naar condensaat van 65°C wat de uitvoer temperatuur van het condensaat naar rwzi is) als de temperatuur van de lucht hoger is dan deze temperatuur. Anders geeft de berekening een negatieve waarde en is waterkoeling t.b.v. condensatie niet nodig.
- Opwarming van de ventilatielucht, en zo voort (zie grafiek in figuur 8.1).

FIGUUR 8.1 MOLLIER H-X DIAGRAM MET LUCHT CONDITIES TIJDENS DE DROGINGPROCES

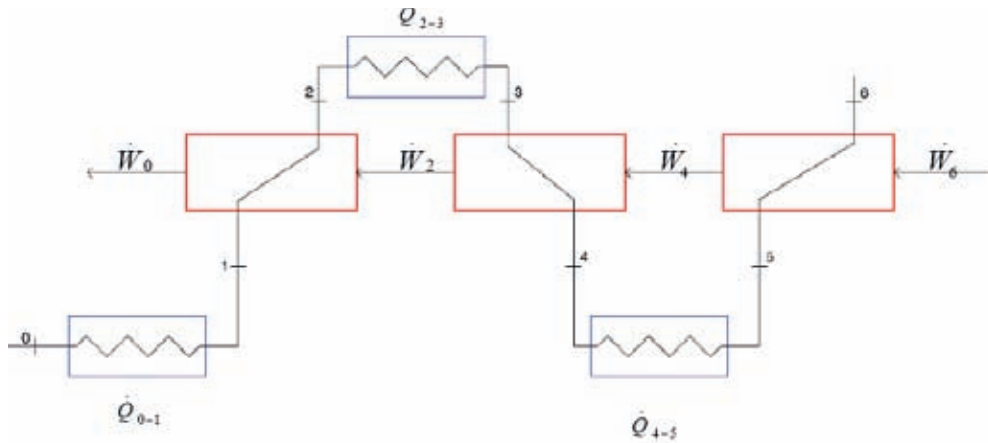


Uit balansen van vocht en energie komt de vergelijking voor

$$\frac{\dot{Q}}{\Delta \dot{W}} = \frac{h_6 - h_0}{x_6 - x_0}, \quad , \quad \text{waar } \dot{Q} \text{ is de massastroom (kg/s) van verdampt water.}$$

Het proces is in figuur 8.2 schematisch weergegeven.

FIGUUR 8.2 SCHEMA VAN LUCHTDROGING, CONDENSATIE EN RECIRCULATIE



De gegevens (hoeveelheid en temperatuur van het koelcircuit) worden van dat model overgenomen.

8.1.2 RESULTATEN

Resultaten van het doorrekenen van slibverwerkingsroutes waarin ook droging met laagwaardige warmte is opgenomen, zijn weergegeven in bijlagen 4, 5 en 6.

8.2 SUPERKRITISCHE VERGASSING

8.2.1 MODELPARAMETERS

Voor deze studie is gebruik gemaakt van gedetailleerde massa- en energiebalansen uit de literatuur⁵². Er wordt uitgegaan van een non-katalytisch proces met de reactor op 650°C in de aanvoer. In de gebruikte opzet is het conversie gas (of synthese gas) gezuiverd en gescheiden in twee stromen: waterstof en de rest van het gas. Deze rest van het gas wordt verbrand om de reactanten op te warmen. Waterstof wordt benut in een gasturbine. In het proces wordt ammoniumstikstof grotendeels, afhankelijk van de temperatuur, omgezet tot stikstofgas. Hierdoor is een deelstroomproces voor de stikstofverwijdering overbodig. De mogelijkheid bestaat om de hoeveelheid elektriciteit en warmte te berekenen voor twee gevallen: eenvoudig en WKK bedrijf van de turbineinstallatie (werkblad: “superkrit. verg.”, cel 32). Bij WKK bedrijf wordt met de warmte van de rookgassen stoom opgewekt en gebruikt in een stoomturbine om nog meer elektriciteit te maken.

Superkritische vergassing is in het rekenmodel uitgewerkt voor een schaalgrootte van 20.000 ton d.s. per jaar⁵³. Bij de Energiefabriek is uitgegaan van een installatie met een kleinere schaalgrootte, een schaalgrootte die overeenkomt met de verwerking van het zuiveringsslib dat vrijkomt op een rwzi met een capaciteit van 100.000 i.e. De redenering is dat de mechanische ontwatering dan achterwege kan blijven.

8.2.2 RESULTATEN

Resultaten van het doorrekenen van slibverwerkingsroutes waarin ook de superkritische vergassing is opgenomen, zijn weergegeven in figuren 9.6 tot en met 9.8 en meer in detail in bijlagen 4, 5 en 6.

8.3 VERGASSING

8.3.1 MODELPARAMETERS

Voor de opzet van het model is gebruik gemaakt van massa- en energiebalansen van een ontwerp voor een vergassingsinstallatie die bestemd was het vergassen van zuiveringsslib, parallel aan een energiecentrale⁵⁴, en ervaringen met de proefinstallatie in Borsele. Er wordt uitgegaan van een reactor temperatuur van 1.500°C. Stoom van 20 bar wordt ingezet als vergassingsmedium.

Na de vergassingsreactor wordt de stoom gekoeld tot circa 240°C en vervolgens gereinigd. Het syngas wordt na reiniging direct gebruikt in een STEG voor het opwekken van elektriciteit. Het syngas heeft een verbrandingswaarde van 9.600 kJ/kg.

8.3.2 RESULTATEN

Resultaten van het doorrekenen van slibverwerkingsroutes waarin ook de superkritische vergassing is opgenomen, zijn weergegeven in figuren 9.6 tot en met 9.8 en meer in detail in bijlagen 4, 5 en 6.

8.4 HYDRO THERMAL UPGRADING (HTU)

8.4.1 MODELPARAMETERS

Tot nu zijn alle verwerkingsroutes voor bepaalde biomassa voorgesteld. Het wordt aangenomen dat de invloed van vervuiling in slib geen invloed heeft op de opbrengsten van de producten.

De energiebalans is berekend met gebruik van CHNO elementaire analyse van de reactie producten volgens de formule van Reed⁵⁵:

$$\text{HHV}_{\text{dry}} = 0.341 \text{ C} + 1.322 \text{ H} - 0.12 (\text{O} + \text{N}) - 0.0153 \text{ ash} + 0.0686 \text{ S} \quad [\text{kJ/g}]$$

Indien nodig wordt de LHV berekend volgens de methode beschreven op de ECN phyllis web site⁵⁶.

$$\begin{aligned} \text{HHV}_{\text{ar}} &= \text{HHV}_{\text{dry}} \cdot (1-w/100) \\ \text{HHV}_{\text{dry}} &= \text{HHV}_{\text{daf}} \cdot (1-\text{ash}/100) \\ \text{LHV}_{\text{dry}} &= \text{HHV}_{\text{dry}} - 2.442 \cdot 8.936 \text{ H}/100 \\ \text{LHV}_{\text{ar}} &= \text{LHV}_{\text{dry}} \cdot (1-w/100) - 2.442 \cdot w/100 \\ \text{LHV}_{\text{ar}} &= \text{HHV}_{\text{ar}} - 2.442 \cdot \{8.936 \text{ H}/100 (1-w/100) + w/100\} \end{aligned}$$

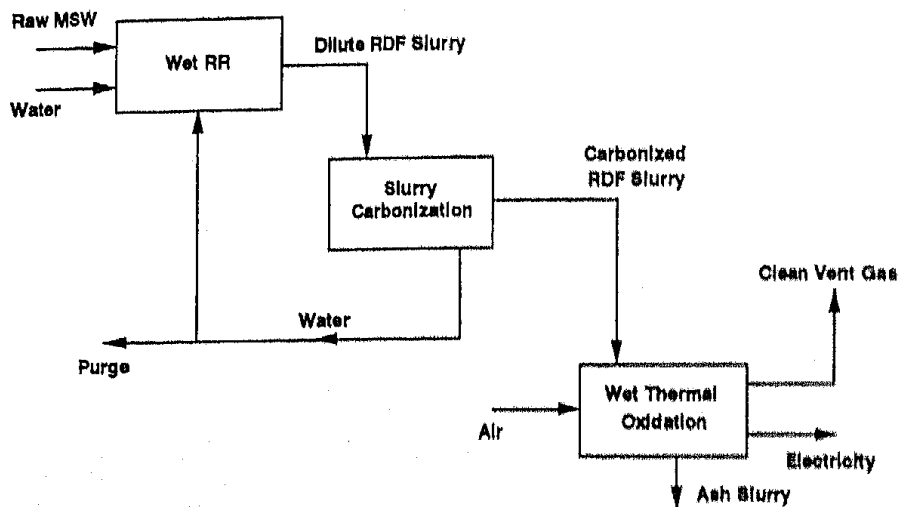
De mogelijkheid voor verbranding van bijproducten (gas) voor energierugwinning wordt niet in beschouwing genomen.

Het HTU-proces is gemodelleerd op basis van reactieproducten, zoals beschreven in de literatuur^{57,58,59}.

Verder zijn de reactieproducten van het HTU-proces (biocrude) in de modellering als brandstof gebruikt in een 'Indirecte thermische droging (restwarmte), meestoken in een energiecentrale' waar het gedroogd en verbrand wordt. De procesgegevens zijn vergeleken met de procesgegevens (voor hoever dat mogelijk is) van Slurrycarb in Rialto, CA⁶⁰. Dit is de enige commerciële installatie in de wereld. In figuur 8.3 is het vereenvoudigde schema van dit proces weergegeven.

FIGUUR 8.3

SCHEMA VAN ENERTECH SLURRYCARB PROCES



Ten aanzien van de stikstofbalans over het HTU-proces kan het volgende worden opgemerkt:

- op basis van literatuur⁶¹ is in de modellering uitgegaan van 9 - 10 wt% N in het slib;
- het aandeel aan ammoniak is aangenomen op 40 - 55% van de totale N hoeveelheid (in het model is nu 55% gebruikt - worst case scenario);
- in het gas is stikstof aanwezig als NH₃ (60 - 140 ppm), NO₂ (20 - 70 ppm), er vanuit gaande dat alkali gebruikt is als catalysator.

8.4.2 RESULTATEN

Resultaten van het doorrekenen van slibverwerkingsroutes waarin ook de superkritische vergassing is opgenomen, zijn weergegeven in bijlagen 4, 5 en 6.

In tabel 8.1 een overzicht opgenomen van enige karakteristieken van de verschillende nieuwe processen en de referentievariant.

TABEL 8.1 ENIGE KARAKTERISTIEKEN VAN DE VERSCHILLENDE NIEUWE PROCESSEN EN DE REFERENTIEVARIANT

Parameter	Eenheid	1	16	17	18	19
		mono-verbranding	LTD-proces	HTU-proces	superkritische vergassing	vergassing
Slib d.s.%	%	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
o.s.% van de d.s.	%	60.4	60.4	60.4	60.4	60.4
Eigen E-verbr.						
Primair	MJprim / i.e.	0	9	4	7	0
Elektrisch	MJprim / i.e.	44	50	50	50	73
stoom/ condensaat	MJprim / i.e.	0	85	9	0	140
zuurstof/hout	MJprim / i.e.	0	0	0	0	0
condensaat-behandeling	MJprim / i.e.	45	45	280	0	45
Energieopbrengst						
secundair	MJprim / i.e.	0	5	12	21	86
elektrisch	MJprim / i.e.	0	186	87	132	137
stoom	MJprim / i.e.	-3	0	0	0	24
Saldo	MJprim / i.e.	-92	1	-244	-185	-11
Capaciteit installatie	ton ds/j	100 000	20 000	20 000	20 000	20 000
Investering/i.e.	€ / i.e.	28.35	39.69	16.83	24.16	21.26
Expl.kosten/i.e.	€ / i.e.	5.38	5.17	3.75	4.09	4.22
Bewezen technologie		grootschalig bewezen	op praktijk-schaal bewezen	op semi-technische schaal getest	discontinu op pilot-schaal aangetoond	op praktijk-schaal bewezen

De resultaten kunnen gevoelig zijn voor bepaalde aannames, zoals bijvoorbeeld de temperatuur tijdens vergassing, of de hoeveelheid laagwaardige warmte bij lage-temperatuur droging.

9

ANALYSE

9.1 DE WATER- EN SLIBLIJN

In de slibketen dient gestreefd te worden naar een zo laag mogelijk verbruik van energie en hulpstoffen, vanzelfsprekend tegen zo laag mogelijke kosten.

De *Energiefabriek* is een initiatief van een aantal waterbeheerders om te streven naar een rioolwaterzuivering die energie oplevert in plaats van verbruikt. Het globale idee om een dergelijke rwzi te realiseren is om:

- eerst zoveel als mogelijk organische stof uit het afvalwater te verwijderen, door toepassing van voorbezinking met of zonder dosering van chemicaliën, door toepassing van microzeving van het afvalwater, of met behulp van een hoog belast actiefslibstelsysteem,

zodat

- het energieverbruik voor de oxidatie van resterend BZV en voor de nitrificatie en denitrificatie zo gering mogelijk is;

en

- zoveel als mogelijk energie te winnen uit het afgescheiden slib door toepassing van slibgisting.

Dit streven hoeft niet geheel parallel te zijn aan het streven naar een zo gering mogelijk energieverbruik in de gehele slibketen. Immers, bij het verwerken van het slib dat afkomstig is van een rwzi wordt ook energie verbruikt, en wel afhankelijk van de kwaliteit en de hoeveelheid slib die wordt aangeleverd.

Het totale energieverbruik op een rwzi bestaat voor een zeer belangrijk deel uit de energie die nodig is voor de oxidatie van BZV en stikstof in de beluchte ruimten, en de winst van energie (het negatieve energieverbruik) door de toepassing van energieproductie uit het tijdens de vergisting van slib gewonnen biogas.

De energie die nodig is voor de verwijdering van BZV en stikstof wordt sterk verminderd door toepassing van voorbehandeling. Daarom leveren voorbezinking met of zonder chemicaliëndosering, of een hoogbelast actiefslibstelsysteem een belangrijke bijdrage in de reductie van het energieverbruik.

Een belangrijk bijkomend voordeel van de verwijdering van zwevende stof uit het afvalwater is de geringere slibproductie van navolgende stappen. Hierdoor wordt het volume van de navolgende stappen beperkt, en daarmee de investeringskosten.

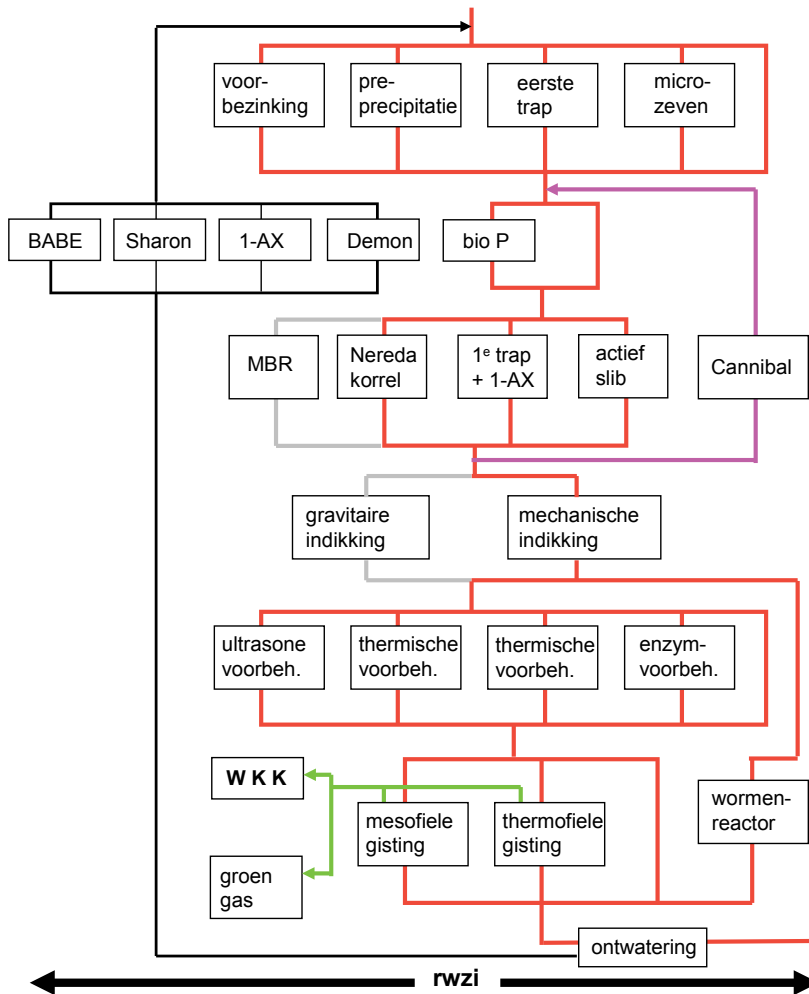
De productie van energie bij de slibgisting is gebaat bij een zo hoog mogelijke productie van (primair) slib, en bij een zo ver mogelijke (anaërobe) afbraak van het slib. De afbraak van het secundaire slib kan worden verbeterd door de toepassing van voorbehandelingsmethoden, zoals ultrasone, enzymatische of thermische voorbehandeling, die alle leiden tot een

verbetering van de afbraak van het secundaire slib tijdens de gisting, en daarmee tot een hogere energieproductie.

In hoofdstuk 4, 5 en 6 werden alternatieve technieken voor voorbehandeling, hoofdproces en slibbehandeling onderling vergeleken.

In dit hoofdstuk worden alle technieken tegelijkertijd vergeleken en is er ook aandacht voor de combinaties van mogelijkheden die met behulp van de verschillende technieken kunnen worden gemaakt. Allereerst is het complex aan varianten dat mogelijk voor de waterlijn samengevat in figuur 9.1.

FIGUUR 9.1 MOGELIJKHEDEN IN DE WATERLIJN



Hierbij moet worden aangetekend dat lang niet alle mogelijkheden die kunnen worden samengesteld uit het complex realistisch zijn. Alleen 'realistische' varianten zijn doorgerekend. Hierbij is uitgegaan van de volgende randvoorwaarden:

- als Cannibal[®] wordt toegepast, wordt geen voorbehandeling toegepast, behalve microzeven;
- als Cannibal[®] wordt toegepast, wordt geen slibgisting toegepast;
- als Cannibal[®] wordt toegepast, heeft biologische P-verwijdering geen zin;
- als Anammox in de hoofdlijn wordt toegepast, is er geen deelstroombehandeling;
- als Anammox in de hoofdlijn wordt toegepast, is er geen A-trap, maar een conventionele actiefslibinstallatie met sibleeftijd van twee dagen;
- als er geen slibgisting is, is er ook geen slibvoorbehandeling;
- als Nereda[®] wordt toegepast, is er geen biologische P-verwijdering (die is al in de Nereda[®] opgenomen);
- als Nereda[®] wordt toegepast, is er geen voorbehandeling (wel zeven en vetverwijdering);
- als er voorbehandeling is, dan is er geen slibvoorbehandeling, behalve bij microzeven;
- als er geen slibgisting is, is er ook geen deelstroombehandeling.

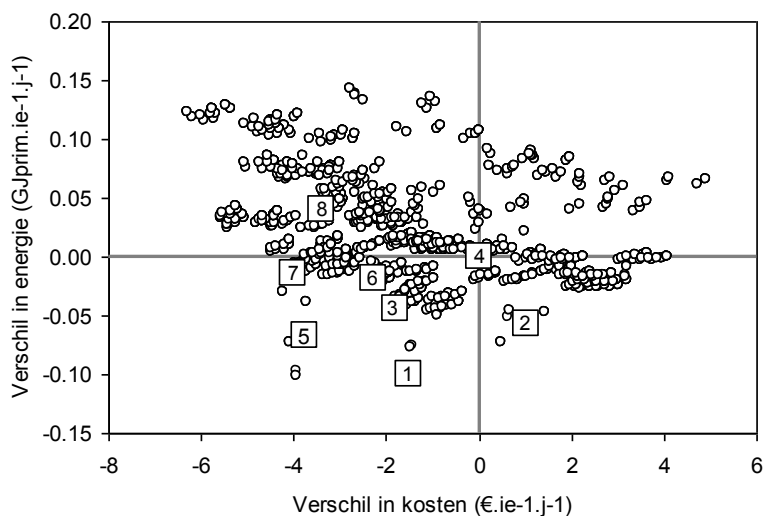
Een belangrijke indruk van zowel kosten als energieverbruik kan worden verkregen door beide te vergelijken met de kosten en het energieverbruik van een referentiesituatie. Deze analyse is uitgevoerd voor alle realistische varianten van de waterlijn, gecombineerd met één type slibeindverwerking die bestaat uit indirect drogen gevolgd door verbranden in een werfelbedoven voor zuiveringsslib (variant 1). Het resultaat van de analyse is te zien in figuur 9.2.

FIGUUR 9.2

VERSCHIL IN ENERGIEVERBRUIK, UITGEZET TEGEN HET VERSCHIL IN KOSTEN, VOOR ALLE REALISTISCHE VARIANTEN VAN DE WATERLIJN, VERGELEKEN MET ALLE ACHT REFERENTIEVARIANTEN AFKOMSTIG UIT DE EERSTE SLIBKETENSTUDIE, BEHANDELING IN MEMBRAANBIOREACTOREN IS NIET OPGENOMEN. DE ACHT REFERENTIEVARIANTEN VAN DE EERSTE SLIBKETENSTUDIE ZIJN:

- 1 : GEEN VOORBEZINKING, GEEN BIO-P, GEEN SLIBGISTING;
- 2 : VOORBEZINKING ZONDER BIO-P, ZONDER SLIBGISTING;
- 3 : GEEN VOORBEZINKING, GEEN BIO-P, WEL SLIBGISTING;
- 4 : VOORBEZINKING EN SLIBGISTING, ZONDER BIO-P (REFERENTIEVARIANT EN NULPUNT IN DE FIGUUR)
- 5 : ALS 1, MET BIO-P;
- 6 : ALS 2, MET BIO-P;
- 7 : ALS 3, MET BIO-P;
- 8 : ALS 4, MET BIO-P.

HET NULPUNT IN DE FIGUUR KOMT OVEREEN MET EXPLOITATIEKOSTEN VAN € 41,73 PER JAAR EN EEN ENERGIEVERBRUIK VAN -0.16 GJPRIM.I.E.-1.J-1.

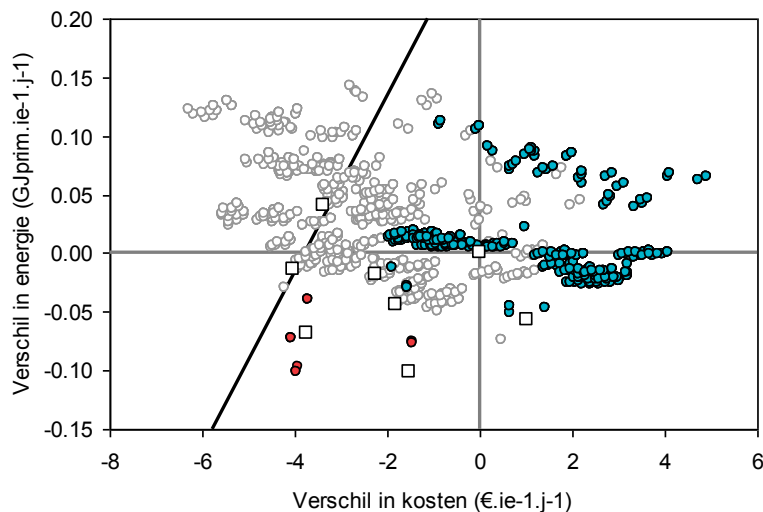


Het is duidelijk dat in vergelijking met de referentievariant, die hier bestaat uit voorbezinking met slibgisting en chemische P-verwijdering (variant 4), de varianten in het kwadrant rechtsonder in figuur 9.2 zowel duurder als energetisch minder voordelig zijn. Een groot deel van de varianten heeft weliswaar lagere kosten, maar het energieverbruik is hoger. Interessant zijn de varianten in het kwadrant linksboven in de figuur 9.2. Deze hebben zowel lagere kosten als een geringer energieverbruik dan de referentievariant.

Uit figuur 9.2 komt naar voren dat een groot aantal nieuwe technieken en combinaties van nieuwe technieken goedkoper en energiezuiniger zijn dan de energiezuinigste en economisch gunstige 'conventionele' variant uit de eerste slibketenstudie, de variant met voorbezinking, slibgisting en biologische P-verwijdering (variant 8).

Er kan ook worden uitgegaan van bepaalde toelaatbare kosten per kilowattuur ter compensatie van lagere of hogere kosten. De lijn die toelaatbare kosten van € 0,12 per kWh aangeeft is ter indicatie (in zwart) aangegeven in figuur 9.3. Door deze lijn te trekken door de gunstigste 'conventionele' variant (variant 8) zijn alle punten die links (en boven) deze lijn liggen, varianten die voldoen aan dit criterium, en die dus gunstiger geacht kunnen worden dan de gunstigste 'conventionele' variant.

FIGUUR 9.3 VERSCHIL IN ENERGIEVERBRUIK, UITGEZET TEGEN HET VERSCHIL IN KOSTEN, VOOR ALLE REALISTISCHE VARIANTEN VAN DE WATERLIJN, VERGELEKEN MET EEN REFERENTIEVARIANT (VOORBEZINKING MET SLIBGISTING ZONDER BIOLOGISCHE P-VERWIJDERING). DE ACHT REFERENTIEVARIANTEN ZIJN HIER ZONDER HUN NUMMERS OPGENOMEN (VERGELIJK MET FIGUUR 9.2) BEHANDELING IN MEMBRAANBIOREACTOREN IS NIET OPGENOMEN. VARIANTEN MET CANNIBAL[®] ZIJN ROOD AANGEGEVEN; VARIANTEN MET MICROZEVEN ZIJN BLAUW AANGEGEVEN

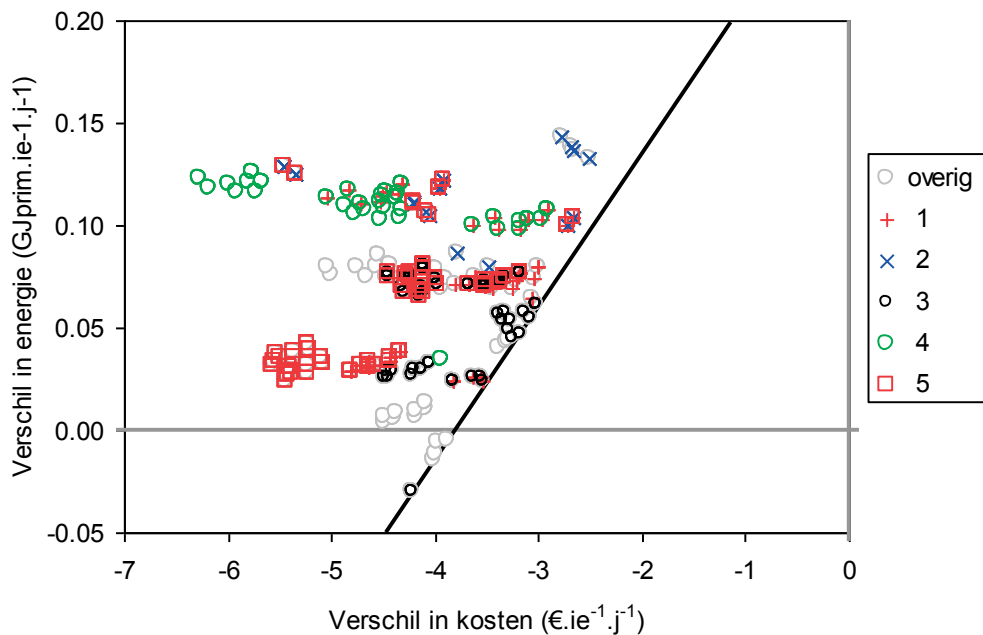


In figuur 9.3 zijn twee interessante technieken apart aangegeven. Toepassing van slibreductie met het Cannibal[®]-proces is aangegeven met rode symbolen.

Voor de varianten met microzeving (blauw aangegeven in figuur 9.3) geldt dat er geen opbrengst is toegekend aan het zeefmateriaal. Bij het eventueel toekennen van opbrengst aan het materiaal zouden de blauw aangegeven punten iets naar links verschuiven (circa € 0,70 per i.e. per jaar).

Voor de meeste van de 522 varianten die boven de zwarte lijn uit figuur 9.3 liggen is uitgezocht welke variant het precies betreft. Dit is te zien in figuur 9.4.

FIGUUR 9.4 VERSCHIL IN ENERGIEVERBRUIK, UITGEZET TEGEN HET VERSCHIL IN KOSTEN, VERGELEKEN MET EEN REFERENTIEVARIANT (VOORBEZINKING MET SLIBGISTING MET BIOLOGISCHE P-VERWIJDERING), VOOR ALLE VARIANTEN VOOR DE WATERLIJN DIE GOEDKOPER ZIJN DAN DEZE REFERENTIEVARIANT, EN DIE VOLDOEN AAN DE RANDVOORWAARDE DAT HET VERSCHIL IN KOSTEN NIET MEER DAN 0,12 €/KWH MAG BEDRAGEN. DE VERSCHILLENDE GROEPEN WORDEN IN DE TEKST BESPROKEN



In figuur 9.4 zijn een aantal groepen punten aangegeven. Dit betreft varianten die allemaal belangrijke elementen gemeen hebben:

- groep 1 betreft varianten met groen gas;
- groep 2 betreft varianten met Anammox in de hoofdlijn;
- groep 3 betreft varianten met Nereda[®] in de hoofdlijn;
- groep 4 heeft betrekking op varianten met een tweetrapsproces;
- groep 5 heeft betrekking op varianten met thermische voorbehandeling van het slib.

Bestudering van de figuur laat zien dat met name combinaties van energetisch gunstige technieken veel voordeel kunnen opleveren. De grijze punten in de figuur betreffen verschillende, niet nader uitgezochte en niet gerelateerde, combinaties van technieken. Biologische P-verwijdering, gecombineerd met slibvoorbehandeling en chemische P-verwijdering met thermofiele slibgisting zijn er daar bijvoorbeeld twee van.

Deelstroombehandeling (niet in de figuur aangegeven) in een Demon of Anammox proces levert bij de gekozen afvalwatersamenstelling voor de varianten in de figuur gemiddeld een kostenvoordeel op van € 0,88 per i.e. en is energetisch zo goed als neutraal (verschil - 0,006 GJprim/i.e.). Dit is consistent met eerdere berekeningen⁶².

In deze analyse is rekening gehouden met de energie die voor de dosering van chemicaliën in rekening kan worden gebracht. Als dat niet wordt gedaan, komt het beeld er iets anders uit te zien, omdat met name bij de toepassing van pre-precipitatie, maar ook bij chemische P-verwijdering, chemicaliën worden gedoseerd, die bijdragen aan het energieverbruik.

Het voordeel van een tweetrapsproces is afhankelijk van de volgende twee zaken:

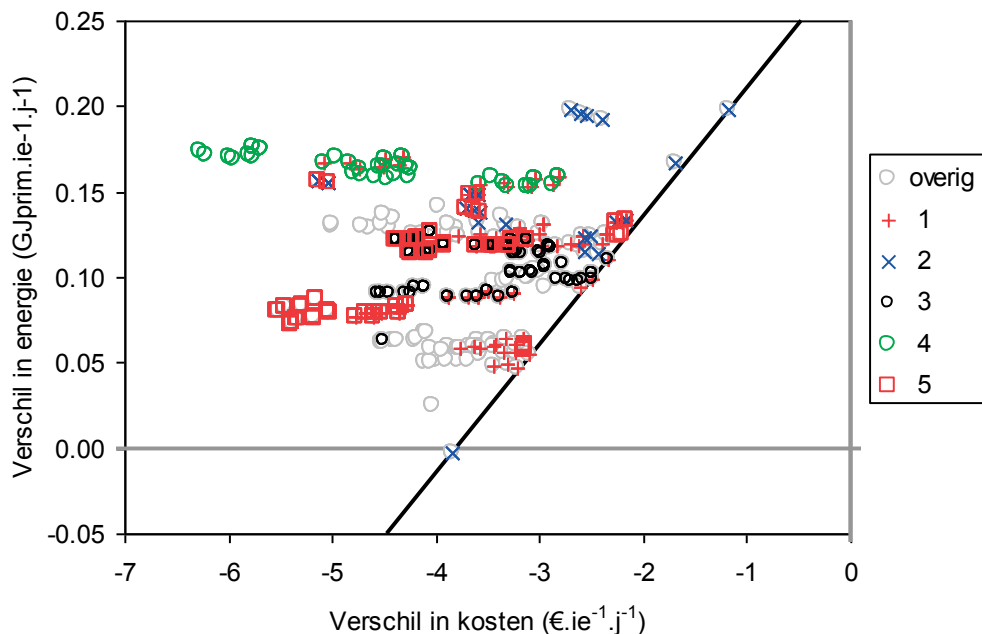
- het is essentieel dat een goede en effectieve tussenbezinking wordt toegepast; in het verleden is er op het ontwerp van de tussenbezinking meerdere malen kritiek gebleken;
- een gunstige verhouding tussen BZV en stikstof in het influent is een voorwaarde om het proces energetisch en financieel gunstig te kunnen bedrijven; waarschijnlijk is deelsroombehandeling min of meer noodzakelijk. Als niet aan deze randvoorwaarde wordt voldaan dient een externe C-bron te worden gedoseerd, die bijdraagt aan de kosten en aan het energieverbruik. Bij de huidige aangenomen afvalwatersamenstelling is dosering van een C-bron niet nodig.

Het voordeel van het toepassen van een hoogbelaste installatie met Anammox in de hoofdlijn is, zoals al eerder opgemerkt, volledig afhankelijk van de - nog aan te tonen - toepasbaarheid van het proces bij de temperatuur van het afvalwater.

Het energetische voordeel van thermische voorbehandeling van het slib, dat betrekkelijk evident is, ligt vooral in de verbeterde ontwatering. Mocht het zo zijn dat thermische voorbehandeling het slib van de eerste trap van een tweetrapsysteem goed uitvoerbaar is en succesvol kan worden uitgevoerd, dan zou dat energetisch een zeer voordelig proces zijn. Nu wordt thermische voorbehandeling alleen toegepast bij systemen zonder voorbehandeling, en deze zijn van nature energetisch al minder voordelig dan systemen met voorbehandeling.

Dezelfde analyse is gemaakt met een ander type slibeindverwerking, te weten lagetemperatuurdroging (LTD) in plaats van indirecte droging gevolgd door verbranding in een wervelbedoven. De figuur komt er dan niet zeer verschillend uit te zien, zie figuur 9.5. In de figuur is hetzelfde nulpunt aangehouden als in figuur 9.4, om het verschil duidelijk naar voren te laten komen.

FIGUUR 9.5 VERSCHIL IN ENERGIEVERBRUIK, UITGEZET TEGEN HET VERSCHIL IN KOSTEN, VERGELEKEN MET EEN REFERENTIEVARIANT (13021, VOORBEZINKING MET SLIBGISTING ZONDER BIOLOGISCHE P-VERWIJDERING), VOOR VARIANTEN VOOR DE WATERLIJN DIE GOEDKOPER ZIJN DAN DE REFERENTIEVARIANT, EN DIE VOLDOEN AAN DE RANDVOORWAARDE DAT HET VERSCHIL IN KOSTEN NIET MEER DAN 0,12 € PER KWH MAG BEDRAGEN. DE GRIJZE EN ZWARTE LIJNEN EN DE LEGENDA VAN DE FIGUUR ZIJN DEZELFDE ALS IN FIGUUR 9.4



Figuur 9.5 laat in principe ongeveer hetzelfde zien als figuur 9.4, behalve dat de punten allemaal iets naar 'linksboven' zijn verschoven -dus: minder kosten en minder energieverbruik. Lage-temperatuurodroging leidt dus voor alle varianten tot een energetisch gunstiger situatie dan indirecte droging in een wervelbed van figuur 9.4. Daarom liggen er nu veel meer punten in het 'gunstige' gebied. Bij superkritische vergassing is het effect nog sterker.

9.2 DE SLIBEINDVERWERKING

De slibeindverwerking onttrekt zich aan een dergelijke analyse, omdat de geproduceerde slibhoeveelheden per variant sterk verschillen. Om dit deels te ondervangen zijn alle slibeindverwerkingstechnieken (van zowel Slibketenstudie I als II) met elkaar vergeleken, waarbij voor de water- en sliblijn is uitgegaan van dezelfde variant (geen voorbezinking, geen slibgisting en geen bio-P verwijdering), te beschouwen als de referentievariant. Varianten met het storten van slib zijn niet meegenomen.

De resultaten voor:

- energieverbruik (in GJprim/ton d.s. en GJprim/i.e.);
- kosten (in €/ton d.s. en €/i.e.);
- CO₂-emissie (in kg/ton d.s. en kg/i.e.);

zijn nader bestudeerd.

Daarnaast zijn de globale resultaten voor de slibeindverwerking weergegeven aan de hand van een analyse van het effect van het drogestofgehalte van het slib op de kosten en het energieverbruik van de eindverwerking.

9.2.1 VERGELIJKING VAN ENKELE SPECIFIEKE SCENARIO'S VOOR SLIBKETENSTUDIE II

De achttien varianten voor de slibeindverwerking zijn samengevat in tabel 9.1.

TABEL 9.1

SAMENVATTING VAN DE VARIANTEN VOOR DE SLIBEINDVERWERKING

Nummer	Omschrijving
1	Indirecte droging, wervelbed
2	Natte oxidatie
3	Meeverbranden AVI
4	Biologische droging, meestoken in een e-centrale
5	Directe thermische droging (aardgas), meestoken in een e-centrale
6	Indirecte thermische droging (restwarmte), meestoken in een e-centrale
7	Biologische droging, meestoken in een cementoven
8	Directe thermische droging (aardgas), meestoken in een cementoven
9	Indirecte thermische droging (restwarmte), meestoken in een cementoven
13*	1 Indirecte droging, verbranding in een wervelbed + tegendrukturbine
14	2 Indirecte droging, verbranding in een wervelbed + condensatieturbine
15	3 Indirecte droging, verbranding in een wervelbed + dampcompressie
16	Lage temperatuur droging + meestoken in een e-centrale
17	Hydrothermale verwerking (HTU) en verbranding van biocrude
18	Superkritische vergassing en verbranding van gas
19	Vergassen

*: varianten met storten van slib (10, 11 en 12 uit de eerste slibketenstudie) zijn niet meegenomen.

Het rekenmodel voor de water- en sliblijn en het rekenmodel voor de slibeindverwerking zijn gebruikt om een aantal slibverwerkingsketens door te rekenen, zodat deze ketens zowel energetisch als financieel met elkaar kunnen worden vergeleken. Voor de rwzi's zijn er theoretisch 64.800 varianten, waarvan er ongeveer 6.200 realistisch zijn. Deze kunnen worden gecombineerd met in totaal 19 slibeindverwerkingsroutes.

Omdat dit teveel combinaties zijn om alle te laten zien, is ervoor gekozen om een beperkt aantal combinaties met elkaar te vergelijken. De gekozen combinaties zijn gericht op het zichtbaar maken van effecten bij het doen van keuzes in de keten die fundamenteel van elkaar verschillen. De gekozen scenario's zijn opgenomen in tabel 9.2, met daarbij aangegeven wat de achterliggende gedachte is geweest bij het kiezen van de betreffende combinatie.

De gekozen scenario's zijn de volgende:

TABEL 9.2 OVERZICHT VAN DE GEKOZEN SCENARIO'S

Variant	Onderdelen	Achterliggende gedachte
A	Conventionele hoofdstroom (minimalisatie afbraak BZV)	Dit is de referentievariant die ook als referentie is gebruikt in de eerste slibketenstudie: zonder VBT, zonder gisting en zonder Bio-P. Er wordt gestreefd naar maximalisatie van de energieproductie bij de slibeindverwerking.
B	Voorbezinking Conventionele hoofdstroom mesofiele vergisting met WKK	Met het doorrekenen van deze route kan het effect van voorbezinking en maximale vergisting worden vergeleken met microzeven en een maximale vergisting van voornamelijk het spuislib.
C	Conventionele hoofdstroom Cannibal [®]	Minimalisatie van de slibproductie.
D	Microzeef Hoogbelaste hoofdstroom Anammox in de hoofdlijn Cannibal [®]	Minimalisatie slibproductie.
E	Microzeef Bio-P verwijdering Conventionele hoofdstroom Thermische hydrolyse Thermofiele gisting met WKK	Zo snel mogelijk verwijderen van moeilijk afbreekbaar organische bestanddelen, terwijl de rest van het organische materiaal zoveel mogelijk wordt omgezet in biogas.
F	Microzeef, conventionele hoofdstroom, thermische hydrolyse Mesofiele vergisting met WKK	De organische stof die niet of moeilijk afbreekbaar is, en bij kan dragen aan een hoge energieproductie, moet zo snel mogelijk worden afscheiden en separaat worden ontwaterd. Dit verhoogt de effectiviteit van de thermische hydrolyse, die voornamelijk gericht is op vernietiging van de celwanden van het secundaire slib.
G	Tweetrapsproces Thermofiele gisting	Minimalisatie van het E-verbruik, waarbij geen deelstroombehandeling wordt toegepast.
H	Tweetrapsproces Mesofiele vergisting met WKK deelstroombehandeling met 1-step Anammox	Maximale productie van slib, en daarmee maximale energieproductie, primair via vergisting en vervolgens via de slibeindverwerking.
I	Anammox in de hoofdlijn Mesofiele vergisting met WKK	Volledige herziening van het bestaande zuiveringsproces met mesofiele vergisting, door geen stikstof in de actiefslibtank te verwijderen. De stikstof wordt in de hoofdstroom verwijderd via de Anammox, waardoor bespaard wordt op het eigen verbruik aan elektriciteit.
J	Hoogbelaste eerste trap Anammox in de hoofdlijn	Maximalisatie van de slibproductie door wel voorbezinking maar geen gisting toe te passen. Voor de stikstofverwijdering wordt Anammox in de hoofdlijn toegepast.

De berekeningsresultaten van de doorgerekende slibverwijderingsketens zijn opgenomen in bijlage 4, 5 en 6.

In tabel 9.3 is systematisch aangegeven welke varianten zijn doorgerekend in combinatie met respectievelijk de slibeindverwerkingstechnieken:

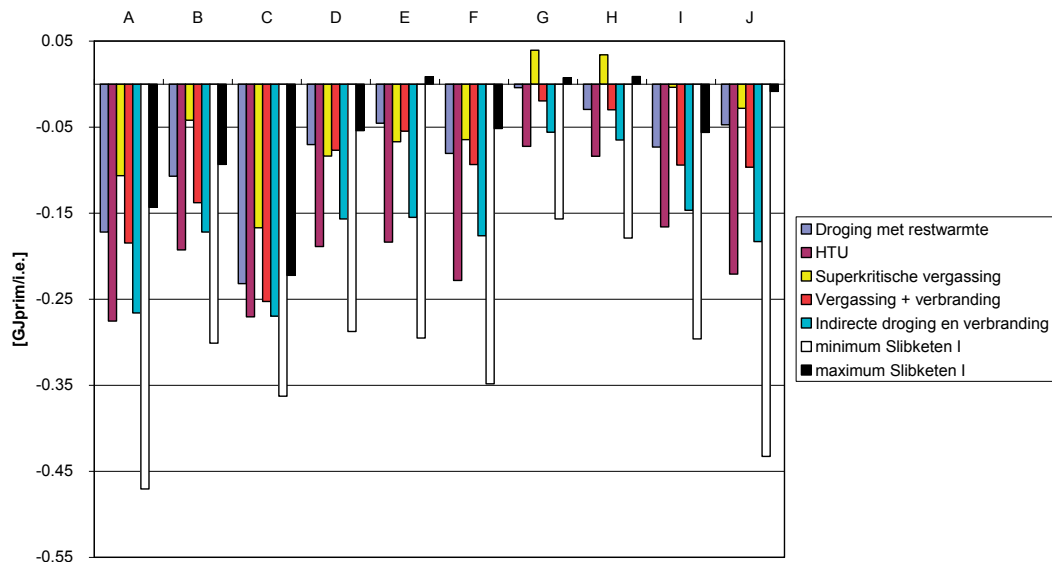
- droging met laagwaardige warmte, gevolgd door meestoken in een e-centrale;
- HTU-proces;
- superkritische vergassing;
- indirecte droging en vergassing;
- indirecte droging en verbranding (referentie uit slibketenstudie I).

De berekeningsresultaten voor het energieverbruik, de verwerkingskosten en de CO₂-uitstoot, gerekend over de hele keten, zijn grafisch weergegeven in figuren 9.6 tot en met 9.10. Ter vergelijking is telkens ook het minimum en het maximum van de overige in de eerste slibketenstudie bestudeerde eindverwerkingstechnieken aangegeven. De berekende waarden zijn in tabelvorm opgenomen in bijlagen 4.

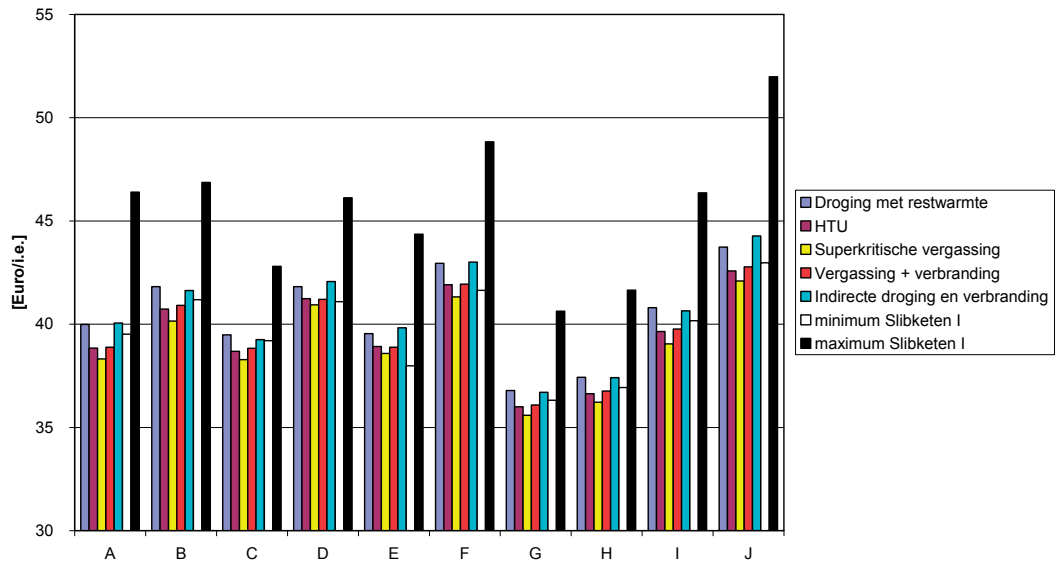
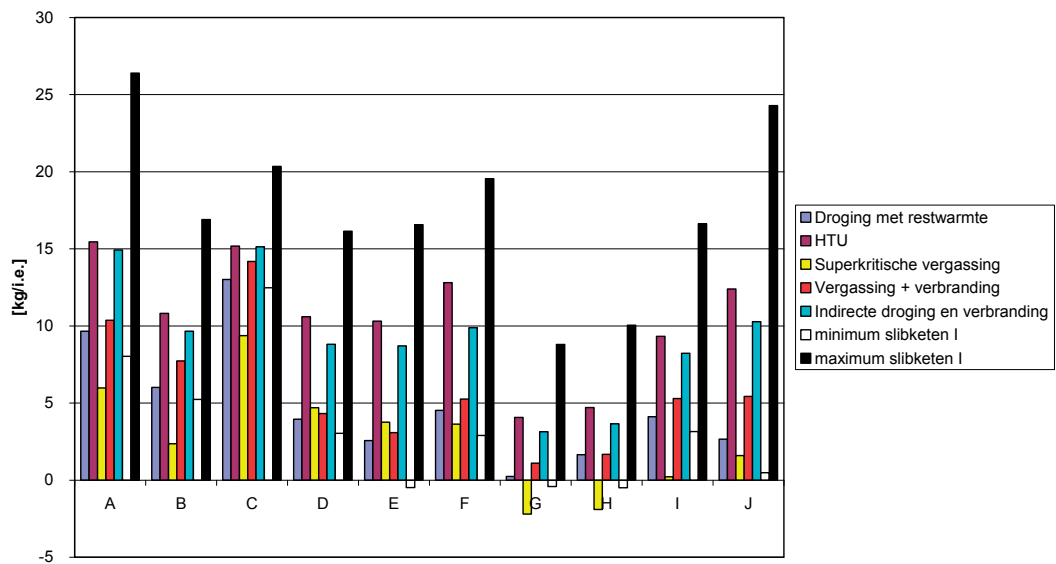
TABEL 9.3 VERKORTE SAMENVATTING VAN DE SCENARIO'S

	VB	Bio-P	Hoofd	Cannibal	Slibvb	Gist	Ontwater	Deel
A	-	-	AS	-	-	-	zeefband	-
B	VBT	-	AS	-	-	meso	zeefband	-
C	-	-	AS	ja	-	-	zeefband	-
D	microZ	ja	1-st AX	ja	-	-	centrifuge	-
E	microZ	ja	AS	-	thermisch	thermo	zeefband	-
F	microZ	-	AS	-	thermsch	thermo	zeefband	-
G	1e trap	-	2e trap	-	-	thermo	zeefband	-
H	1e trap	-	2e trap	-	-	meso	zeefband	Anammox
I	-	-	1-st AX	-	-	meso	zeefband	-
J	VBT	-	1-st AX	-	-	-	zeefband	-

FIGUUR 9.6 ENERGIEOPBRENGST PER I.E. VAN DE SCENARIO'S A TOT EN MET J (ZIE TABEL 9.2 EN 9.3). DE MINIMALE EN MAXIMALE WAARDEN UIT DE EERSTE SLIBKETENSTUDIE ZIJN TER VERGELIJKING OOK OPGENOMEN

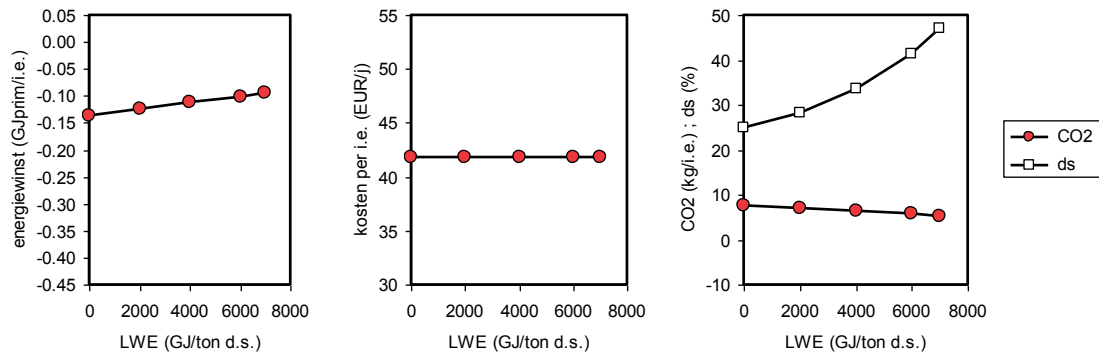


FIGUUR 9.7 VERWERKINGSKOSTEN PER I.E. VAN DE SCENARIO'S A TOT EN MET J (ZIE TABEL 9.2 EN 9.3)

FIGUUR 9.8 CO₂-EMISSIE PER I.E. VAN DE SCENARIO'S A TOT EN MET J (ZIE TABEL 9.2 EN 9.3)

De energiewinst, verwerkingskosten en CO₂-emissie bij lagetemperatuurdroging zijn natuurlijk afhankelijk van de hoeveelheid (laagwaardige) energie die beschikbaar is. In de berekeningen is uitgegaan van 5.000 MJ/kg ds. Deze hoeveelheid warmte is arbitrair, zodat in figuur 9.9 is weergegeven in welke mate de energiewinst, de verwerkingskosten en de CO₂-emissie afhankelijk zijn van de hoeveelheid (laagwaardige) energie die bijna gratis (tegen 20% van de kosten, uitgedrukt in de waarde van aardgas) kan worden verkregen.

FIGUUR 9.9 ENERGIEWINST, KOSTEN EN CO₂-EMISSIE PER I.E. ALS FUNCTIE VAN DE AANGENOMEN HOEVEELHEID LAAGWAARDIGE WARMTE. VOOR HET BEGRIP ZIJN IN DE FIGUREN DEZELFDE Y-ASSEN AANGEHOUDEN ALS IN FIGUUR 9.6 TOT EN MET 9.8



9.3 ELEMENTEN VAN DE ENERGIEBALANS OVER RWZI, EINDVERWERKING EN GEHELE KETEN

Het is niet goed mogelijk een sluitende balans op te stellen van de hoeveelheden energie die bij de rwzi relevant zijn. Posten als verdamping en straling zijn niet goed te kwantificeren. Voor de slibeindverwerking is dit beter mogelijk, en deze balansen zijn ook weergegeven in bijlage 4, 5 en 6.

De energie-inhoud van de belangrijkste componenten van de rwzi en de eindverwerking kunnen een redelijk beeld geven van de onderlinge verhoudingen binnen de gehele keten. Het is echter ondoenlijk om deze voor alle combinaties uit de figuren 9.6 tot en met 9.8 te laten zien. In figuur 9.10 is de energie-inhoud weergegeven van de belangrijkste elementen voor:

- de rwzi (A);
- de eindverwerking (B);
- en de gehele slibketen (C).

Dit is voor vier combinaties van de water- en sliblijn en de slibeindverwerking weergegeven.

Voor de rwzi (figuren A in figuur 9.10) zijn aan de ingaande kant de energie in het afvalwater en die bij de beluchting te zien, alsmede het impliciete energieverbruik van de chemicaliën. Aan de uitgaande kant is er de energie die is vastgelegd in de organische stof van het slib, de energie in het effluent en de energie die is vrijgekomen als warmte bij de oxidatie van de vuillast door het slib (uitgaande van 14 kJ/g COD en 18 kJ/g N^{63,64}) en de energie die de elektriciteitsproductie door het eventueel gevormde biogas representeert. Het verbruik is de ingaande energie van elektriciteit en chemicaliën min de uitgaande biogas-energie.

Voor de slibverwerking (figuren B in figuur 9.10) zijn de energie van de organische stof in het slib en de ingaande energie van elektriciteit en hulpstoffen en de condensaatbehandeling de posten aan de 'in'-kant, terwijl de elektrische energieproductie aan de 'uit' kant staat. Het verbruik is het verschil tussen de posten aan de ingaande kant, met uitzondering van de energie in het slib, en de energie aan de uitgaande kant.

Voor de gehele keten (figuren C in figuur 9.10) kunnen de belangrijkste posten nu worden samengevat met de energie voor de rwzi plus de chemicaliën en de energie die in de slibeindverwerking wordt verbruikt aan de ingaande kant, en de energie die wordt gewonnen in de slibeindverwerking en die hoort bij het winnen van elektriciteit uit het biogas aan de uitgaande kant. Het verschil tussen de twee is het energieverbruik over de gehele keten.

In figuur 9.10.1 zijn de elementen van de energiebalans gegeven van de rwzi A (dit is een actiefslib installatie zonder voorbezinking en slibgisting), waarbij het slib wordt verwerkt in slibeindverwerking 1, zijnde een indirecte slibdroging en verbranding in een wervelbed. In figuur 9.10.2 zijn dezelfde posten gegeven, eveneens van de rwzi type A in combinatie met slibeindverwerking 16: lage temperatuur droging met E-opwekking. In figuur 9.10.3 van de rwzi type B (dit is een installatie met voorbezinking, en mesofiele vergisting in combinatie met slibeindverwerking 16. In figuur 9.10.4 is zijn dezelfde posten weergegeven van de rwzi type G (dit is een tweetrapsproces met thermofiele vergisting) in combinatie met eindverwerking 16.

Uit de hierna volgende figuren wordt na enige studie duidelijk dat:

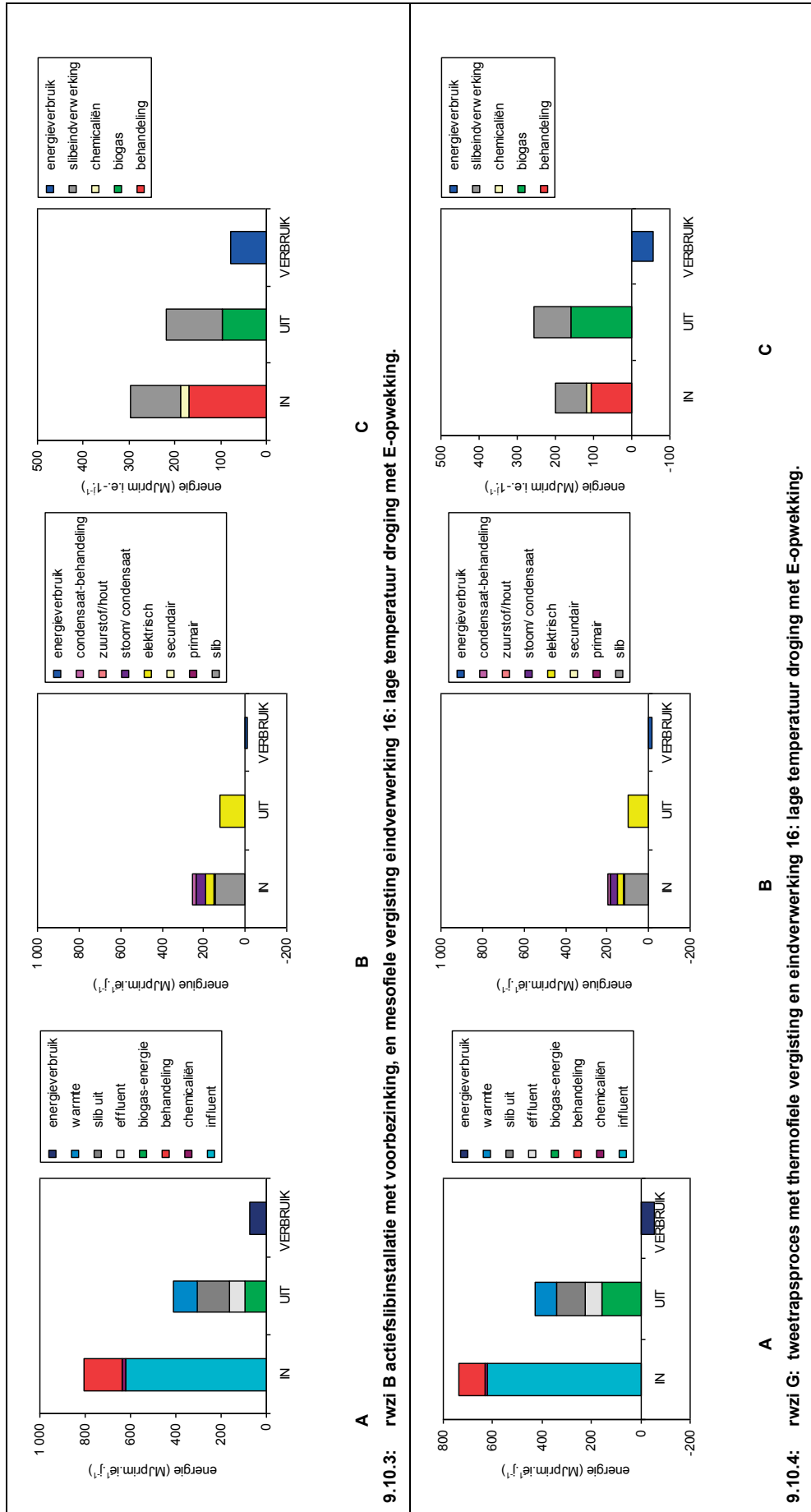
- lage temperatuurdroging energetisch voordeliger is dan indirecte slibdroging en verbranding (vergelijk figuur 9.10.1 met 9.10.2);
- slibgisting veel energetisch voordeel oplevert (vergelijk figuur 9.10.2 met 9.10.3): de hoeveelheid energie die wordt gewonnen bij de slibgisting (groen balkje in 9.10.3.A) is aanzienlijk groter dan de verminderde energiewinst bij de eindverwerking (vergelijk blauwe balkjes van 'verbruik' in figuur 9.10.3 B en 9.10.3.C);
- een tweetrapsproces, gecombineerd met een energetisch gunstige eindverwerking kan leiden tot een energetisch gunstige slibketen (zie figuur 9.10.4 en vergelijk met figuur 9.10.3).

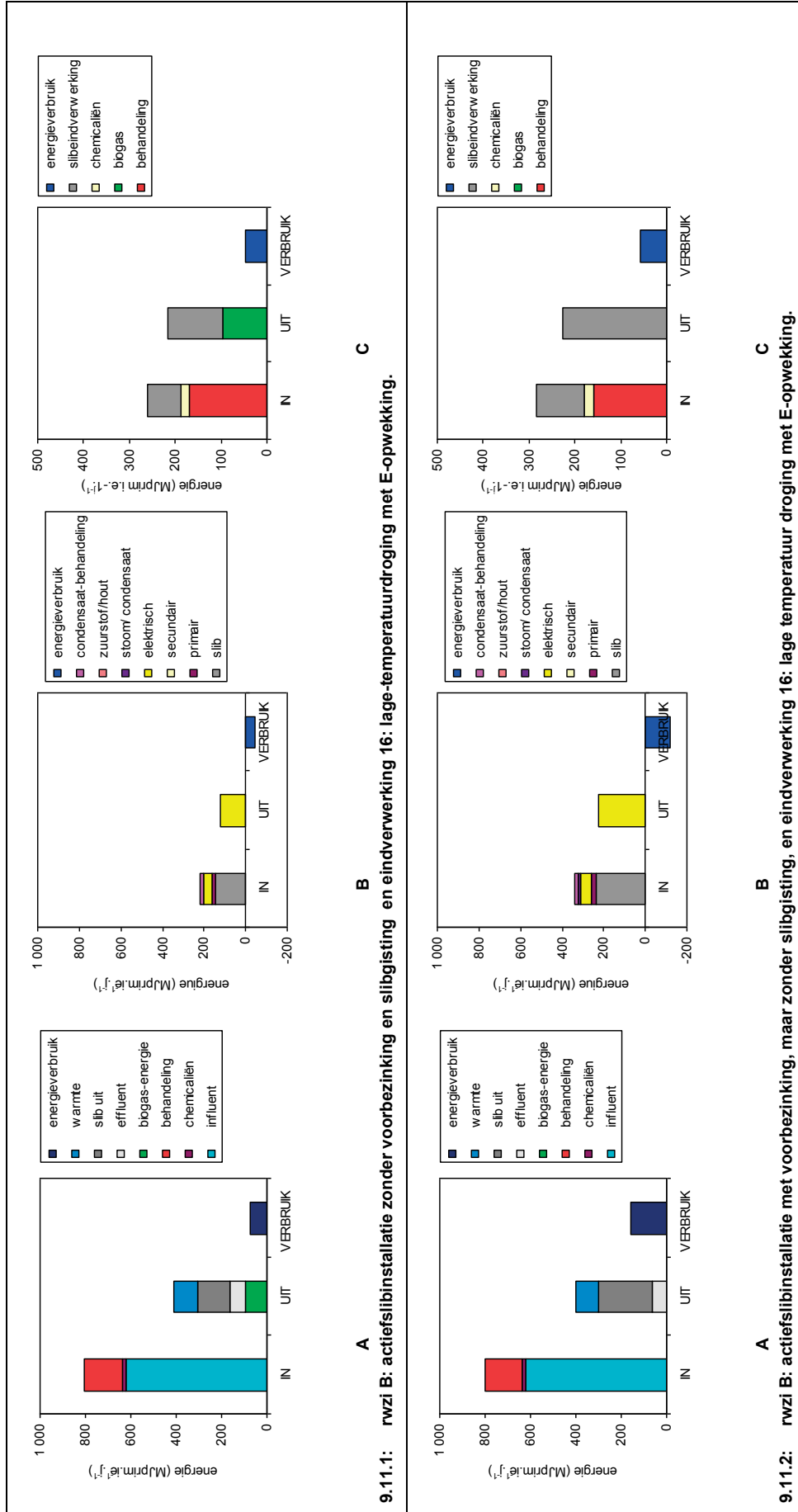
Figuur 9.10.4 laat zien dat de combinatie van rwzi G, tweetrapsproces, gecombineerd met eindverwerking 16 (lage temperatuur droging met meestoken in een e-centrale) als een 'Energiefabriek' kan worden opgevat, met inbegrip van de eindverwerking. Dit is in overeenstemming met de conclusies van 'de Energiefabriek'.

De belangrijke vraag of slibgisting eigenlijk wel zin heeft als de eindverwerking energie oplevert, kan worden beantwoord na bestudering van een rwzi met en een zonder slibgisting in combinatie met een energetisch gunstige slibeindverwerking. Voor de laatste is lagetemperatuurdroging met een hoge hoeveelheid (12.000 MJ/kg ds) beschikbare laagwaardige warmte van 80°C gekozen. De resultaten zijn te zien in figuur 9.11.

Uit figuur 9.11 komt naar voren dat - zelfs bij een zeer energiezuinige slibeindverwerking - de slibgisting meer energie oplevert dan het energieverbruik zonder slibgisting vermindert. Het groene balkje in figuur 9.11.2.A is groter dan het verschil in de blauwe balkjes die het verbruik aangeven in figuur 9.11.2.B en 9.11.1.B.

Alleen bij een belangrijk hoger drogestofgehalte dan nu is aangenomen, of een energetisch nog gunstiger slibeindverwerking, zou de conclusie dat slibgisting overbodig is, gerechtvaardigd zijn.



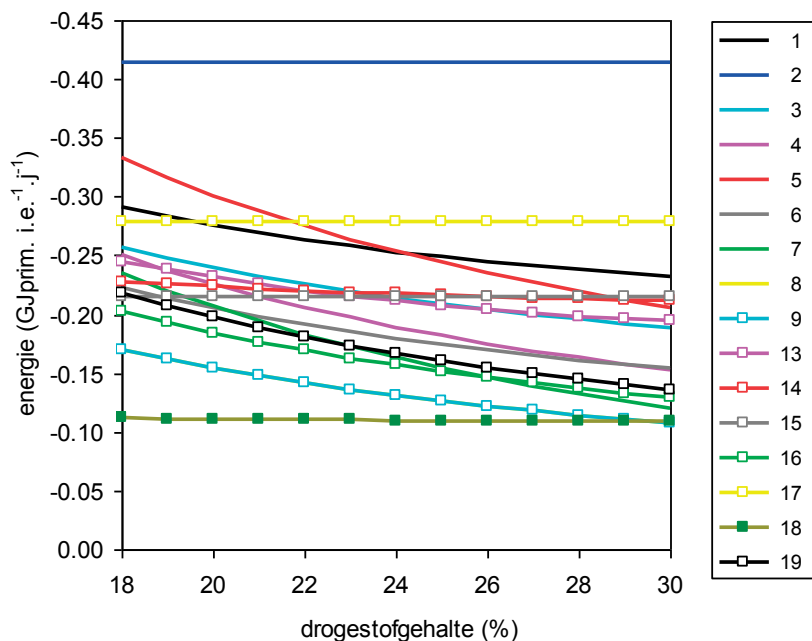


9.3.1 EFFECT VAN HET DROGESTOFGEHALTE OP ENERGIE EN KOSTEN VAN DE SLIBEINDVERWERKING

Een belangrijke vraag is of het drogestofgehalte van het slib dat naar de eindverwerking wordt getransporteerd, grote invloed heeft op de kosten en het energieverbruik in de gehele slibketen. Dit is voor één variant van de waterlijn geanalyseerd. Andere varianten van de waterlijn laten voor wat betreft de slibeindverwerking alleen verschillen in de slibproductie zien, zodat de conclusies voor andere varianten van de waterlijn bijna dezelfde zullen zijn.

In figuur 9.12 is het effect van het drogestofgehalte op het energieverbruik in de verschillende varianten van de slibeindverwerking te zien.

FIGUUR 9.12 EFFECT VAN HET DROGESTOFGEHALTE VAN HET SLIB OP DE ENERGIEPRODUCTIE TIJDENS DE EINDVERWERKING. ZIE TABEL 9.1 VOOR DE OMSCHRIJVING VAN DE VARIANTEN



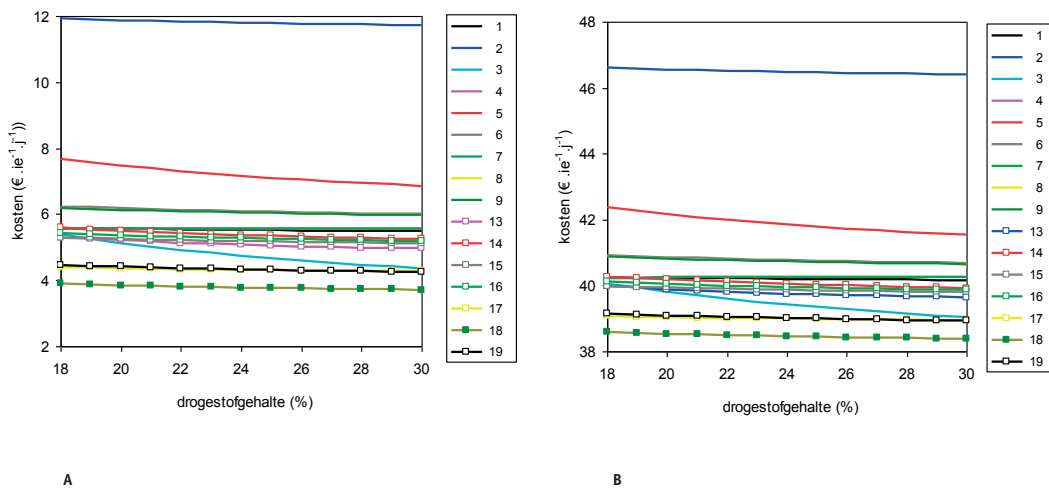
Voor de slibeindverwerking kunnen uit figuur 9.12 de volgende algemene conclusies worden getrokken:

- superkritische vergassing (18) is energetisch gezien het gunstigste;
- indirecte thermische droging gevolgd door meeverbranden in een cementoven (9) is energetisch het op één na gunstigste;
- de volgende technieken zijn energetisch ook interessant:
 - lage-temperatuur droging (16);
 - indirecte thermische droging (restwarmte).
- nieuwe technieken als vergassen of HTU lijken te kunnen concurreren met de bestaande - nu in Nederland toegepaste - technieken.

Sommige van de varianten zijn niet gevoelig voor het drogestofgehalte van het slib, zoals variant 2, 17 en 18, maar de meeste wel. Varianten 4 en 5 wordt het sterkst beïnvloed.

In figuur 9.13 is de invloed op de kosten van de slibeindverwerking en van de totale behandeling gegeven als functie van het drogestofgehalte.

FIGUUR 9.13 INVLOED VAN HET DROGESTOFGEHALTE OP DE KOSTEN VAN DE SLIBEINDVERWERKING (LINKS) EN VAN DE TOTALE BEHANDELING (RECHTS).
VARIANTEN ALS IN TABEL 9.1



Uit figuur 9.13 kan worden geconcludeerd dat de invloed van het drogestofgehalte op de kosten van zowel de eindverwerking van het slib, maar zeker op de totale behandeling van het afvalwater als geheel, betrekkelijk marginaal te noemen is. Voor een deel wordt dit veroorzaakt door de uitgangspunten van de studie, waarin wordt uitgegaan van een *groene-weide*-situatie met volledige bezetting van de capaciteit van de installaties. Bij een hoger drogestofgehalte kan sprake zijn van het verkrijgen van extra capaciteit. Dergelijke economische overwegingen maken geen deel uit van deze studie.

In figuur 9.13 is tevens te zien dat de kosten van de slibeindverwerking voor de verschillende varianten van de slibeindverwerking elkaar niet veel ontlopen, met twee uitzonderingen:

- natte oxidatie is aanzienlijk duurder dan overige technieken;
- lage-temperatuur-droging, vergassing en superkritische vergassing zijn goedkoper dan de overige technieken.

Net als bij de eerste slibketenstudie kan worden geconcludeerd dat de kosten weinig onderscheidend zijn. Voor zover dit wel het geval is, worden de kosten bepaald in de waterlijn. In energetisch opzicht worden de grote variaties voornamelijk door de slibeindverwerking bepaald.

De bestudering van het energieverbruik laat zien dat:

- combinaties van tweetrapsprocessen met lage-temperatuur droging leiden tot energiewinst;
- de volgende technieken energetisch interessante opties zijn;
 - tweetrapssystemen (varianten G en H);
 - Annammox in de hoofdlijn (varianten I en J);
 - toepassing van microzeven (varianten D, E en F).

9.4 DE COMBINATIE VAN RWZI EN EINDVERWERKING

Het bestuderen van de positie van de acht referentievarianten (zie figuur 9.2) bij verschillende eindverwerkingstechnieken is interessant. In figuur 9.14 is het resultaat van de exercitie samengevat voor drie technieken voor de eindverwerking: indirecte droging en verbranding in een wervelbed (1), lage-temperatuur droging (16) en superkritische vergassing (18).

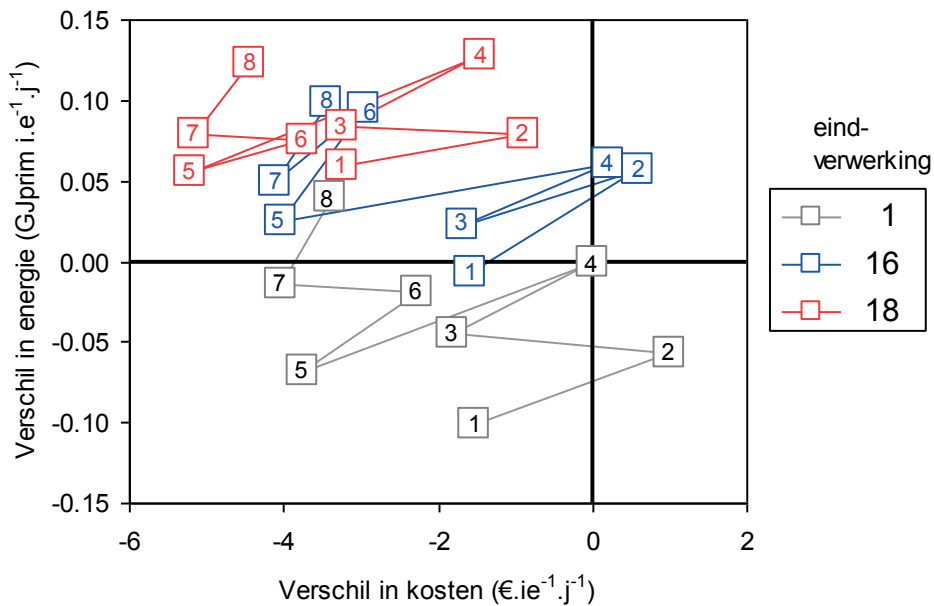
FIGUUR 9.14

VERSCHIL IN ENERGIEVERBRUIK, UITGEZET TEGEN HET VERSCHIL IN KOSTEN, VERGELEKEN MET EEN REFERENTIEVARIANT (VOORBEZINKING MET SLIBGISTING ZONDER BIOLOGISCHE P-VERWIJDERING, VARIANT 4), VOOR DRIE VERSCHILLENDE TECHNIEKEN VOOR DE SLIBEINDVERWERKING:

- INDIRECTE DROGING EN VERBRANDING IN EEN WERVELBED(1);
- LAGE-TEMPERATUUR DROGING (16);
- SUPERKRITISCHE VERGASSING (18).

DE VARIANTEN VOOR DE RWZI ZIJN:

- 1: GEEN VOORBEZINKING, GEEN BIO-P, GEEN SLIBGISTING;
- 2: VOORBEZINKING ZONDER BIO-P, ZONDER SLIBGISTING;
- 3: GEEN VOORBEZINKING, GEEN BIO-P, WEL SLIBGISTING;
- 4: VOORBEZINKING EN SLIBGISTING, ZONDER BIO-P;
- 5: ALS 1, MET BIO-P;
- 6: ALS 2, MET BIO-P;
- 7: ALS 3, MET BIO-P;
- 8: ALS 4, MET BIO-P.



De grijze punten 1 tot en met 8 zijn dezelfde als in figuur 9.2. Bestudering van de figuur leert (let vooral op de verbindingslijnen tussen de punten), dat het patroon in de opeenvolging van de punten 1 tot en met 8 bijna identiek is.

Deze parallelliteit leidt tot de belangrijke conclusie dat kennelijk, vanuit energetisch en financieel oogpunt, het effect van de slibeindverwerking op de totale slibketen, ongeveer gelijk is voor de hier beschouwde slibeindverwerkingstechnieken en daarmee onafhankelijk van de keuzes op de rwzi.

9.5 CONCLUSIES UIT DE ANALYSE

DE RWZI

Ten aanzien van de varianten voor de rwzi kan het volgende worden geconcludeerd:

- alle typen voorbehandeling zijn energetisch gunstig, met een eerste trap van een tweetrapsproces als gunstigste;
- biologische P-verwijdering is energetisch gunstiger dan chemische P-verwijdering, doordat energieverbruik is toegekend aan het gebruik van chemicaliën;
- Nereda[®] en Anammox in de hoofdlijn zijn beide gunstig te noemen;
- voorbehandeling van slib, en met name thermische, levert energetisch voordeel op;
- slibgisting levert vanzelfsprekend voordeel op, en het maken van groen gas levert net iets minder energie op dan gasgebruik in een WKK.

DE SLIBEINDVERWERKING

Op grond van de analyse kan worden geconcludeerd dat de kosten weinig onderscheidend zijn. Voor zover dit wel het geval is, worden de kosten bepaald door de rwzi. In energetisch opzicht worden de grote variaties voornamelijk door de slibeindverwerking bepaald. Superkritische vergassing en lage temperatuur droging zijn als nieuwe technieken energetisch én kostentechnisch interessant, waarvan de eerste meer onderzoek en de tweede praktijktoepassing verdient.

De bestudering van het energieverbruik laat zien dat:

- combinaties van tweetrapsprocessen met lage-temperatuur droging leiden tot energiewinst;
- de volgende technieken energetisch interessante opties zijn:
- tweetrapssystemen;
- Anammox in de hoofdlijn (varianten I en J);
- toepassing van microzeven (varianten D, E en F).

De invloed van het drogestofgehalte op de kosten van zowel de eindverwerking van het slib, maar zeker op de totale behandeling van het afvalwater als geheel, zijn betrekkelijk marginaal te noemen.

COMBINATIE RWZI EN EINDVERWERKING

De slibeindverwerking heeft, uit oogpunt van energie en kosten, op de totale keten ongeveer dezelfde invloed, onafhankelijk van de keuzes voor technieken op de rwzi. Dit betekent dat de keuze voor de (hier beschouwde) slibeindverwerkingstechnieken vrijwel niet afhankelijk is van de opzet van de bestaande rwzi's.

10

BESPIEGELING EN CONCLUSIES

10.1 BESPIEGELING

In deze studie zijn veel nieuwe technieken voor zowel de water- en sliblijn van de rwzi als voor eindverwerking van het slib onder de loep genomen. Energiegebruik en kosten zijn de centrale parameters geweest voor de beoordeling van de technieken.

Zoals uit de beschouwing van de technieken voor de slibeindverwerking naar voren is gekomen, is de energiewinst tijdens de slibeindverwerking op zijn best marginaal. De energievraag van de behandeling van de stikstof die bij de eindverwerking vrijkomt is daar voor een belangrijk deel debet aan. Het produceren van veel slib om op de eindverwerking veel energie bij de eindverwerking uit het slib te halen is dus geen goede optie gebleken.

Het is beter om zoveel als mogelijk energie uit het slib te halen op de rwzi. De enige manier om dat te doen is door de toepassing van slibgisting. Verhoging van de energieproductie tijdens de slibgisting kan worden bereikt door te streven naar een hoge slibproductie bij de voorbehandeling, zoals bij voorbezinking, of meer nog bij een eerste trap van een tweetrapsproces en bij de installatie met een korte slibleeftijd als in een Anammox in de hoofdlijn configuratie.

Ook de voorbehandeling van het slib kan leiden tot een aanmerkelijke toename in de energieproductie op de rwzi. Met name thermische voorbehandeling leidt tot een goede energiewinst, die bovendien wordt gecombineerd met een aanzienlijke toename van het drogestofgehalte van het ontwaterde slib.

Bij al deze processen wordt meer dan bij de conventionele processen energie gewonnen op de rwzi. Combinaties van de energiegunstige processen kunnen leiden tot nog gunstiger processen, zoals in § 9.1 is aangetoond.

De energiewinst uit het slib is van dezelfde orde grootte als de energie die moet worden geïnvesteerd in de behandeling. Dit betekent dat beperking van de energievraag tijdens de behandeling van bij benadering gelijk belang is als de maximalisatie van de energieproductie. Bij de voorbehandeling in de waterlijn (voorbezinking, pre-precipitatie, microzeving, eerste trap van een tweetrapsproces) loopt de maximalisatie van de energieproductie door verhoging van de (primair) slibproductie parallel aan de besparing van energie in de waterlijn.

In de hoofdlijn kan energie worden bespaard door toepassing van aëroob korrelslib (Nereda). Van een andere orde is het toepassen van Anammox in de hoofdlijn. Daarbij wordt energie bespaard doordat de actiefslibreactor alleen wordt gebruikt voor verwijdering van BZV en zwevende stof. Verwijdering van stikstof wordt gedelegeerd naar een aparte, energiezuinige, nitritatie/Anammoxreactor.

Haaks hierop staat het streven naar minimalisatie van de slibproductie, zoals bij de aërobe slibreductie in het Cannibal-proces. Hierbij worden met de kosten van de eindverwerking van het slib geminimaliseerd, tegen een hoger energieverbruik. Dit kan acceptabel worden geacht als kostenbesparing wordt bereikt die groter is dan de extra energiekosten bij € 0,12 per kWh.

Aan de vergelijking van kosten en energiewinst ten opzichte van de referentievariant met voorbezinking en slibgisting bij verschillende eindverwerkingstechnieken kan worden geconcludeerd dat keuzes voor rwzi en slibeindverwerking vrijwel volledig onafhankelijk van elkaar gemaakt kunnen worden.

Tot slot dient te worden opgemerkt dat het eerste doel van de afvalwaterzuivering het zuiveren van afvalwater is. Dit betekent dat het behalen van een effluentkwaliteit die voldoet aan de lozingvoorwaarde, een randvoorwaarde is voor de toepassing van enig alternatief in de waterlijn. Een ongunstige afvalwatersamenstelling kan de toepassing van sommige vormen van voorbehandeling, zoals een tweetrapsproces, of pre-precipitatie - zelfs bij toepassing van deelstroombehandeling - bemoeilijken of zelfs onmogelijk maken. Het is van groot belang om dit bij de keuze tussen de verschillende mogelijkheden voorop te stellen.

Droging van zuiveringsslib met behulp van laagwaardige warmte is energetisch interessant, maar wel onder bepaalde voorwaarden. Deze voorwaarden zijn:

- de beschikbaarheid van een laagwaardige energiebron;
- de mogelijkheid om het gedroogde slib te benutten als secundaire brandstof voor de opwekking van elektriciteit of warmte.

Dit houdt in dat de slibdroging bij de energiebron moet worden uitgevoerd. Met het oog op de benodigde investering, leent deze techniek zich ook voor decentraal drogen (bijvoorbeeld op een schaal van één waterschap). De benutting van het gedroogde slib kan daarna eventueel wel centraal plaatsvinden.

Superkritische vergassing is veelbelovend, maar nog onvoldoende bewezen. Grote voordelen zijn het hoge energetische rendement, het feit dat er geen vergaande mechanische ontwatering noodzakelijk is en de omzetting van ammoniumstikstof naar stikstof in de lucht met een hoog rendement. Voor het natte residu zal een afzet gevonden moeten worden, waarbij terugwinning van fosfaat tot de mogelijkheden behoort. De optimale schaalgrootte is nog niet bepaald, maar het zou wenselijk zijn dat de techniek deel zou kunnen uitmaken van een grote rwzi (bijv. > 100.000 i.e.).

Door de inzet van (vaste) biomassa ter vervanging van fossiele brandstof is vergassing van vaste brandstoffen opnieuw in de belangstelling gekomen. Het leent zich voor een combinatie met alle vormen van droging en kan ook bij de afzet van het syngas worden gecombineerd met een elektriciteitscentrale. Deze combinatie kan resulteren in een hoog energetisch rendement.

Het HTU-proces is bewezen, maar de economische haalbaarheid is nog onzeker.

10.2 EVALUATIE VAN DE CONCLUSIES UIT DE EERSTE SLIBKETENSTUDIE

Hieronder zijn de conclusies van de eerste slibketenstudie weergegeven, met daarbij commentaar over het feit of deze conclusies na de huidige tweede slibketenstudie gehandhaafd kunnen blijven.

1. *De kosten van de slibeindverwerking (in € per i.e.) maken maar een relatief klein gedeelte (< 10%) uit van de totale kosten van de behandeling van een i.e. in de gecombineerde water- en sliblijn en de slibeindverwerking.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd.

2. *Daarentegen wordt de energiebalans van de totale sliblijn (van water- en sliblijn tot en met slibeindverwerking) in belangrijke mate bepaald door de gemaakte keuzes bij de slibeindverwerking. De water- en sliblijn wordt gekenmerkt door een overall energieverbruik, terwijl de energiebalans bij de slibeindverwerking varieert van een klein netto energieverbruik van -470 MJ/i.e. tot een surplus van +40 MJ/i.e., afhankelijk van de proceskeuze.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd. De water- en sliblijn wordt gekenmerkt door een overall energieverbruik, met uitzondering van het tweetraps actiefslibproces met mesofiele vergisting. De energiebalans van de gehele slibketen varieert van -490 MJ/i.e. tot een surplus van +80 MJ/i.e., afhankelijk van de proceskeuze.

3. *Wijzigingen in de toegepaste processen in de water- en sliblijn hebben gevolgen voor de hoeveelheid en samenstelling van het geproduceerde slib dat naar de slibeindverwerking gaat (en dus op kosten en energie), maar de onderlinge verhoudingen tussen de verschillende slibeindverwerkingsmethoden worden daardoor nauwelijks beïnvloed. Dat geldt vooral voor de verwerkingskosten. Dit leidt tot de belangrijke conclusie, dat de keuze voor een slibeindverwerkingsvariant relatief onafhankelijk van de configuratie van de water- en sliblijn gemaakt kan worden.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd. Zie figuur 9.14.

4. *De benuttingsgraad van een installatie heeft grote invloed op de verwerkingskosten bij de slibeindverwerking (niet op de energiebalans). Uit kosten oogpunt is het daarom gewenst een goede afstemming te realiseren tussen de hoeveelheid geproduceerd zuiveringsslib en de beschikbare of gecontracteerde slibeindverwerkingscapaciteit. Aanbevolen wordt, om met dit aspect rekening te houden bij wijzigingen in de water- en sliblijn.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd.

5. *Bio-P-verwijdering heeft een gunstige invloed op de totale slibketen, zowel door verlaging van het energieverbruik als door verlaging van de slibeindverwerkingskosten.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd. Zie paragraaf 9.5.

6. *Voorbezinking (zonder slibgisting) heeft een verlaging van het energieverbruik tot gevolg voor de totale keten, maar leidt tot een verhoging van de verwerkingskosten, mede omdat de slibproductie hoger is.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd. Zie paragraaf 9.5.

7. *Slibgisting leidt tot een verlaging van de verwerkingskosten voor de slibketen door verlaging van de hoeveelheid te verwerken slibdrogestof per i.e. In de slibketens waar de energie in het slib in de slibeindverwerking efficiënt wordt aangewend, is slibgisting ongunstig voor het energiesaldo van de totale slibketen. Deze conclusie blijft in principe ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd. Het is echter zo, dat tot op heden de slibeindverwerking van niet-vergist slib meer energie kost per i.e. dan slibgisting oplevert (zie figuur 9.11).*

Alleen bij zeer hoge slibgehalten na de ontwatering en bij superkritische vergassing zou slibgisting overbodig kunnen worden. Bij toepassing van slibvoorbehandeling ter verbetering van de slibgisting zou deze conclusie weer op losse schroeven staan.

8. *Op basis van de gehanteerde uitgangspunten (met name ook de gekozen schaalgrootte) blijkt variant 7 van de water- en sliblijn (géén voorbezinking, wel slibgisting, wel bio-P-verwijdering qua verwerkingskosten de meest gunstige variant. Dit komt mede door de relatief lage kosten voor de benodigde slibeindverwerking. Variant 8 (met voorbezinking, slibgisting en bio-P) is uit energetisch oogpunt de meest gunstige variant. Bij verdere stijging van de energieprijzen (of bij invoering van een MEP-subsidie op de daarbij geproduceerde extra energie) wordt deze variant ook uit een oogpunt van verwerkingskosten gunstig. Slibketenstudie II geeft aan dat er zowel met het oog op de energie als met het oog op de kosten, nog gunstiger varianten zijn, met name het tweetrapsproces in combinatie met vergisting en lage temperatuur droging, waarbij het gedroogde slib wordt hergebruikt als secundaire brandstof.*

9. *Geconstateerd is, dat aanpassingen in de water- en sliblijn die tot verbeteringen in de energiebalans van de rwzi leiden, normaliter een enigszins tegengesteld effect opleveren bij de slibeindverwerking. Het verdient daarom aanbeveling om bij dit soort aanpassingen in de water- en sliblijn rekening te houden met de effecten bij de slibeindverwerking.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd.

10. *Het omslagpunt voor de schaalgrootte van de rwzi waarbij slibgisting wel of niet gunstiger is, ligt afhankelijk van de kosten van de eindverwerking van het slib - tussen 100.000 tot 200.000 i.e. Bij de exacte ligging van het omslagpunt spelen vanzelfsprekend vele andere kostenfactoren (rentepercentage, kosten van personeel, onderhoud, energie etc.) ook een voorname rol.*

Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd.

11. *De methode van slibverwerking die momenteel in Nederland het meest wordt toegepast, slibeindverwerkingsvariant 1 (indirecte droging, gevolgd door verbranding in een wervelbedoven) is alleen kostentech- nisch verantwoord bij de gekozen schaalgrootte (100.000 ton d.s./jaar) of groter en neemt bij de momen- teel toegepaste procestech- niek qua energiehuishouding een middenpositie in. Belangrijke voordelen van deze slibverwerkingsmethode zijn de technische betrouwbaarheid en het relatief onafhankelijk zijn van andere factoren (energiekosten, reststoffenverwerking).*

Het resultaat van slibketenstudie II werpt geen ander licht op de conclusie.

12. *Uit het energieoptimalisatie-onderzoek is gebleken dat bij de slibeindverwerkingsvariant 1 (indirecte droging, gevolgd door verbranding in een wervelbedoven) door aanpassingen in het energetisch ontwerp aanzienlijke verbeteringen mogelijk zijn. In hoeverre deze optimalisaties qua betrouwbaarheid van de technologie (toepassing van dampcompressie) dan wel qua kosten (toepassing van hogere stoomdruk- ken en stoomturbines) bij de huidige energieprijzen haalbaar zijn, vereist nog nader onderzoek.*

Dit aspect is niet onderzocht in de slibketenstudie II, dus de conclusie blijft gehandhaafd.

13. Meestoken van mechanisch ontwaterd zuiveringslib in afvalverbrandings-installaties is eveneens een voor de slibeindverwerking in aanmerking komende goedkope optie. Daarbij moet opgemerkt worden dat de beschikbare verwerkingscapaciteit voor deze methode relatief beperkt is.
Dit aspect is niet nader onderzocht in slibketenstudie II, dus de conclusie blijft gehandhaafd.
14. Uit energetisch oogpunt verdient thermisch drogen met restwarmte duidelijk de voorkeur boven thermisch drogen met aardgas als slibeindverwerking. Grote invloed op de overall energiebalans heeft ook de toepassing van het gedroogde slib. Het meest gunstig is daarvoor meeverbranden in cementovens, waarbij wel opgemerkt moet worden, dat het gedroogde slib moet 'concurreren' met andere meestookbrandstoffen en dat de cementoven-capaciteit in Nederland beperkt is. Afzet van het gedroogde slib wordt belemmerd door emissievoorschriften, met name ten aanzien van de emissie van kwik.
Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd. Voor de nieuwe technieken is de kwikbalans nog niet bekend en derhalve ook de kwikemissies niet.
15. Uit kostenoverwegingen komen biologisch en thermisch drogen in aanmerking voor toepassing bij een kleinere schaalgrootte. Bij een grotere schaal (> 50.000 ton d.s./jaar) is verbranding concurrerend. De kosten voor co-verbranding zijn lager, maar de capaciteit in Nederland is beperkt.
Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd.
16. De berekende kosten voor natte oxidatie zijn aanzienlijk lager wanneer afvalwaterbehandeling en slibverwerking op één locatie plaatsvinden, zonder mechanische ontwatering en slibtransport, maar daarmee nog steeds een relatief dure verwerkingsmethode.
Deze conclusie is niet in strijd met de resultaten van slibketenstudie II.
17. Slibtransport maakt onder Nederlandse omstandigheden minder dan 3% uit op de totale kosten van de slibketen en verbruikt minder dan 5% van de energie nodig voor de water- en sliblijn.
Deze conclusie blijft ook voor de slibketenstudie II gehandhaafd.

10.3 CONCLUSIES UIT DEZE STUDIE

De conclusies uit deze studie komen voort uit de berekeningen die over de totale slibketen zijn uitgevoerd, waarbij expliciet wordt opgemerkt dat deze berekeningen:

- gebaseerd zijn op een 'groene-weide-situatie'. In concrete gevallen kunnen specifieke lokale omstandigheden tot wezenlijk andere resultaten leiden;
- gebaseerd zijn op de aangenomen uitgangspunten. Bijvoorbeeld wijziging in de bezettingsgraad van een slibeindverwerking kan leiden tot een volstrekt ander verwerkingskosten;
- veelal tot conclusies leiden die dicht bij het omslagpunt liggen.

De volgende conclusies zijn getrokken uit de berekeningsresultaten:

1. Technieken om relatief veel slib te maken - méér dan in vergelijking met reguliere voorbezinking - leveren meer slib (vóór vergisting) op, en dat levert in een slibgisting meer energie op. Dit geldt voor processen als een tweetrapsproces, pre-precipitatie en Anammox in de waterlijn. Voor pre-precipitatie is het voordeel bijna afwezig als energieverbruik aan chemicaliëndosering wordt toegekend. Anammox in de waterlijn is een vrijwel hypothetisch proces dat nog dient te worden getest in de praktijk. Maximalisering van de slibproductie vóór vergisting mag natuurlijk niet ten koste gaan van de effluentkwaliteit, zodat een tweetrapsproces niet altijd toepasbaar is.
2. Technieken om de energieopbrengst van slibgisting te maximaliseren, kunnen een duidelijk voordeel hebben. Thermische voorbehandeling van secundair slib levert een hogere biogasopbrengst en/of hogere droge stofgehaltenes, resulterend in een kostenvoordeel ten opzichte van het niet toepassen ervan. Dit voordeel is wel schaalafhankelijk.
3. Technieken om juist veel minder slib te produceren, zoals de biologische slibreductie in de Cannibal[®] en de *oligochaete* slibreductie, leveren natuurlijk veel minder energie op. Vanwege lagere kosten voor de slibeindverwerking, kunnen dergelijke technieken wel kosteneffectief zijn, zoals kan gelden voor het Cannibal[®] proces.
4. Lage temperatuur droging (LTD) laat zich onder voorwaarden aftekenen als een slibverwerkingstechniek met een lage investering en een lage bijdrage aan de productie van langcyclische CO₂. Deze voorwaarden houden in dat:
 - de slibdroging bij een laagwaardige warmtebron moet worden uitgevoerd;
 - er afzet moet zijn voor het gedroogde slib bij een kolencentrale en/of een cementoven.
5. Het HTU-proces en superkritische vergassing zijn zowel energetisch als financieel nog erg onzeker. Vooral superkritische vergassing is vanuit theoretisch oogpunt energetisch veelbelovend, maar vereist nog een grote ontwikkeling.
6. De keuzes voor rwzi en slibeindverwerking kunnen vrijwel volledig onafhankelijk van elkaar gemaakt worden in een 'groene-weide-situatie'. Deze conclusie is mede gebaseerd op de bedrijfseconomische aanname dat de slibeindverwerking vol bezet is.
7. Superkritische vergassing is veelbelovend, maar nog onvoldoende bewezen. Grote voordelen zijn het hoge energetische rendement, het feit dat er geen vergaande mechanische ontwatering noodzakelijk is en de omzetting van ammoniumstikstof naar stikstof in de lucht met een hoog rendement.
8. Vergassing van gedroogd zuiveringslib leent zich voor een combinatie met alle vormen van droging en kan ook bij de afzet van het syngas worden gecombineerd met een elektriciteitscentrale. Deze totale combinatie kan resulteren in een hoog energetisch rendement.
9. Met de beschikbare technieken is de productie van groen gas duurder dan de inzet van een WKK-installatie, tenzij de opbrengst van groen gas hoger is (orde grootte € 0,60 per m³ of meer). Dit bedrag wordt hoger in geval dat de warmte van de WKK-installatie met een hoger rendement kan worden benut.

11

REFERENTIES

- 1 Unie van Waterschappen 2009. Werkrapport "De Energiefabriek". www.energiefabriek.com
- 2 Staat der Nederlanden en de Waterschappen 2010. Klimaatakkoord Unie - Rijk
- 3 STOWA 2008. Op weg naar een klimaatneutrale waterketen. STOWA, Amersfoort, rapport 2008-17. Hierin wordt verwezen naar Janse T & P Wiers 2008, *Broeikasgasemissie vanuit de Amsterdamse waterketen*, H2O **39** (18): 87-90, waarin weer naar de computersoftware SIMAPRO wordt verwezen.
- 4 DBW/RIZA & STOWA 1990. AB systemen - een inventarisatie. Uit de reeks "Toekomstige generatie rioolwaterzuiveringsinrichtingen RWZI 2000", rapport 90-02.
- 5 van Nieuwenhuijzen A, J H J M van der Graaf & A R Mels 2001. Direct influent filtration as a pretreatment step for more sustainable wastewater treatment systems. *Water Science & Technology* **43** (11): 91-98.
- 6 STOWA 2010. Influent fijnzeven in rzzi's. STOWA, Amersfoort, rapport 2010-19.
- 7 STOWA 2005. Aëroob korrelslibtechnologie - Pilot onderzoek naar toepassingsmogelijkheden voor de behandeling van huishoudelijk afvalwater. STOWA, Amersfoort, rapport 2005-34.
- 8 Artan N & D Orhun 2005. Mechanism and design of Sequencing Batch Reactors for nutrient removal. IWA Scientific and Technical Report 19, IWA Publishing, London 2005.
- 9 Teichgräber B 1998. Belebingsanlagen mit Aufstaubetrieb - Bemessung und Anwendung. *Korrespondenz Abwasser* **45**: 886-900.
- 10 Teichgräber B, D Schreff, C Ekkerlein & P Wilderer 2001. SBR technology in Germany - an overview. *Wat Sci Technol* **43** (3): 323-330.
- 11 van Efferen L & C Roubos 2008. 70% Slibgroeireductie door Cannibal: nieuwe techniek succesvol op kleine schaal getest., *Neerslag* **43** (4): 51-55.
- 12 Roubos C, L van Efferen & J Groenhof 2008. Reductie slibgroei met 70% door Cannibal. *H2O* **41** (10): 53-55.
- 13 C Roubos, Siemens, persoonlijke mededeling.
- 14 Novak J T, D H Chon, B-A Curtis & M Doyle 2006. Reduction of sludge generation using the Cannibal® process: mechanisms and performance. *Proceedings Residuals and Biosolids Management Conference 2006*.
- 15 Strous M, J J Heijnen, J G Kuenen & M S M Jetten. 1998. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* **50**: 589-596.
- 16 STOWA 2010. Emissie van broeikasgassen van rzzi's - Inventarisatie van de emissie van broeikasgassen op Nederlandse rzzi's. STOWA, in voorbereiding.

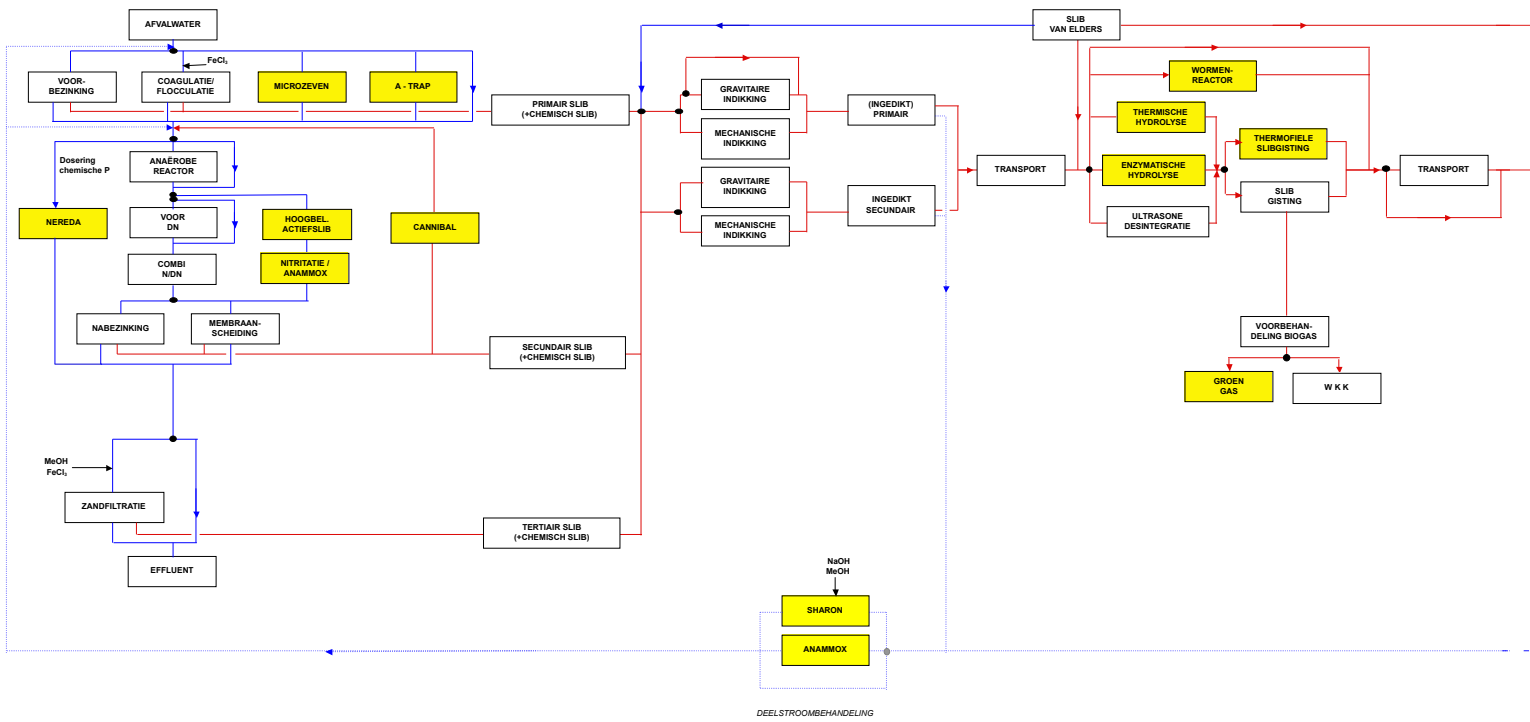
- 17 Kampschreur M J, W R L Star, H A Wielders, J W Mulder, M S M Jetten & M C M van Loosdrecht 2008, Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment.
- 18 Kampschreur M J, R Poldermans, R Kleerebezem, W R L Star, R Haarhuis, W R Abma, M S M Jetten, & M C M van Loosdrecht 2009, Emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a full-scale singlestage nitrification anammox reactor, 2nd IWA specialized conference on nutrient management in wastewater treatment processes, Krakow, Poland.
- 19 Wiegant W M, W van Betuw, J Kruit & C Uijterlinde 2009. Duurzame deelstroombehandeling voor stikstofverwijdering op rwzi heeft de toekomst. H2O (10): 40-43.
- 20 STOWA 2009. Sharon - Anammox systemen - Evaluatie van rejectiewaterbehandeling op slibverwerkingsbedrijf Sluijsjesdijk. STOWA, Amersfoort, rapport 2008-18.
- 21 STOWA 2002. Slibpredatie door inzet van oligochaete wormen - Pilotonderzoek naar slibreductie op de rwzi Bennekom. STOWA, Utecht, rapport 2002 - 17.
- 22 Hendrickx T L G, B G Temmink, H J H Elissen & C J N Buisman 2009. Slibverwerking met wormen: toepasbaar voor RWZI's ? Afvalwaterwetenschap **8**: 284 - 292.
- 23 Elissen H J H, T L G Hendrickx, H Temmink & C J N Buisman 2006. A new reactor concept for sludge reduction using aquatic worms. Water Research **40**: 3713-3718.
- 24 Hendrickx T L G, H Temmink, H J H Elissen & C J N Buisman 2009. The effect of operating conditions on aquatic worms eating waste sludge. Water Research **43**: 943-950.
- 25 STOWA 2010. Praktijkschaal slibreductie door Oligochaeten. STOWA, Amersfoort, *in voorbereiding*.
- 26 Wiegant W M 1986. Thermophilic anaerobic digestion for waste and wastewater treatment. Proefschrift, Wageningen Universiteit, 1986.
- 27 Zabranska J, M Dohanyos, J Kutil & P Jenecek 2009. Intensification of anaerobic digestion towards the energy self-sufficiency of municipal wastewater treatment. Water 21, dec 2009, p 25.
- 28 Phothilangka P, M A Schoen, M Huber, P Luchetta, T Winkler & B Wett 2008. Prediction of thermal hydrolysis pretreatment on anaerobic digestion of waste activated sludge. Water Science & Technology **58** (7): 1467-1473.
- 29 Coleman p 2006. Thermal pretreatment in the uk - alternative to advanced digestion. Environmental Science % Engineering www.esemag.com - January 2006.
- 30 Fdz-Polance F, R Velasquez, Sl Perez-Elvira, C Casas, D Del Barrio, F J Canterop, M Fdz-Polanco, P Rodriguez, L Panizo, J Serrat & P Rouge 2008. Continuous thermal hydrolysis and energy integration in sludge anaerobic digestion plants. Water Science & Technology **57** (8): 1221-1226.
- 31 Chauzy J, S Graja, F Gerardin, D Crétenot, L Patria & P Fernandes P 2005. Minimisation of excess sludge production in a WWTP by coupling thermal hydrolysis and rapid anaerobic digestion.
- 32 Jolis D 2008. High-solids anaerobic digestion of municipal sludge pretreated by thermal hydrolysis. Water & Environment Research, **80** (7): 654-662.
- 33 de Man A W A, Waterschapsbedrijf Limburg persoonlijke mededeling.
- 34 Pickworth B, J Adams, K Panter & O E Solheim 2006. Maximizing biogas in anaerobic digestion by using engine waste heat for thermal hydrolysis pre-treatment of sludge. Water Science & Technology **54** (5): 101-108.
- 35 SenterNovem 2009. *Van biogas tot groen gas*. Publicatie in de reeks *Creatieve Energie*

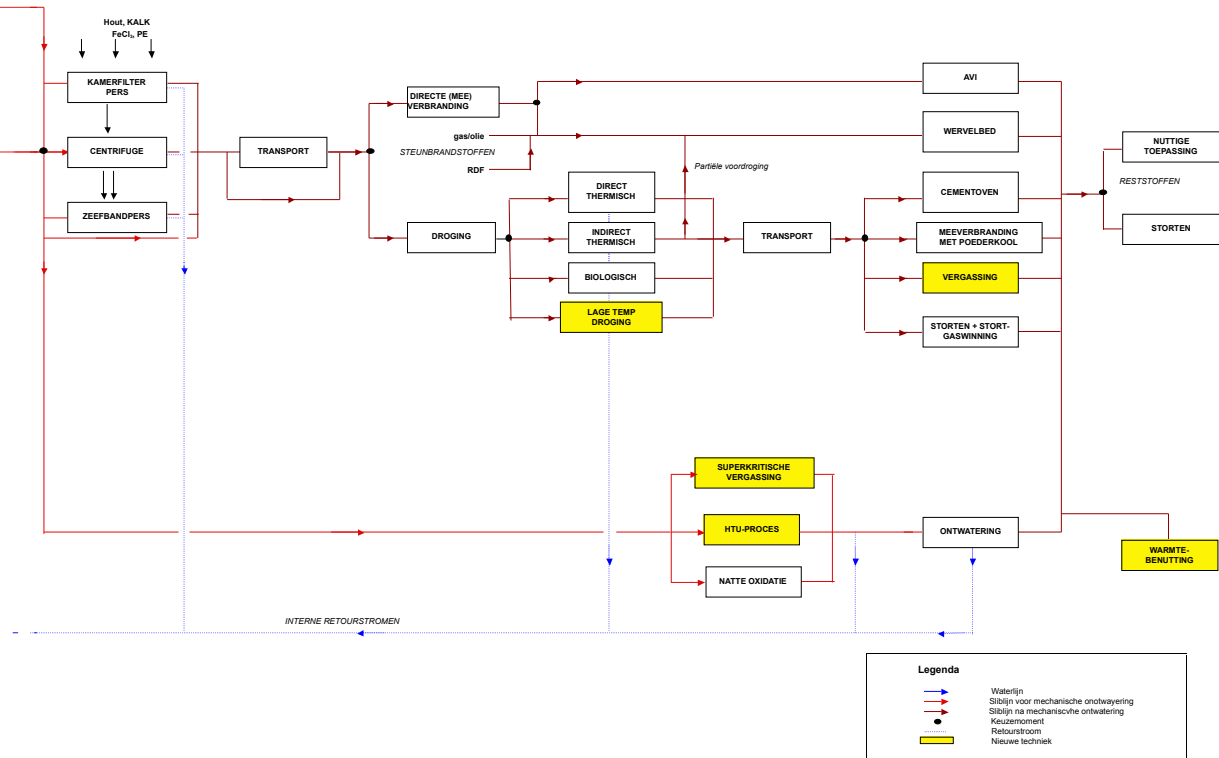
- 36 Penninger J M L, F B De Walle, J G M van der Horst, J postmes, M Rep, P van der Water, H Ottema & J A Zeevalkink 2008. Hydrogen and other fuel gases from supercritical water by thermal treatment of biomass. TNO Report OG-RPT-APD-2008-000195.
- 37 Penninger J M L, *mondelinge mededeling*
- 38 R. Rölle, Stoffliche und energetische Verwertung von Klärschlamm durch Vergasung, 2003.
- 39 Knezevic D 2009 Hydrothermal conversion of biomass, Ph D Thesis, University of Twente, 2009.
- 40 De samenstelling was: 41,6% C; 6,2% H, 39,6% O, 0,95% N en 0,18% S
- 41 de Bruin L M M, DHV, *in litt.*
- 42 van de Roest H , DHV, persoonlijke mededeling.
- 43 Johnson B R, G T Daigger & J T Novak 2008. The use of ASM-based models for the simulation of biological sludge reduction processes. *Water Practice & Technology* 3:3.
- 44 Giraldo E, R Goel & D Noguera 2007. Modelling microbial decay in a Cannibal® sludge minization process. *Water Environment Federation Proceedings WEFTEC 2007*, (17): 1751-1767.
- 45 Van Ginkel S W 2005. Optimization of biohydrogen production from food processing wastewater. Ph D Thesis, Pennsylvania State University, 2005.
- 46 STOWA 1999. Procedure voor de keuze van het beluchtingssysteem. STOWA, Amersfoort, rapport 99-24.
- 47 Al Pincince, CDM, persoonlijke mededeling
- 48 Bolzonella D, P Pavan, P Battsioni & F Cecchi 2005. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of solids retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry* **40**: 1453-1460.
- 49 Star W R L van der, W R Abma, D Blommers, J-W Mulder, Ti Tokutumi, M Strous, C Picioreanu & M C M van Loosdrecht 2007. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam. *Water research* **42**: 4149-4163.
- 50 Garber W H, G T Ohara, J E Colbaugh & S K Raksit 1975. Thermophilic digestion at the Hyperion treatment plant. *Journal Water Pollution Control Federation* **47**: 950-961.
- 51 Chen Y R & A G Hashimoto 1980. Substrate utilization model for biological treatment systems. *Biotechnology & Bioengineering* **22**: 2081-2095.
- 52 Hydrogen production by supercritical water gasification of biomass. Phase I – technical and business feasibility study. Technical progress report. DOE publication: DE-FC36-97G010216.
- 53 K. Stendahl, S. Jäferström, Phosphate recovery from sewage sludge in combination with supercritical water oxidation, *Water Science and Technology* Vol 48 No. 1, 2003.
- 54 MER voor slibvergassing bij Eemscentrale Eemshaven, EPON Zwolle, 1998;
- 55 Domelski, E.S.; Jobe Jr.; T.L.; Milne, T A. Thermochemical data for biomass conversion and waste incineration. A product of solar technical information program prepared by the National Bureau of Standards under contract to the Solar Technical Information Program of the Solar Energy Research Institute, 1986.
- 56 <http://www.ecn.nl/phyllis/defs.asp> visited on 23.11.2009

- 57 Goudriaan, F.; Peferoen, D. G. R. Liquid fuels from biomass via a hydrothermal process. *Chem. Eng. Sci.* **1990**, *45*, 2729.
- 58 Luijkx G.C.A. Hydrothermal conversion of carbohydrates and related compounds, PhD thesis Technical University Delft 1994.
- 59 Goudriaan, F.; Van de Beld, B.; Boerefijn, F. R.; Bos, G. M.; Naber, J. E.; Van der Wal, S.; Zeevalkink, J. A. Thermal efficiency of the HTU Process for biomass liquefaction. In *Proceedings of the conference: Progress in Thermochemical Biomass Conversion*; Bridgwater, A. V., Ed.; Blackwell Science: England, 2000; pp 1312.
- 60 http://www.enertech.com/downloads/EnerTech_Brochure.pdf visited on 23.11.2009
- 61 A.B. Ross, P. Biller, M.L. Kubacki, H. Li, A. Lea-Langton, J.M. Jones Hydrothermal processing of microalgae using alkali and organic acids.
- 62 Wiegant W M, W van Betuw, J Kruit & C Uijterlinde 2009. Duurzame deelstroombehandeling voor stikstofverwijdering op rwzi heeft de toekomst. *H2O* (10): 40-43.
- 63 Haug R T 1993. The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, FLA, USA 1993, p 104.
- 64 STOWA 2006. Communaal afvalwater op temperatuur houden voor actiever slib in rwzi's. STOWA, Amersfoort, rapport 2006-15.

BIJLAGE 1

OVERALL PROCESSCHEMA





BIJLAGE 2

UITGANGSPUNTEN

DEFINITIES

AARDGAS (SLOCHTEREN KWALITEIT)

Nederlands Slochteren aardgas heeft een methaangehalte van circa 90%, een calorische waarde van 31,7 MJ/Nm³ en een gewicht van 0,833 kg per Nm³.

BIO-LNG

Biomethaan kan vloeibaar worden gemaakt door het te koelen tot ongeveer -160 graden. We spreken dan van *liquefied biomethane* (LBM). Ook wordt de term *liquefied biogas* (LBG) of bio-LNG gebruikt.

BIO-SNG

Synthetic natural gas wordt geproduceerd door vergassing van houtachtige biomassa of bijvoorbeeld steenkool. Bij gebruik van biomassa spreken we van bio-SNG. Op het gebied van groot-schalige vergassing van biomassa is nog een aantal jaren onderzoek nodig voordat commerciële productie mogelijk is.

BIOGAS

Biogas wordt geproduceerd door vergisting (biologische afbraakreacties van biomassa in afwezigheid van zuurstof) van onder meer gewasresten en vloeibare reststromen, vaak in combinatie met dierlijke mest. Het wordt ook gewonnen bij rioolwaterzuiveringsinstallaties en als stortgas bij vuilstortplaatsen. Biogas heeft een methaangehalte van 55-65% en een CO₂-gehalte van 35-45%.

BIOMETHAAN

Biomethaan is biogas dat is opgewaardeerd/gezuiverd tot >97% methaan. Als gevolg daarvan heeft biomethaan een hogere energie-inhoud dan groengas (84-88% methaan).

CBM

Compressed BioMethane ofwel gecomprimeerd biomethaan.

CNG

Compressed Natural Gas ofwel gecomprimeerd aardgas.

GROEN GAS

Onder groen gas wordt in Nederland verstaan het biogas dat is opgewaardeerd tot aardgaskwaliteit. Groen gas kan worden ingevoerd in het aardgasnet en gebruikt in aardgasmotoren. Door middel van groengascertificaten kunnen afnemers kiezen voor groen gas. In andere Europese landen wordt voor groen gas uitgegaan van 98 – 100% methaan.

LBM

Biomethaan kan vloeibaar worden gemaakt door het te koelen tot ongeveer -160 graden. We spreken dan van *liquefied biomethane* (LBM). ook wordt de term *liquefied biogas* (LBG) of bio-LNG gebruikt.

LNG

Liquefied Natural Gas is vloeibaar gemaakt aardgas door het te koelen tot ongeveer -160 graden.

RWZI

De rwzi (rioolwaterzuiveringsinrichting of -installatie) omvat zowel de waterlijn (voorbehandeling, biologische behandeling, nabezinking en slibretour) als de sliblijn (indikking, vergisting en ontwatering, alsmede eventuele deelstroombehandeling).

SLIBEINDVERWERKING

De slibeindverwerking omvat alle processtappen vanaf de mechanische slibontwatering tot aan de mineralisatie van het slib, inclusief eventuele nabehandeling van residuen.

SLIBLIJN

De sliblijn omvat alle processtappen die direct betrekking hebben op de behandeling van het primaire slib uit de voorbezinking en het secundaire slib uit de biologische behandeling, die tot doel hebben om het slib te kunnen afvoeren naar de slibeindverwerking. Hieronder vallen de (voor)indikking van het slib, de slibvergisting, de biogasbenutting en de mechanische ontwatering.

WATERLIJN

De waterlijn omvat alle processtappen die direct betrekking hebben op het verkrijgen van het te lozen effluent. Voorbehandeling, biologische behandeling, nabezinking, inclusief slibretour, en eventuele nabehandeling vallen hieronder.

UITGANGSPUNTEN VAN SLIBKETENSTUDIE II

ALGEMEEN

Voor de uitwerking van de slibketenstudie is het van belang om vóóraf de uitgangspunten ten behoeve van het rekenmodel éénduidig vast te stellen. Sommige uitgangspunten zijn uitsluitend bestemd om het aantal door te rekenen varianten in deze studie te beperken en kunnen in een later stadium door de gebruiker van het rekenmodel worden gevarieerd. Een voorbeeld daarvan is de samenstelling van het afvalwater. Andere uitgangspunten zijn bedoeld om de omvang van het model te beperken. Een voorbeeld daarvan zijn de schaalgroottes van de RWZI's en de slibeindverwerking op grond waarvan kengetallen voor de kostenberekening zijn gebaseerd.

In de volgende paragrafen zijn de gehanteerde sets uitgangspunten weergegeven, inclusief een korte toelichting. Het betreft:

- de samenstelling van het te behandelen afvalwater;
- de eisen met betrekking tot de emissies naar water via het effluent van de RWZI;
- de schaalgrootte van de RWZI;
- de eisen met betrekking tot de emissies naar lucht ten behoeve van de slibeindverwerking van het mechanisch ontwaterde zuiveringsslib;
- de schaalgrootte van de slibeindverwerking;
- enkele specifieke uitgangspunten voor slibeindverwerkingstechnieken;
- het transport. Met het oog op de kosten, de minimale schaalgroottes voor het bedrijven van bepaalde verwerkingssystemen en de bijbehorende standaard transportafstanden voor het slib, zijn keuzes gemaakt;
- energie en hulpstoffen. Het betreft met name de definitie van energie, de te gebruiken grootheden, de mee te nemen energieaspecten, de standaard samenstellingen, de proceseigenschappen, de systeemgrenzen etc.;
- financiële uitgangspunten.

Opgemerkt wordt dat enkele in dit rapport gebruikte termen nader gedefinieerd zijn op de pagina met definities, voorafgaand aan de bijlagen.

SAMENSTELLING AFVALWATER

Er is uitgegaan van "standaard"-huishoudelijk afvalwater.

De karakteristieken voor dit afvalwater zijn ontleend aan gegevens over 1994 en 1995 van de milieustatistieken van het CBS¹ en redelijk in overeenstemming met eerder onderzoek². Voor zwevende stof is uitgegaan van een verhouding van ZS : BZV van 1,00³.

Voor de debieten is uitgegaan van veronderstellingen zoals samengevat in tabel II.1. Deze gegevens zijn eerder geformuleerd in een rapport voor de CIW⁴. De in tabel II.2 gehanteerde i.e. à 54 g BZV komt overeen met 1,40 i.e. van 150 gTZV/dag (Totaal Zuurstof Verbruik per dag); dit is het gevolg van de aannames die over de samenstelling van het afvalwater zijn gemaakt. TZV is hierbij een parameter voor de som van de zuurstofbindende stoffen:

$$TZV = CZV + 4,47 \times Hkj$$

Andere definities voor i.e. worden in dit rapport niet gebruikt.

TABEL II.1

AFVALWATERKARAKTERISTIEKEN

Parameter	Eenheid	Waarde
Debietten		
DWA	m ³ /d per i.e.	0,120
RWA	m ³ /h per i.e.	0,044
Totale hoeveelheid	m ³ /d per i.e.	0,183
Concentraties:		
CZV	mg/l	523
BZV	mg/l	191
N _{kj}	mg/l	48
P _{tot}	mg/l	8
ZS	mg/l	191

TABEL II.2

AFVALWATERKARAKTERISTIEKEN VOOR EEN RWZI VAN 100.000 I.E

Parameter	Eenheid	100.000 i.e.
Debietten		
DWA	m ³ /h	750
DWA	m ³ /d	12.000
RWA	m ³ /h	4.400
Totale aanvoer	m ³ /d	18.320
Vrachten		
CZV	kg/d	9.581
BZV	kg/d	3.499
N _{KJ}	kg/d	879
P _{TOT}	kg/d	147
ZS	kg/d	3.499

ONTWERPTEMPERATUREN

Voor het ontwerp van een rwzi is de ontwerptemperatuur één van de belangrijkste parameters. Voor het ontwerp van de rwzi wordt uitgegaan van een minimumtemperatuur van 11°C. Dit is de temperatuur die bepalend is voor de te handhaven slibleeftijd.

Voor de berekening van de gemiddelde slibproductie en de benodigde beluchtingsenergie wordt uitgegaan van een gemiddelde temperatuur van 14°C. De te installeren beluchting-capaciteit wordt berekend voor een maximale temperatuur van 20°C.

Zwavel

Voor zwavel in zuiveringsslib wordt uitgegaan van de gemiddelde samenstelling zoals opgenomen in het Landelijk afval beheerplan, zijnde 10 g S/kg slib d.s. In uitgegist slib kan het zwavelgehalte lager zijn, afhankelijk van de mate waarin het gebonden is (bijvoorbeeld door FeCl₃-dosering) tijdens de vergisting. Indien er geen binding van zwavel plaatsvindt, kan het verlies aan zwavel via het biogas circa 0,5 – 1,0 g S/kg slib d.s. zijn.

EFFLUENTEISEN

Voor de ontwikkeling van het rekenmodel wordt er vanuit gegaan dat er voldaan dient te worden aan de wet- en regelgeving en de van toepassing zijnde richtlijnen met betrekking tot de kwaliteit van het effluent van de afvalwaterzuivering, zijnde de effluenteisen die behoren bij het Lozingenbesluit Wvo Stedelijk Afvalwater.

De effluenteisen zijn, samen met de vrachten, bepalend voor de uitkomst van de verdeling van de beluchte ruimte in anoxische en aërobe ruimte, voor de anaërobe ruimte in geval van biologische P-verwijdering, of de extra slibproductie in geval van chemische P-verwijdering. De effluenteisen voor BZV en zwevend stof hebben in wezen geen invloed op de dimensionering van de RWZI. In tabel II.3 zijn de effluenteisen weergegeven.

TABEL II.3 EFFLUENTEISEN VOLGENS AMVB, DE VERONDERSTELDE GEMIDDELDE EFFLUENTKwaliteit, EN EVENTUELE STRENGERE EFFLUENTEISEN (MTR-EISEN), ZOALS DIE MOGELIJK IN DE TOEKOMST GELDIG KUNNEN WORDEN

Parameter	Eenheid	Huidige eis	Gemiddelde	Toekomstige eis
BZV5 (20°C) *	mg/l	20	5	5
CZV *	mg/l	125	75	75
N-totaal **	mg/l	10	10	2,2
P-totaal ***	mg/l	1	1	0,15
Zwevende stof *	mg/l	30	10	5

* 95%-percentiel-waarde. De maximale waarden zijn CZV 250 mg/l, BZV 40 mg/l en OB 75 mg/l;

** als kalenderjaargemiddelde;

*** als voortschrijdend gemiddelde van 10 etmaalmonsters.

SCHAALGROOTTE WATER- EN SLIBLIJN

Om het aantal door te rekenen varianten te beperken is een keuze gemaakt voor de schaal-grootte van de rwzi. Dit is met name van belang in verband met de kostenberekening.

Op grond van de onderstaande tabel II.4 waarin de grootte van de Nederlandse rwzi's nader is aangegeven, is gekozen voor een ontwerp-grootte van 100.000 i.e.

TABEL II.4 GEGEVENS VAN HET CBS OVER RWZI'S¹

Capaciteitsklasse	Aantal RWZI's	Aantal i.e. behandeld	Gemiddelde ontwerpbelasting ¹
i.e. à 54 g BZV	-	i.e. x 1.000	i.e. à 54 g BZV ²⁾
< 5.000	66	163	2.500
5.000 - 10.000	62	432	7.000
10.000 - 25.000	87	1364	15.700
25.000 - 50.000	71	2478	35.000
50.000 - 100.000	71	4982	70.200
100.000 - 250.000	47	6698	142.500
> 250.000	19	8262	434.800

1: Berekend door deling van het totaal aantal i.e. door het aantal RWZI's in de klasse;

2: 1 i.e. à 54 g BZV komt overeen met 1,40 i.e. van 150 gTZV/jaar.

Voor de ontwerp-grootte van 100.000 i.e. zijn de influentgegevens en de effluenteisen samen-gevat in tabel II.5. Merk op dat een installatie van 100.000 i.e. à 150 g TZV een 'wettelijke' ontwerp-grootte heeft van circa 70.000 i.e. (à 54 gr. BZV) en daarmee dus niet hoeft te voldoen aan een effluenteis van 1 mg P/l. Er is hier echter wel van deze eis uitgegaan.

TABEL II.5

SAMENVATTING VAN DE INFLUENTGEGEVENS EN EFFLUENTEISEN

Parameter	Eenheid	Influent ²⁾	Effluent
debieten			
DWA	m ³ /h	1.200	-
RWA	m ³ /h	4.400	-
totale aanvoer	m ³ /dg	20.206	-
concentraties			
CZV	mg/l	523	125
BZV	mg/l	191	20
Nkj	mg/l	48	3,5
Nitraat	mg/l	0	-
totaal-N	mg/l	48	10
P-totaal	mg/l	8	1 ¹⁾
OB	mg/l	191	30

1) Wordt beschouwd als de Europese stand der techniek;

2) Deze afvalwaterkarakteristieken zijn ook gebruikt in de studie naar De Energiefabriek.

Overige uitgangspunten die in de water- en sliblijn zijn gehanteerd:

- warmte geproduceerd door gasmotoren (WKK-installatie) wordt intern gebruikt voor het op temperatuur houden van de gistingstanks. De resterende warmte wordt in de modellering beschouwd als niet bruikbaar. Energie nodig voor eventuele koeling, wordt eveneens buiten beschouwing gelaten;
- op de rwzi geproduceerde energie (in alle vormen) wordt alleen als benutting meegeteld indien hiermee daadwerkelijk elders het gebruik van fossiele energie wordt vermeden (en niet alleen als het kan);
- indien het gebruik van restwarmte uit externe stromen van toepassing is, zal in de rekenmodellen een verrekening plaatsvinden naar het vermeden gebruik van fossiele energie;
- indien energierijke reststromen (bijv. bij co-vergisting) worden toegepast, zal in de rekenmodellen een verrekening plaatsvinden naar het vermeden gebruik van fossiele energie;
- levering van laagwaardige warmte 'buiten de poort' van de rwzi is niet meegenomen in de bespiegelingen, omdat het te locatiespecifiek is.

EISEN T.A.V. DE EMISSIE NAAR LUCHT

Voor de ontwikkeling van het rekenmodel wordt er vanuit gegaan dat er voldaan dient te worden aan de wet- en regelgeving en de van toepassing zijnde richtlijnen op de emissies naar de overige compartimenten als gevolg van de bewerkingen in de sliblijn.

Emissie naar lucht

In de huidige situatie moeten afvalverbrandingsinstallaties voldoen aan de emissie-eisen opgenomen in het Besluit verbranden afvalstoffen (BVA). De hierin opgenomen emissie-eisen hebben zowel betrekking op zelfstandige slibverbrandingsinstallaties als op meeverbrandingsinstallaties. Meeverbrandingsinstallaties zijn technische eenheden die in hoofdzaak bestemd zijn voor de opwekking van energie of de vervaardiging van producten en waarin afvalstoffen of de producten van thermische behandeling als brandstof worden gebruikt of waarin afvalstoffen thermisch worden behandeld ten behoeve van verwijdering.

Voor de geur- en stofemissie wordt uitgegaan van de Nederlandse emissie Richtlijn (NeR).

SCHAALGROOTTE SLIBEINDVERWERKING

Ook bij de slibeindverwerkingsinstallaties is een keuze gedaan voor de schaalgrootte. Deze wordt echter meer bepaald door de systeemkeuze. Verbrandingsinstallaties hebben uit oogpunt van bedrijfsvoering een hogere verwerkingscapaciteit in vergelijking met biologische of thermische droogtechnieken. Voor de eindverwerkingsinstallaties wordt in dit onderzoek uitgegaan van de volgende twee schaalgroottes:

- 20.000 ton d.s./jaar voor biologische drooginstallaties, thermische drooginstallaties, natte oxidatie en meestoken in een AVI, lage temperatuur droging, verbranding in een elektriciteit centrale, de HTU-installatie en superkritische vergassing;
- 100.000 ton d.s./jaar voor verbrandingsinstallaties (beschikbaarheid van 7.500 uur per jaar).

ENKELE SPECIFIEKE UITGANGSPUNTEN VOOR SLIBEINDVERWERKINGSTECHNIKEN

Lage temperatuur droging

- warmte input: 5.000 kJ (temperatuurniveau 120°C); in deze opzet is deze warmte gewaardeerd als warm water (restwarmte - met waardering van 0.1 kJ prim./kJ).
- eigen gebruik is met 0.05 kWh hoger ingeschat dan bij 'Indirecte thermische droging (restwarmte)' door de toevoegde apparatuur;
- extra investeringskosten opgenomen voor de voordroger en de condenser (eventueel kan de condensor worden gecombineerd met de droogdamp condensor van het hoofdproces).

HTU-proces

- eigen gebruik van de installatie inclusief is ingeschat op 0.45 kWh per kg slib (d.s.);
- echter bestaan nog geen installaties op praktijkschaal.

Superkritische vergassing

- eigen elektrisch verbruik is geschat op 0,35 kWh per kg slib (d.s.);
- ruwe schatting investeringskosten op basis van literatuur⁵.

SLIBTRANSPORT

Een toename van de schaalgrootte van de rwzi's heeft doorgaans weinig invloed op de transportafstanden voor mechanisch ontwaterd zuiveringsslib. Bij veel waterschappen met kleine rwzi's zijn de mechanische ontwateringsinstallaties reeds gecentraliseerd opgesteld.

Een toename van de schaalgrootte van de slibeindverwerking heeft doorgaans wel een toename van de transportafstanden voor mechanisch ontwaterd zuiveringsslib tot gevolg. Voor de verschillende schaalgroottes wordt uitgegaan van de volgende gemiddelde transportafstanden (enkele reis):

- voor ingedikt slib naar een centrale vergisting 10 km/vracht van 30 m³ (enkele reis);
- voor ingedikt (uitgegist) slib naar een centrale ontwatering 10 km/vracht van 30 m³ (enkele reis);
- voor mechanisch ontwaterd slib naar een eindverwerker met een capaciteit van respectievelijk:
 - 20.000 ton d.s./jaar: 45 km/vracht van 30 ton;
 - 100.000 ton d.s./jaar: 75 km/vracht van 30 ton.

BEGREINZING MET BETREKKING TOT ENERGIE EN HULPSTOFFEN

Algemeen

Het rekenmodel is primair gebaseerd op de massabalans en de energiebalans van de inrichting, begrensd door het hekwerk rondom de inrichting. Met behulp van deze balansen worden de besparing op primaire energiedragers, de CO₂-emissie (van fossiele herkomst), de stikstofbalans, de samenstelling van het effluent, het gebruik aan hulpstoffen, de samenstelling van eindproducten/reststoffen en de globale kosten berekend.

Daarnaast wordt het transport (buiten de inrichting) in de berekeningen meegenomen voor zover het transport van ingedikt slib of mechanisch ontwaterd slib betreft.

Energetische waardering van chemicaliën

Bij de MJA-3 zijn geen energieverbruiken toegerekend aan de gebruikte chemicaliën, omdat het niet beschouwd kan worden als primaire energie. Toch mogen maatregelen die het energieverbruik beperken worden opgevoerd als energiebesparende maatregelen. Daarom is in deze studie het verbruik van chemicaliën als energieverbruik opgevat. De daarbij gehanteerde waarden zijn gegeven in tabel II.6.

TABEL II.6

ENERGIEVERBRUIK BIJ PRODUCTIE VAN CHEMICALIËN⁶

Chemicaliën	MJ/kg
Natronloog (NaOH)	17,0
IJzerchloride (per kg Fe)	15,7
Zoutzuur (HCl)	6,2
Polyelectrolyet (per kg)	16
Methanol (100%)	20

Waardering biogas

Bij de rwzi's met een slibgisting wordt in het rekenmodel uitgegaan van een continue productie van biogas en een continue benutting in één of meer gasmotoren (vollast gedurende een bedrijfstijd van 8.760 uur per jaar). Het methaangehalte van het biogas is gesteld op 65% en het elektrische rendement van de gasmotor is gesteld op 35%. De door de gasmotor geleverde warmte (rendement van 50%) wordt benut voor het op temperatuur houden van de gistingstank. Met verdere benutting van de vrijkomende warmte is geen rekening gehouden. Er wordt bij de berekening van de energieproductie geen rekening gehouden met eventueel affakkelen van biogas.

Energetische beoordeling

De energetische beoordeling van de diverse uitgewerkte alternatieven vindt plaats op basis van het criterium:

- verbruik van, dan wel besparing op de fossiele brandstofmix, gemeten in kJ_{prim.} per kg d.s.

Gezien de wijze waarop energiedragers in Nederland normaliter worden omgezet in elektriciteit, worden energieverbruiken en -opbrengsten van andere energiedragers omgerekend op basis van de volgende uitgangspunten:

- 1 m³ aardgas heeft een onderste verbrandingswaarde van 31,65 MJ;
- voor brandstoffen op basis van biomassa of afval (zoals houtchips, RDF e.d.) wordt uitgegaan van een netto elektrisch rendement van circa 25%.

Voor de opwekking van elektriciteit (bijvoorbeeld door de inzet van gedroogd zuiveringsslib in een kolencentrale) wordt voor de waardering uitgegaan van een elektrisch rendement van 47% o.b.v. de volgende brandstofmix van 2009:

- kolen 21% (E-rendement= 40%);
- aardgas 59% (E-rendement= 50%);
- nucleair 6%
- overig foss. 5%
- duurzaam 9%

De aangegeven netto rendementen worden in de praktijk niet altijd gehaald, maar in andere gevallen overschreden. De aangegeven waarden kunnen als een goede algemene richtlijn worden gehanteerd.

De gehanteerde stookwaarden en CO₂-emissiefactoren zijn weergegeven in tabel II.7.

TABEL II.7

GEHANTEERDE STOOKWAARDE EN CO₂-EMISSIEFACTOR IN DE MJA-3 EN DE SLIBKETENSTUDIE

	Eenheid	Stookwaarde GJ/eenheid	CO ₂ -emissiefactor kg CO ₂ /GJ
Aardgas	Nm ³	0,03165	56,8
Elektriciteit	MWh	9	74,6
Gas-/dieselolie	ton	42,7	74,3
Methaan	Nm ³	0,0359	54,9
Primaire energie	TJ	1.000	56,1
Rwzi biogas	Nm ³	0,0233	84,2

Waardering lagedruk stoom

In bepaalde gevallen is een verdere energetische optimalisering mogelijk door toepassing van warmtekrachtkoppeling en levering van restwarmte aan of door een nabijgelegen procesinstallatie van derden, bijvoorbeeld een elektriciteitscentrale. Daarbij wordt gebruik gemaakt van lagedruk aftapstoom ('restwarmte') bij een drukniveau van circa 10 bar als energiedrager voor het droogproces. Met deze 'restwarmte' wordt het slib gedroogd tot een granulaat met een drogestofgehalte van circa 90%, maar dit gaat wel ten koste van enige elektriciteitsproductie.

De waarde van deze lagedruk stoom, uitgedrukt als primaire energie, is als volgt meegenomen in het rekenmodel voor de slibeindverwerking:

De waardering (in MJ_{prim}) is het product van een factor maal de enthalpie van de benodigde stoom. De genoemde factor is weer afhankelijk van de temperatuur van de benodigde stoom. Bij een temperatuur van minder dan 60°C is de waarde nul. Bij een temperatuur hoger dan 60°C is de factor gelijk aan het resultaat van de volgende functie:

$$1,35 * (T - 40) / (T + 273) + 0,05 \text{ waarbij } T \text{ gelijk is aan de temperatuur in } ^\circ\text{C};$$

Warmte op een laag temperatuurniveau (< 60°C), zoals vrijkomend bij de condensatie van droogdampen bij thermische slibdroging wordt gewaardeerd op 20% van de energie-inhoud.

Inzet gedroogd slib

Bij de inzet van gedroogd zuiveringsslib als secundaire brandstof in een cementoven is in het rekenmodel voor de slibeindverwerking aangenomen dat daarbij 100% primaire brandstof wordt vervangen en dat deze primaire brandstof overeenkomt met de Nationale brandstofmix. Aardgas kan met een rendement van 50% in elektriciteit worden omgezet.

In een kolencentrale is in het rekenmodel aangenomen dat het gedroogde slib een brandstofmix vervangt. Steenkool wordt in een kolencentrale met een rendement van circa 40% omgezet in elektriciteit. Dat is in de huidige situatie een reëel rendement. Weliswaar zijn er ontwikkelingen voor rendementsverhoging (bijvoorbeeld door toepassing van stoomtemperaturen van 700°C), maar toepassing daarvan is op dit moment nog onzeker.

De met het rekenmodel van de slibeindverwerking berekende exergetische score voor de inzet van gedroogd slib in een kolencentrale bedraagt $40/50 = 80\%$ van die in een cementoven. Verdringing van een GJ steenkool levert dus exergetisch minder op dan een GJ aardgas, maar de prijs van steenkool is ook aanzienlijk lager dan die van een GJ aardgas.

Daarbij moet worden opgemerkt dat door de inzet van andere alternatieve brandstoffen in de klinkerproductie er bij ENCI al bespaard wordt op traditionele brandstoffen zoals aardgas en bruinkool. Het is dus niet aannemelijk dat er door de inzet van gedroogd zuiveringsslib uitsluitend op aardgas wordt bespaard. Bovendien is de verwerkingscapaciteit van de cementovens beperkt. Een groot scala van secundaire brandstoffen kan langs deze weg worden ingezet. De toepassing van gedroogd zuiveringsslib kan door andere secundaire brandstoffen worden verdrongen.

Invloeden van buitenaf

Invloeden van buitenaf (van buiten het hekwerk) worden verwaarloosd zolang de invloed op alle berekeningsresultaten minder is dan 5%. Enkele voorbeelden:

- bij natte oxidatie van zuiveringsslib wordt zuivere zuurstof gebruikt. Zuivere zuurstof wordt beschouwd als een energiedrager die eventueel ter plaatse kan worden aangemaakt. De daarbij gebruikte hoeveelheid fossiele brandstof maakt meer dan 5% uit van de totale hoeveelheid fossiele energie die door het proces wordt gebruikt en wordt derhalve in de berekening meegenomen;
- bij het biologisch drogen van zuiveringsslib worden houtchips gebruikt. Met deze houtchips kan het gebruik van een hoeveelheid fossiele energie worden vermeden die groter kan zijn dan 5% op het totale verbruik aan fossiele energie en wordt derhalve in de berekening meegenomen;
- bij de ontwatering van zuiveringsslib kan ijzerchloride worden toegepast. De hoeveelheid ijzer kan meer dan 5% uitmaken op de totale hoeveelheid ijzer aanwezig in de reststoffen en wordt derhalve meegenomen in de berekening;
- actief kool kan gebruikt worden als adsorptiemateriaal in de rookgasreiniging van een slibverbrandingsinstallatie. Dit filter zal periodiek worden vervangen. Indien de hoeveelheid verbruikt actief kool minder is dan 5% van het totaal aan te verwijderen reststoffen en ook minder dan 5% invloed heeft op de concentraties van de onderzochte componenten in de reststoffen, dan wordt dit materiaal niet verder in de berekening meegenomen.

Alle stoffen die van buitenaf in de slibketen worden gebruikt zijn separaat in beschouwing genomen en zonodig zijn enkele globale berekeningen uitgevoerd.

FINANCIËLE UITGANGSPUNTEN

De kosten worden in het rekenmodel meegenomen op basis van kengetallen (zie tabel II.8), zowel voor de investering als voor de exploitatie. Zij zijn primair bedoeld om verschillen aan te geven in scenario's en te kiezen slibketens. De berekende kosten zijn slechts indicatief en bedoeld ter onderlinge vergelijking met andere varianten.

TABEL II.8

AANGEHOUDEN FINANCIËLE KENGETALLEN

Parameter	Aangenomen waarde ¹⁾	Eenheid
Rente	5	% per jaar
Afschrijving grond	Geen ²⁾	
Afschrijvingstermijn bouwkundig	30	jaar
Afschrijvingstermijn mechanisch	15	jaar
Afschrijvingstermijn mobiele bedrijfsmiddelen	5	jaar
Onderhoud bouwkundig	1,5	% v/d investering
Onderhoud mechanisch/elektrisch	6	% v/d investering
Onderhoud mobiele bedrijfsmiddelen	7,5	% v/d investering
Personeelskosten (per fte)		
management	€ 90.000,-	per jaar
technische dienst	€ 70.000,-	per jaar
personeel dagdienst	€ 50.000,-	per jaar
personeel ploegendienst	€ 65.000,-	per jaar
Elektriciteitsverbruik	€ 0,135	per kWh
Terugleververgoeding elektriciteit	€ 0,135	per kWh
Diesel	€ 0,90	per liter
Aardgas	€ 0,30	per m ³
Stoom (155°C, 5 bar) ²⁾	€ 10,40	per GJ
Water	€ 1,00	per m ³
Houtchips	€ 23,00	per m ³
Zuivere zuurstof	€ 40,-	per ton, incl. BTW
FeCl ₃ (40 gew.%)	€ 173,-	per ton, incl. BTW
NaOH	€ 250,-	per ton, incl. BTW
Polymeer	€ 6,-	per kg actief
Zuiveringsheffing	€ 50,-	per v.e.
(Stort)kosten reststoffen ³⁾	€ 50,-	per ton
Stortkosten chemisch afval	€ 200,-	per ton
Verzekering (als % van de investering)	0,35%	
Diversen (als % van de exploitatiekosten)	5%	

1) Bedragen inclusief BTW.

2) Uitgaande van een ketelrendement van 90%.

3) Rekenkundig wordt een afschrijvingstermijn van 1000 jaar gehanteerd.

4) Vooral nog is een bedrag gehanteerd van € 50,- per ton voor alle geproduceerde reststoffen. Deze kosten zijn echter sterk afhankelijk van specifieke (markt-)omstandigheden

REFERENTIES

- 1 CBS 1997. Milieustatistieken - Waterkwaliteitsbeheer, deel b: zuivering van afvalwater 1995. CBS, Voorburg/Heerlen, 1997.
- 2 STOWA 1998. Huishoudelijk afvalwater: berekening van de zuurstofvraag. STOWA, Utrecht.
- 3 Gegevens van Hoogheemraadschap van Rijnland geven een gemiddelde van $0,92 \pm 0,21$ voor 26 RWZI's over 1999-2003. De indruk bestaat dat de verhouding in het oosten van Nederland wat hoger is.
- 4 Commissie Integraal Waterbeheer 1999. Financiering Zuiveringsbeheer –Voorstel voor een nieuwe heffingsmaatstaf en bouwsteen in de discussie rond de financiering van het waterbeheer. CIW, Den Haag, 1999.
- 5 K. Hemmes, L. van de Beld, S.R.A. Kersten Vergassing Van Natte Biomassa/Reststromen In Superkritiek Water (Scwg), Voor De Productie Van .Groen Gas. (Sng), Sng/H2 Mengsels, Basis Chemicaliën En Puur H2. ECN rapport nummer: ECN-C-04-107
- 6 STOWA 2008. Op weg naar een klimaatneutrale waterketen. STOWA, Amersfoort, rapport 2008-17. Hierin wordt verwezen naar Janse T & P Wiers 2008, Broeikasgasemissie vanuit de Amsterdamse waterketen, H2O 39 (18): 87-90, waarin weer naar de computersoftware SIMAPRO wordt verwezen.

BIJLAGE 3 T/M 7

ZIE RAPPORT 2010 34

Slibketenstudie II. Nieuwe technieken in de slibketen. Bijlagen
Rapport 2010-34 is te downloaden vanaf www.stowa.nl

