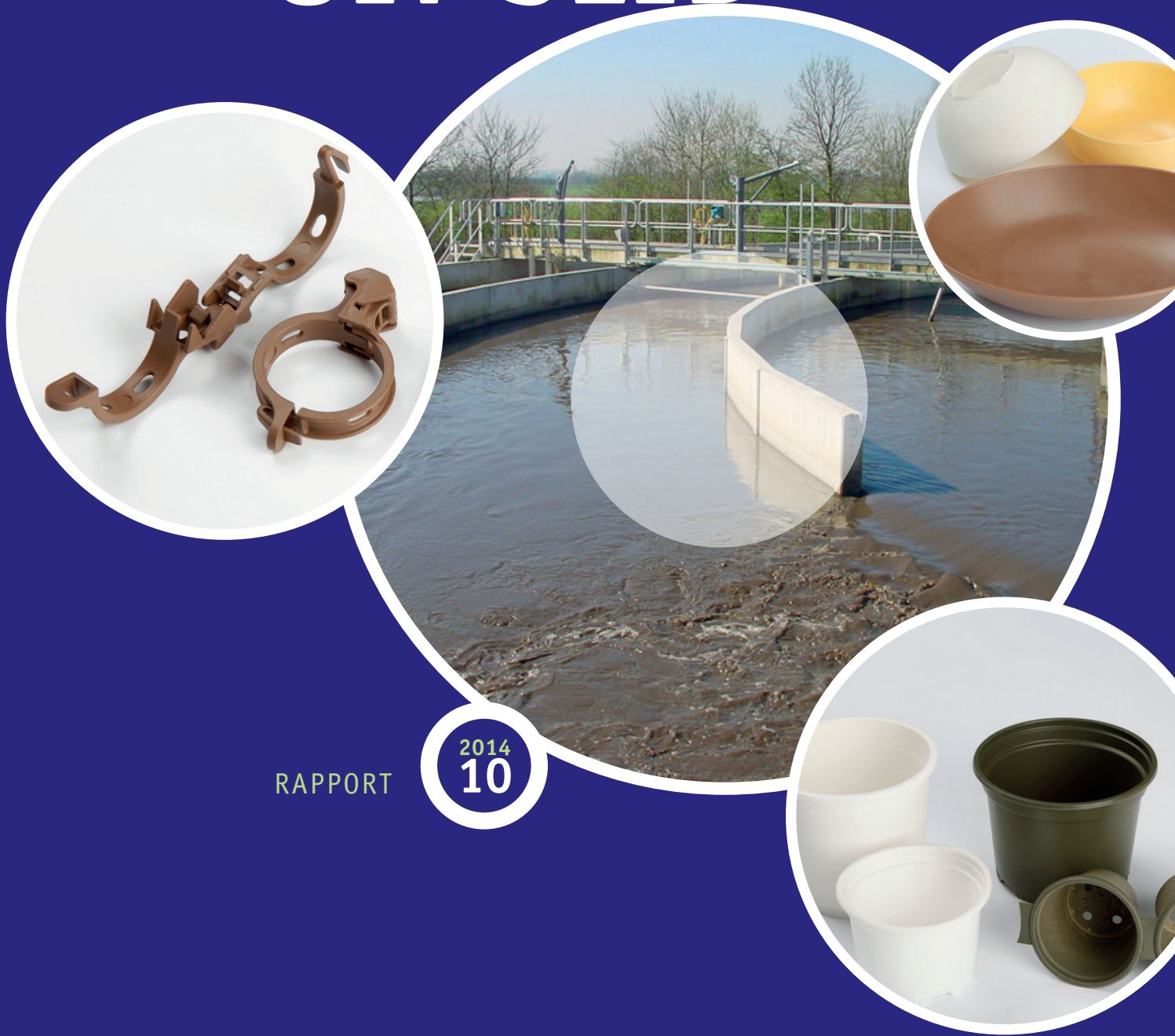


stowa

# Grondstoffenfabriek

VERKENNING NAAR PHA-PRODUCTIE UIT ZUIVERINGSSLIB

# BIOPLASTIC UIT SLIB



RAPPORT

2014  
10



ISBN 978.90.5773.649.0



# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

## PROJECTUITVOERING

N.R. de Hart - Witteveen+Bos  
E.D. Bluemink - Witteveen+Bos  
A.J. Geilvoet - Witteveen+Bos  
J.F. Kramer - Witteveen+Bos

## MET BIJDRAGE VAN

A.G. Werker - AnoxKaldnes AB  
N.B. Gurieff - AnoxKaldnes AB  
R. Wielinga - rEAUnald Consultancy  
M.C.M. van Loosdrecht - Technische Universiteit Delft  
R. Kleerebezem - Technische Universiteit Delft  
C.H. Bolck - Wageningen UR  
J.J.G. van Soest - Rodenburg Biopolymers

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Y. van der Kooij - Wetterskip Fryslân  
E.G. Wypkema - Waterschap Brabantse Delta  
M.E.P. Verhoeven - Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden  
V.W.M. Claessen - Waterschap De Dommel  
G.R. Zoutberg - Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
M. Borgman - Waterschap Rijn en IJssel  
C.A. Uijterlinde - Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
L. Sijstermans - Slibverbranding Noord-Brabant  
R. van Kempen - Delfluent Services

## FOTO OMSLAG

Combinatie van biologisch afbreekbare plastic producten (Rodenburg Biopolymers) en een aeratietank van een conventionele rioolwaterzuiveringsinstallatie.

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau  
STOWA STOWA 2014-10  
ISBN 978.90.5773.649.0

COPYRIGHT De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

DISCLAIMER Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

# TEN GELEIDE

De waterschappen willen in 2020 minstens 40% van het energieverbruik zelf opwekken. In de Meerjarenaafspraken energie-efficiency (2008), Klimaatakkoord (2010), Lokale Klimaatagenda (2011) Green Deal (2011), Ketenakkoord Fosfaat en recentelijk het SER Energieakkoord (2013) zijn beleidsmatige afspraken gemaakt over energie- en fosfaatterugwinning. Grondstoffenterugwinning, energie- en kostenbesparing zijn belangrijke uitdagingen voor de toekomst.

Door met een nieuwe bril naar het traditionele waterzuiveringsproces te kijken, zijn de waterschappen tot het concept van de Energiefabriek gekomen. Binnen de Energiefabriek worden slimme combinaties van bestaande en nieuwe technieken ingezet om energie te besparen en te produceren. Op dit moment is een transitie gaande om producten met een steeds hogere toepassingswaarde uit afval te produceren. Om die reden zijn alle Nederlandse waterschappen betrokken bij de Grondstoffenfabriek. De Grondstoffenfabriek is zowel een concept, het winnen, verwerken en afzetten van grondstoffen uit afvalwater, als ook een fysieke locatie, een rioolwaterzuivering waar grondstoffen uit afvalwater gewonnen worden. Eén van die grondstoffen uit afvalwater, zoals ook omschreven in het visiedocument 'Routekaart afvalwaterketen tot 2030' is bioplastic. Bioplastics zijn biologisch afbreekbare plastics. Met de productie van bioplastics uit afvalwater wordt "afval weer grondstof".

Om de technische en economische potentie van dit concept te toetsen heeft de STOWA een verkennende studie uitgevoerd. Deze studie maakt inzichtelijk hoe ver de ontwikkeling van dit concept zijn gevorderd en waar de knelpunten en kansen liggen. Deze rapportage draagt bij aan de verdere ontwikkeling van de kennis en praktijkervaring op het gebied van grondstoffenproductie uit afval(water).

# AFKORTINGENLIJST

AT	Aeratie Tank
ATP	Adenosine TriPhosphate
BZV	Biologisch Zuurstof Verbruik
DS	DrogeStof
EUR	Euro
GAO's	Glycogeen Accumulerende oOrganismen
HAc	Acetaat
I.E.	Inwoners Equivalent
LCA	LevensCyclus Analyse
NaCl	NatriumChloride
NADH <sub>2</sub>	Nicotinamide Adenine Dinucleotide
NaOH	Natriumhydroxide
PAO's	Phosphate Accumulating Organism (fosfaataccumulerende organismen)
PE	Polyethyleen
PHA	PolyHydroxyAlkanoaat
PHBH	Poly-HydroxyButyrateHexanoate
PHBV	Poly-HydroxyButyraatValeraat
PLA	PolyLactic Acid
poly-P	Poly-fosfaat
PP	PolyPropyleen
PS	Primair Slib
P(3HB)	Poly-3-HydroxyButyraat
P(3HB4HB)	Poly3-HydroxyButyrate-co-4-HydroxyButyraat
P(3HV)	Poly-3-HydroxyValeraat
P(3H2MB)	Poly-3-Hydroxy-2-MethylButyraat
P(3H2MV)	Poly-3-Hydroxy-2-MethylValeraat
RWZI	RioolWaterZuiveringsInstallatie
SBR	Sequencing Batch Reactor
SDS	Sodium dodecyl sulphate
SS	Secundair Slib
TSS	Total Suspended Solids (totaal opgeloste stof)
VFA	Volatile Fatty Acid (vluchtige vetzuren)
VSS	Volatile Suspended Solids (organisch drogestof)

# SAMENVATTING

De productie van Polyhydroxyalkanoaat (PHA) uit zuiveringsslib is in het visiedocument 'Routekaart afvalwaterketen tot 2030' van de Unie van Waterschappen en de VNG genoemd als één van de mogelijke verwaardingsroutes van organisch materiaal uit afvalwater. Dit visiedocument, gepubliceerd in mei 2012, beschrijft afvalwater als een bron van nutriënten, energie en schoon water. Op verzoek van het transitieteam grondstoffenfabriek, werkgroep Bioplastics, is daarom door Witteveen+Bos een verkenning uitgevoerd naar de technische en economische haalbaarheid van PHA-productie uit zuiveringsslib voor de waterschappen in Nederland.

## ACHTERGROND

Jaarlijks wordt wereldwijd circa 280 miljoen ton plastic geproduceerd. Vooral voor producten met een korte levenscyclus is het interessant om biologisch afbreekbare plastics te gebruiken. De groeiende vraag naar duurzame oplossingen en de ontwikkeling van steeds weer nieuwe materialen is een stimulans voor de gehele bioplasticmarkt. Een voorbeeld van een grondstof voor een volledig biologisch afbreekbaar plastic is PHA.

Polyhydroxyalkanoaat is een biologisch afbreekbaar polymeer (lineaire polyester) en wordt door organismen geproduceerd met een koolstofbron als substraat. Tijdens de PHA-productie worden onder andere de koolstofatomen uit de koolstofbron (bijvoorbeeld vluchtige vetzuren; VFA) onder de juiste condities en door middel van verschillende tussenstappen aan elkaar gekoppeld tot een biopolymeer. Deze PHA's worden vervolgens opgeslagen in intracellulaire compartimenten van de micro-organismen. Het type koolstofbron dat wordt toegediend aan de PHA-fermentatie heeft invloed op het type biopolymeer dat uiteindelijk gevormd wordt.

## MARKT(PRIJS) EN TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN

De Europese bioplasticmarkt groeit met ongeveer 20 % per jaar. De drijfveren voor deze groei zijn onder andere: kostenreductie productieproces en (koolstof)grondstof, duurzaamheid (cradle2cradle-benadering) en innovatie. Ook voor PHA wordt een forse toename in de wereldmarktverwachting verwacht.

De toepassingsmogelijkheden van PHA als bioplastic bevinden zich in onder andere de volgende marktsegmenten:

- afbreekbare consumenten- en cateringproducten;
- farmaceutische en medische producten;
- afbreekbare land- en tuinbouw(folies);
- afbreekbare verpakkingsmaterialen.

De kosten van de conventionele PHA-productie worden voor ongeveer 40 % bepaald door de benodigde grondstoffen. Deze grondstoffen zijn onder andere een koolstofbron (glucose, zetmeel of plantaardige olie; veelal afkomstig van maïs- of aardappelproducten) en nutriënten. De kosten van de koolstofbron bedragen ongeveer 70 % van het grondstofkostenpercentage. Om deze reden is PHA-productie uit 'gratis' organische reststromen zoals (primair) zuiveringsslib mogelijk interessant. Het slib kan namelijk, na verzuuring (voor productie van vluchtige vetzuren), ingezet worden als koolstofbron voor PHA-productie.

De huidige PHA-marktprijs bedraagt circa EUR 4,- tot 5,- per kilogram biopolymeer, waarbij de toepassingen variëren van hoogwaardige medische producten tot laagwaardig(ere) gebruiksmiddelen voor land- en tuinbouw. De huidige marktprijs zorgt ervoor dat PHA, ondanks de aantrekkelijke producteigenschappen, nog niet veelvuldig wordt toegepast aangezien alternatieve biopolymeren goedkoper te produceren zijn. Verwacht wordt dat PHA uit zuiveringsslib als eerste toepasbaar is als biologisch afbreekbaar plastic voor in de land- en tuinbouw. Deze verwachting is gebaseerd op twee redenen: het PHA-biopolymeer is vervaardigd uit zuiveringsslib, een reststroom die in Nederland onder de afvalstoffenwetgeving valt. Daarnaast resulteert variatie in slibsamenstelling in variatie in vetzuursamenstelling en daarmee in een variërende PHA-productkwaliteit. Om de toepassingen van PHA in de toekomst mogelijk te maken, zal de PHA-productiekost en daarmee de prijs gereduceerd en de productkwaliteit gegarandeerd moeten worden zodat zowel hoog- als meer laagwaardige toepassingen in beeld komen. Marktpartijen geven aan dat toepassing van PHA financieel aantrekkelijk wordt wanneer de grondstofprijs (bulkprijs) circa EUR 3,- per kilogram PHA-biopolymeer bedraagt. In deze rapportage wordt deze prijs aangeduid als 'gewenste marktprijs'.

### **BEREIK VAN DE STUDIE**

Op dit moment wordt PHA geproduceerd onder steriele omstandigheden met een specifiek gecultiveerde bacteriecultuur. De koolstofbronnen die hierbij worden ingezet zijn voedselgerelateerde glucose, zetmeel of plantaardige olie. PHA-productie uit reststromen zoals zuiveringsslib vormt het alternatief voor de conventionele PHA-productieroute. Om die reden zijn voor deze verkennende studie twee alternatieve productieroutes uitgewerkt met zuiveringsslib als grondstof. Het betreft de volgende routes:

- **de 'rich culture' route;** met deze naam wordt de route aangeduid waarbij een bacteriecultuur wordt ingezet waarvan alle organismen in staat zijn om PHA op te slaan. De biomassa bestaat echter niet uit één bacteriesoort zoals bij het conventionele PHA-productieproces. Deze rich culture wordt verkregen en in stand gehouden door continue selectie. Door deze continue selectiedruk is geen steriele procesvoering noodzakelijk, maar blijft de cultuur toch bestaan uit PHA-accumulerende micro-organismen;
- **de 'mixed culture' route;** met deze naam wordt de route aangeduid waarbij een bacteriecultuur wordt ingezet waarvan een deel van het scala aan micro-organismen in staat is om PHA op te slaan. Secundair zuiveringsslib, afkomstig van een communale rwzi, is een voorbeeld van een mixed culture.

## DOEL VAN DEZE STUDIE

Verkenning naar de technische en economische haalbaarheid van PHA-productie uit zuiveringsslib.

## AFBAKENING VAN DEZE STUDIE

Het gaat in deze verkennende studie voornamelijk om een indicatie van de technische en economische haalbaarheid. Het betreft de specifieke haalbaarheid van twee geselecteerde PHA-productieroutes op basis van huidige inzichten.

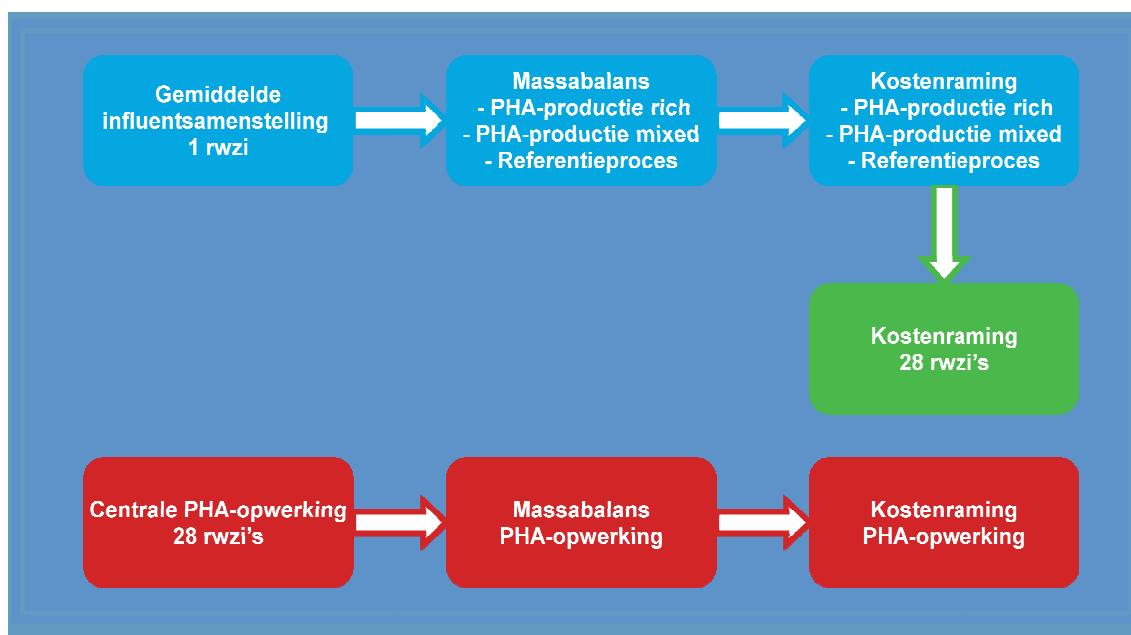
Een analyse van duurzaamheidsaspecten valt buiten de scope van deze studie maar kan inzicht verschaffen in de duurzaamheid van PHA-productie ten opzichte van de referentiesituatie.

De indicatieve kostendekkende verkoopprijzen in EUR per kilogram PHA, zoals berekend in deze studie, hebben een nauwkeurigheid van circa 50 %.

De twee geselecteerde routes voor PHA-productie gaan uit van alleen primair slib als koolstofbron; hierdoor is de uitkomst van deze studie zeer specifiek voor de uitgewerkte cases. In de discussie, weergegeven aan het eind van dit rapport, wordt in detail ingegaan op aanvullende begrenzing van deze studie.

Na PHA-productie uit slib is PHA-opwerking noodzakelijk om een basisproduct te verkrijgen dat ingezet kan worden voor de uiteindelijke productie van bioplastic.

Het procesontwerp van de twee geselecteerde PHA-productieroutes, zoals omschreven in dit rapport, betreft een ontwerp voor de casestudie van 28 fictieve PHA-productielocaties met een totale capaciteit van 10.000.000 i.e. De reden om een businesscase op te stellen met een totale fictieve capaciteit van 10.000.000 i.e. is dat circa 50 % van het zuiveringsarsenaal in Nederland (totaal circa 24.000.000 i.e.) is voorzien van gistinginstallaties. Omdat op deze locaties normaliter een voorbezinktank aanwezig is, zodat voorzien kan worden in primair slib, wordt met deze businesscase voor PHA-productie een goed beeld gegeven van de potentie om zuiveringsslib uit Nederland in te zetten voor bioplasticproductie. De methodiek om de kosten te ramen is hieronder gevisualiseerd.





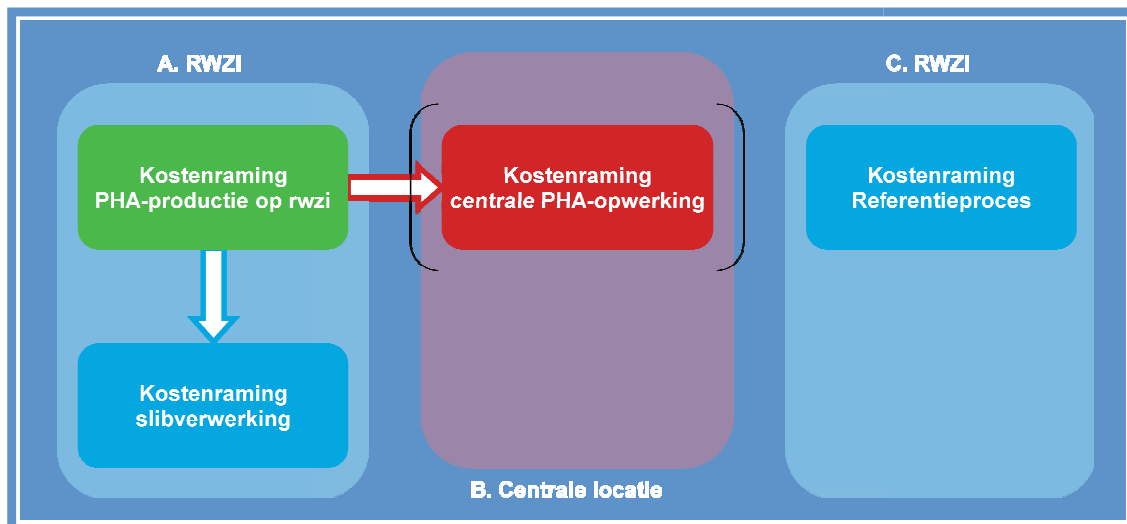
In deze studie zijn drie processen beschouwd, namelijk:

- PHA-productie middels de rich culture route;
- PHA-productie middels de mixed culture route;
- referentieproces: biogasproductie door vergisting (aangeduid als slibverwerking door vergisting).

De kostenopbouw van de PHA-productieroutes bestaat op hoofdlijnen uit de volgende posten:

- PHA-productie (inclusief VFA-fermentatie, biomassaproductie en PHA-fermentatie);
- Slibverwerking door vergisting;
- centrale PHA-opwerking.

De kostenpost voor de centrale PHA-opwerking is in het rapport meegenomen in de berekeningen van de indicatieve kostendeckende verkoopprijs van PHA als grondstof voor bioplastic. Deze methodiek is weergegeven in onderstaande figuur (blok A en B). De kosten voor de centrale PHA-opwerking zijn weggelaten in de berekeningen van de indicatieve kostendeckende verkoopprijs van PHA-rijk biomassa (blok A) dat de rwzi verlaat naar de centrale PHA-opwerkingslocatie. Het referentieproces voor deze studie is slibverwerking door vergisting (blok C).



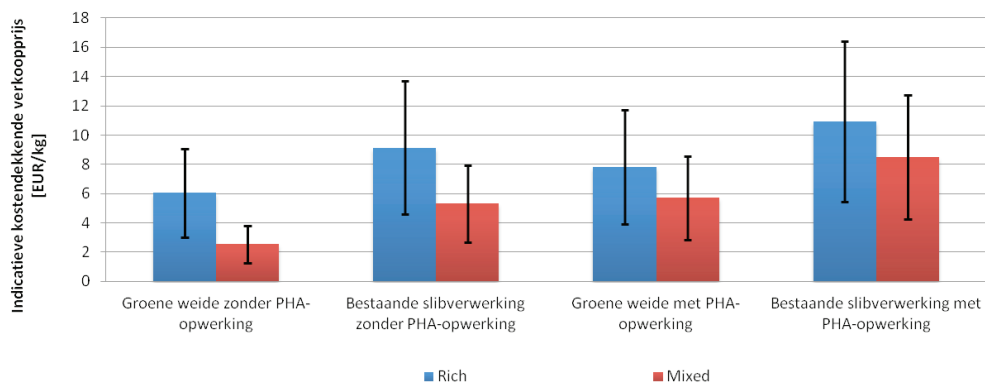
Voor de kostenberekening zijn twee situaties als uitgangspunt gekozen:

- de groene weidevariant; hierbij is uitgegaan van volledige nieuwbouw van de PHA-productiefaciliteit en de bijbehorende slibverwerkingslijn die het resterende organisch materiaal omzet tot biogas en ontwaterd slib. De nieuwbouw van een slibverwerking welke de volledige slibstroom omzet in biogas is als referentieproces genomen. Het verschil in jaarlijkse kosten tussen het PHA-productieproces en het referentieproces is gedeeld door het aantal geproduceerde kilogrammen PHA. Dit levert de indicatieve kostendeckende verkoopprijs van PHA op in EUR/kg PHA;
- de variant met een bestaande slibverwerking door vergisting; hierbij is uitgegaan van volledige nieuwbouw van de PHA-productiefaciliteit, de bestaande slibverwerking door vergisting wordt intact gelaten. Omdat minder slib naar de bestaande slibverwerking wordt gevoerd in het geval van PHA-productie op de rwzi, kan overcapaciteit van de bestaande slibverwerking optreden. De jaarlijkse kosten voor het PHA-productieproces zijn gedeeld door het aantal geproduceerde kilogrammen PHA. Dit levert de indicatieve kostendeckende verkoopprijs van PHA op in EUR/kg PHA.

## UITKOMSTEN

De uitkomsten per variant (rich en mixed), situatie (groene weide en bestaande slibverwerking door vergisting) en deelvariant (met en zonder PHA-opwerking, resulterend in puur en ruw product) zijn gevisualiseerd in afbeelding 1.1. Het betreft hier de indicatieve kostendekkende verkoopprijs. Uit de massabalans blijkt dat middels de rich culture route jaarlijks 2.940 ton PHA wordt geproduceerd en met de mixed culture route 5.240 ton PHA per jaar.

AFBEELDING 1.1 INDICATIEVE KOSTENDEKKENDE VERKOOPPRIJS VAN PHA (RICH EN MIXED ROUTE; RUW EN PUUR PRODUCT)



Uit deze case blijkt dat, met de gekozen uitgangspunten, de mixed culture route economischer is dan de rich culture route. Met het voorgaande wordt niet uitgesloten dat de rich culture route in andere situaties, met een andere referentiesituatie, de voorkeur kan hebben. Ondanks dat de mixed culture route voor deze case het meest gunstig is, is PHA-productie via deze route op dit moment economisch nog niet haalbaar. Daarnaast moet vermeld worden dat de lokale situatie invloed heeft op de haalbaarheid van PHA-productie. Reeds beschikbare apparatuur of gebouwen of de mogelijkheid om VFA's goedkoper in te kunnen kopen zijn voorbeelden van factoren die de haalbaarheid voor een specifieke locatie positief kunnen beïnvloeden. Dit wordt bevestigd door de additionele case voor rwzi Bath, waar het inkopen van vetzuren en het schaalgrootevoordeel resulteren in een indicatieve kostendekkende verkoopprijs van EUR 2,5 van PHA-rijk biomassa (zonder PHA-opwerking; ruw product).

**SAMENGEVAT**

- Huidige marktprijs: EUR 4,- tot EUR 5,- per kg PHA.
- Gewenste marktprijs: circa EUR 3,- per kg PHA.
- Nauwkeurigheid indicatieve kostendeekkende verkoopprijs:  $\pm 50\%$

## Indicatieve kostendeekkende verkoopprijs

zonder PHA-opwerking (ruw)	Rich (EUR/kg)	Mixed (EUR/kg)
Groene weide	6,0	2,5
Bestaande slibverwerking	9,1	5,3
<b>met PHA-opwerking (ruw)</b>		
Groene weide	7,9	5,7
Bestaande slibverwerking	11,0	8,5
<b>rwzi Bath inclusief inkopen van externe vetzuurbron en zonder PHA-opwerking:</b>		
Bestaande slibverwerking	-	2,5

**DISCUSSIE**

Opgemerkt dient te worden dat aannames zijn gedaan welke nog niet of onvoldoende getoetst konden worden aan praktijkresultaten. Ook de keuze van de PHA-opwerkingsmethode beïnvloedt de uitkomst van de studie. Voor deze studie is uitgegaan van een methode gebaseerd op een voorbehandeling met NaCl, een behandeling met NaOH en een nabehandeling met 20 % ethanol. Het is niet exact bekend of deze techniek goed toepasbaar is op het verkregen product (PHA-rijk celmateriaal afkomstig uit een rwzi) en type biopolymeer. Ook is niet bekend of de behaalde rendementen uit de literatuur overeen komen met de praktijk. Daarnaast komt veel afvalwater vrij dat gezuiverd dient te worden, wordt het ethanol in deze case niet hergebruikt en is het niet mogelijk om bioraffinage toe te passen op niet-PHA-materiaal. De overige biomassa wordt immers opgelost en komt als afvalwaterstroom vrij. De kostenraming voor de PHA-opwerking is hiermee vooralsnog een onzekere factor.

Wanneer de PHA-opwerking centraal wordt uitgevoerd, is de invloed op de rwzi relatief klein. Doordat VFA's worden geproduceerd uit primair slib, en in het geval van de mixed culture route een deel van het secundair slib (circa 15 %) wordt gebruikt, neemt de biogasproductie, en daarmee de productie van warmte en elektriciteit af met 25-30 %. Daarnaast komt op de rwzi een extra, maar relatief kleine, afvalwaterstroom vrij (<1 % van influent).

Bij de centrale PHA-opwerking komt een relatief grote afvalstroom vrij die voornamelijk bestaat uit opgelost CZV, NaCl en NaOH. De centrale PHA-opwerking resulteert in een afvalstroom gelijk aan 45.000 en 262.000 i.e. voor respectievelijk de rich en mixed culture route. Hierbij moet vermeld worden dat deze afvalstroom specifiek is voor de gekozen PHA-opwerkingsmethode, het toepassen van een alternatieve opwerkingsmethode resulteert in andere afval(water)samenstelling.

**CONCLUSIE:**

- technisch haalbaar;
- economisch op dit moment nog niet haalbaar;
- invloed op de procesvoering van de rwzi is gering;
- onzekerheid over de toepasbaarheid van de gekozen PHA-opwerkingsmethode, mede gelet op de vrijkomende afvalwaterstroom.

## VISIE

De opzet van deze studie is voornamelijk technologiegedreven. Dat wil zeggen: er is in kaart gebracht welke technieken potentieel interessant zijn en vervolgens is de economische haalbaarheid berekend aan de hand van de PHA-productiekosten en de geproduceerde kilogrammen PHA. De indicatieve kostendekkende verkoopprijs is vergeleken met de gewenste marktprijs. Hierbij is bijvoorbeeld de relatie tussen kwaliteit, functionaliteit en de reële marktprijs buiten beschouwing gelaten. Dit aspect vergt nadere verdieping buiten de scope van deze verkenning.

Gelet op het voorgaande moet de kans benut worden om in de toekomst nader onderzoek te verrichten, met de producteisen van de eindgebruiker als uitgangspunt. Op deze manier is het mogelijk een product te produceren van de juiste kwaliteit met betrekking tot beoogde toepassingsmogelijkheid en de daarbij behorende grondstofprijs (verkoopprijs voor PHA).

Nader onderzoek is gewenst en past ook zeker binnen de perioden zoals die zijn gepresenteerd in het visiedocument routekaart afvalwaterketen tot 2030. Het is hierbij wenselijk om ook marktgedreven onderzoek uit te voeren, waarbij:

- de wensen van eindgebruiker in kaart moeten worden gebracht, specifiek voor een bepaalde (groep) toepassing(en);
- het PHA-productieproces via backward integration moet worden opgezet, gelet op de gewenste kwaliteitseisen van het product.

Dit laatste betekent dat de processen PHA-opwerking, PHA-productie (micro-organismen/procesvoering) en de afval(water)stroom achtereenvolgens moeten worden geselecteerd aan de hand van vooraf opgestelde (kwaliteits)eisen. Het betrekken van de gehele keten moet hierbij worden gezien als een kans, zodat uiteindelijk voor elke partij een win-win situatie mogelijk wordt. Daarnaast kan op deze manier een product worden gedefinieerd waarvan kwaliteit en prijs op elkaar zijn afgestemd.

## AANBEVELINGEN

Deze verkennende studie geeft een indicatie met betrekking tot de economische haalbaarheid, waaruit naar voren komt dat de mixed culture route weliswaar de meeste potentie heeft met betrekking tot deze case maar, op basis van huidige inzichten economisch nog niet haalbaar is. Wel zijn verschillende optimalisatieslagen te behalen, zoals is gebleken uit dit onderzoek. Daarom wordt aanbevolen om tot en met 2015 nader marktgedreven onderzoek te verrichten naar:

- het maximaliseren van de VFA-productie uit slib;
- de toepassingsmogelijkheden van VFA-productie uit overige organische reststromen;
- het verhogen van de PHA-opslagcapaciteit van de biomassa;
- een opwerkingsmethode die geschikt is voor het opwerken van PHA uit biomassa, waarbij gelet moet worden op prijs, rendement, zuiverheid, vrijkomende afvalstromen (milieubelasting) en hergebruik van reststromen;
- de kwaliteit en uniformiteit van het verkregen PHA in relatie tot de voorgaande processen.

Omdat de conclusie van deze studie enkel op kosten is gebaseerd en niet op duurzaamheid, wordt aangeraden om de duurzaamheid van de geoptimaliseerde PHA-productie- en opwerkingsroute te vergelijken met het referentieproces, bijvoorbeeld aan de hand van levenscyclus analyse (LCA). Vervolgens kan, bij voldoende potentie, een demo-installatie worden opgestart in de periode 2015 tot 2020, geheel in overeenstemming met de planning als gepresenteerd in de routekaart afvalwaterketen.

# DE STOWA IN HET KORT

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

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie. Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

# SUMMARY

The Dutch roadmap 'Routekaart afvalwaterketen tot 2030' (Roadmap Wastewater Cycle up to 2030) identified the production of polyhydroxyalkanoate (PHA) from sewage sludge as a possible valorisation route of organic material. This roadmap was published by the Dutch water boards (UvW) and municipalities (VNG) in May 2012. It describes wastewater as a source of nutrients, energy and clean fresh water. On behalf of the expert team Bioplastics of the transition team 'Grondstofffabriek' ('Resource factory') a preliminary research was performed by Witteveen+Bos for all the Dutch water boards to assess the technical and economic feasibility of PHA-production from sewage sludge.

## BACKGROUND

Approximately 280 million tons of plastic are globally produced each year. Biodegradable plastic is an interesting substitute for non-degradable plastics, especially for products with short life times. The entire bioplastic market is stimulated by the growing demand for sustainable solutions and the constant development of new materials.

PHA is a group of biodegradable polymers (linear polyesters) that can be used to produce bioplastics. It is produced by micro-organisms, using a carbon source as substrate. During PHA-production a part of the carbon source (for example volatile fatty acids (VFA)) will be linked to form a biopolymer, under proper conditions and by means of various intermediate steps. These PHAs are then stored intracellular in granules. The type of the carbon source, fed to the PHA-fermentation process, influences the type of biopolymer finally formed.

## MARKET(PRICE) EN APPLICATIONS

The European bioplastic market is growing by approximately 20% each year. Growth is stimulated by the reduction in production costs, and the drive to a sustainable world and innovation. This significant increase in global bioplastics production is also expected for PHA. Applications of PHA-bioplastics are found in following markets:

- Consumer and Catering products
- Pharmaceutical and medical products
- Agriculture and horticulture
- Packaging materials

About 40% of the production costs of conventionally produced PHA are related to the crude materials. These crude materials include a carbon source (glucose, starch or vegetable oil, mainly from corn or potatoes) and nutrients. Approximately 70% of the costs of crude materials are attributed to the carbon source. Primary sludge can be used as renewable and possibly cheap carbon source for PHA-production (after acidification).

The current PHA-market price is approximately EUR 4,- to 5,- per kilogram biopolymer. Despite the attractive product features, PHA is not yet applied frequently due to this relatively high production costs and resulting market price. The application of PHA in the future mainly depends on production price and product quality. Market participants indicate that the application of PHA becomes financially attractive at bulk prices of approximately EUR 3,- per kilogram biopolymer, referred in this report as 'desired market price'.

It is expected that PHA from sewage sludge initially will be used as biodegradable plastic for agricultural and horticultural applications. This expectation is based on two grounds: the biopolymer is produced from sewage sludge, a waste stream with associated (Dutch) legislation. Moreover, variation in sludge quality will result in variation of fatty acid composition and thus results in a varying product quality.

#### **AIM OF THIS STUDY**

Exploring the technical and economical feasibility of PHA-production from sewage sludge.

#### **SCOPE OF THE STUDY**

This preliminary assessment indicates the technical and economical feasibility of two selected PHA-production routes based on current knowledge.

Sustainability analysis is beyond the scope of this study. However sustainability analysis will provide more insight in the sustainability of PHA-production compared to the reference situation (digestion).

The accuracy of the calculated indicative cost-effective selling prices in EUR per kilogram of PHA, is 50 %.

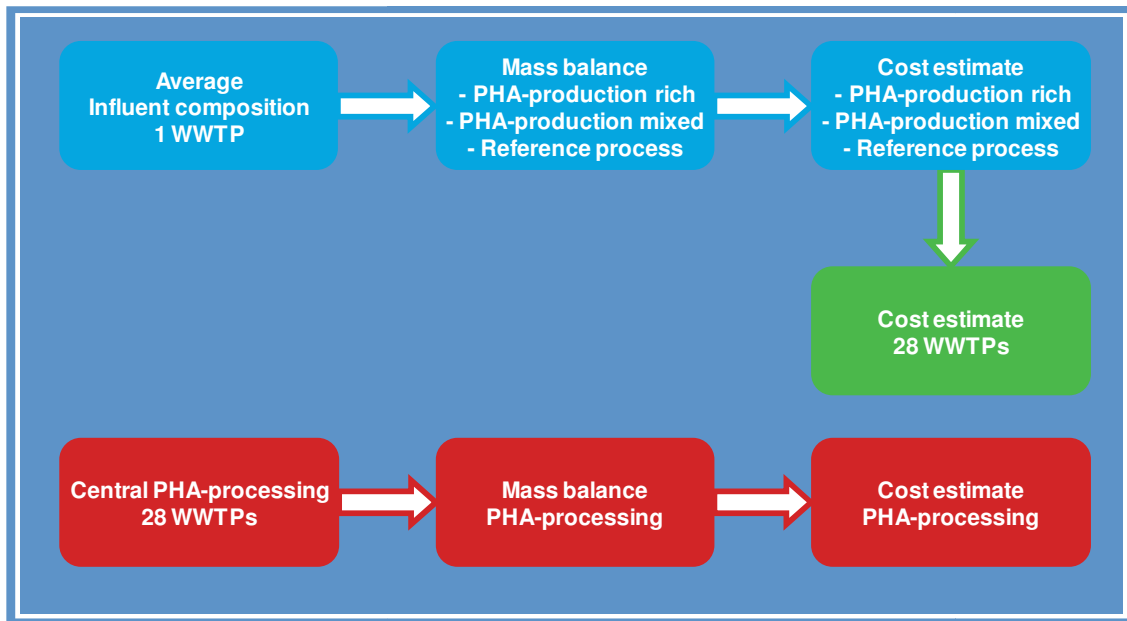
Only primary sludge is used as a carbon source for the two selected PHA-production routes. The outcome of this study is therefore very specific to this case study (more details can be found in the section 'discussion').

#### **SCOPE OF THIS PRELIMINARY ASSESSMENT STUDY**

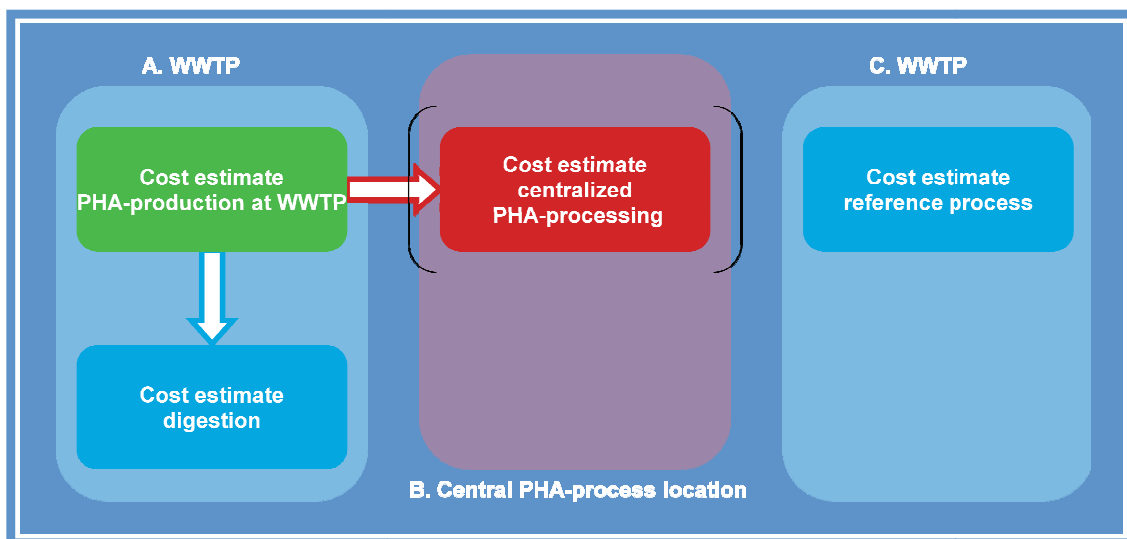
Up to now, commercial PHA is produced under sterile conditions with a specific bacterial culture (mono-culture). The carbon sources used for fermentation are food-related glucose, starch or vegetable oil. PHA-production from waste streams (sewage sludge specifically) is the alternative to the conventional PHA-production route. For that reason following two alternative PHA-production routes were investigated, with sewage sludge as a crude material:

- **the 'rich culture' route;** a bacterial culture in which all organisms are able to store PHA. However, the biomass consists of several bacteria species (different from the conventional PHA-production process). This rich culture is obtained and maintained by continuous selection. This selection pressure excludes the need for sterile processing, while the culture remains consisting of PHA-accumulating micro-organisms.
- **The 'mixed culture' route;** a bacterial culture in which part of the micro-organisms are able to store PHA. Secondary sewage sludge from a municipal WWTP is an example of a mixed culture.

After PHA production, PHA processing is required to obtain a product that can be used for the production of bioplastics.



The process design of the two selected PHA-production routes, is based on a case study design of 28 fictitious 'PHA-from-sludge' production facilities with a total capacity of 10 million population equivalents (p.e). This 10 million p.e. corresponds with approximately 50% of the treatment capacity in the Netherlands (total of about 24 million p.e.), assuming that 50% of the Dutch sewage treatment plants is equipped with digestion facilities. Since primary settling tanks are present at these locations, primary sludge can be provided for PHA-production. This case study thus presents the Dutch potential of PHA-production from sludge. The methodology for cost estimation is visualized below.



The following three processes are considered in this study:

- PHA-production by the rich culture route
- PHA-production by the mixed culture route
- Reference process: biogas production by sludge digestion



The cost estimate of the PHA-production routes consists of following items:

- PHA-production
- Sludge digestion
- Centralized PHA-processing

The costs for the centralized PHA-processing are included in the calculations of the cost-effective indicative selling price of PHA as a feedstock for bio-plastics. This methodology is visualized below (Box A +B). The cost for the centralized PHA-processing are left out in the calculation of the cost-effective indicative selling price of PHA-rich biomass leaving the WWTP to the central PHA-processing location (Box A). The indicative cost-effective selling price is calculated in relation to the reference process (Box C).

The following situations were chosen as a starting point for the cost estimate:

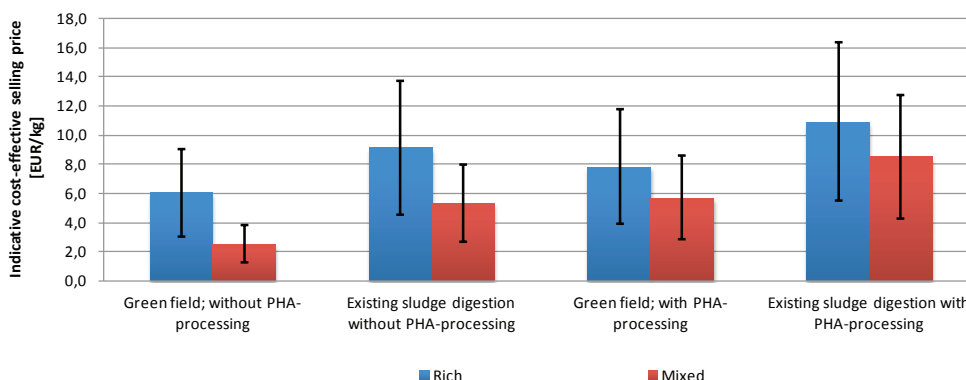
- **The 'green field' alternative**, this assumes complete construction of the PHA-production facility and the associated sludge digestion line, which turns the remaining organic material into biogas and dewatered sludge. Biogas production by digestion is used as the reference process. The difference in annual costs between the PHA-production process and the reference process is divided by the annually produced kilos PHA, which provides the indicative cost-effective selling price of PHA in EUR/kg PHA.
- **The alternative with an existing sludge digestion line**; this assumes full construction of the PHA-production facility, the existing sludge digestion remains intact. Since, in the case of PHA-production, less sludge is fed into the digester, the existing digester will have spare capacity in the new situation. The annual costs of the PHA-production process are divided by the annually produced kilos PHA, which provides the indicative cost-effective selling price of PHA in EUR/kg PHA.

## OUTCOMES

The results are presented in figure 1.2 for each alternative (rich and mixed), situation (green field and sludge processing by existing fermentation) and sub-alternative (with and without PHA-processing, resulting in pure and crude product respectively). The mass balance shows an annually PHA-production of 2,940 tons using the rich culture route and 5,240 tons using the mixed culture route.

FIGURE 1.2

INDICATIVE COST-EFFECTIVE PRICE OF PHA (RICH EN MIXED ROUTE; RAW EN PURE PRODUCT)



The mixed culture route is economically more feasible than the rich culture route (with the chosen assumptions, based on current knowledge) according to this study. However, it is not ruled out that the rich culture route has the preference in other circumstances and with a different reference situation. Despite the mixed culture route for this case is most favourable,

PHA-production in this way is currently not economically feasible. It should be noted that the local situation will affect the viability of PHA-production. Available equipment or buildings, or the possibility to buy cheaper VFAs are examples of factors which positively influence the feasibility for a specific location. This statement is confirmed by the additional case for WWTP Bath; purchasing fatty acids and the benefits of scale result in an indicative cost-effective selling price of EUR 2.5 PHA-rich biomass (without PH-processing, crude product).

## SUMMARY

- Current market price: EUR 4,- up to more than EUR 5,- per kg PHA.
- Desired market price: about EUR 3,- per kg PHA.
- Accuracy of the indicative cost-effective selling price:  $\pm 50\%$

Indicative cost-effective selling price:

<b>without PHA-processing (crude)</b>	<b>Rich (EUR/kg)</b>	<b>Mixed (EUR/kg)</b>
Green field	6,0	2,5
Existing sludge digestion	9,1	5,3
<b>with PHA-processing (pure)</b>		
Green field	7,9	5,7
Existing sludge digestion	11,0	8,5
<b>WWTP Bath including externally sourced VFAs, without PHA-processing</b>		
Existing sludge digestion	-	2,5

It should be noted that some assumptions in this study are based on current theoretical knowledge. Most of them have not yet been tested in practice. Furthermore the choice of the PHA-processing procedure will influence the outcome of the study. The PHA-processing procedure for this study is based on a method with pre-treatment using NaCl, a treatment with NaOH and a post-treatment with 20% ethanol. It is not exactly known if this technique is applicable for this specific product (PHA-rich cell material derived from a municipal WWTP) and type of biopolymer. It is also unknown whether the performance from the literature corresponds with practical performance. In addition, a lot of wastewater is produced by using this PHA-processing method. Ethanol is not reused in this case study. Furthermore, applying bio-refinery to the non-PHA material is not possible after using this processing technique, since the remaining biomass is mainly dissolved in process water (and turned into waste). Due to gaps in current knowledge of PHA-processing (process from crude material to pure product) the process used in this case study is possibly not applicable for full scale installations. For this reason the indicative cost-effective selling price without PHA-processing is also given in this study.

The effects on the municipal WWTP are relatively small when PHA-processing is performed at a centralized location. The biogas production is reduced (by approximately 25-30%) since VFAs are produced from primary sludge and secondary sludge (only in case of mixed culture; approximately 15%), furthermore a relatively small wastewater stream will be produced (<1% of influent).

A relatively large waste stream is produced at the centralized PHA-processing facility. It mainly consists of dissolved COD, NaCl and NaOH. The centralized PHA-processing as used in this study results in a waste stream equal to 45,000 p.e. for the rich route and 262,000 p.e. for the mixed culture route. It should be noted that this waste stream is specifically related to the selected PHA-processing method.

**CONCLUSION:**

- technically feasible;
- at this moment economically not feasible;
- relatively small influence on WWTP-operation.

**VISION**

This set-up of this study is mainly technology-driven, which means that the economic viability is calculated with potentially techniques as starting point. The indicative cost-effective selling price is compared to the desired market price. The relationship between quality, functionality and the fair market price is disregarded in this exploratory study. This specific aspect requires further research outside the scope of this survey.

Knowing this, it must be noted that the requirements of the user (client/consumer) must be kept in mind. Only in this way, it becomes possible to produce every product with the right quality and associated price (sales price for PHA).

Further research is needed, and fits well within the periods as presented in the roadmap ('Routekaart afvalwaterketen tot 2030'). It is advised to carry out further research, including a market-driven research in which:

- The requirements of the users should be identified for a particular (group of) application(s).
- The PHA-production should be further developed using the backward integration approach, taking into account the desired quality of the product.

Backward integration means that the PHA-processing and PHA-production methods should be selected basis on pre-established (quality) requirements. Involving the entire chain of stakeholders is an opportunity to create finally a win-win situation for each stakeholder and a product whose quality and price are aligned.

**RECOMMENDATIONS**

This preliminary assessment provides an indication regarding the economic feasibility and shows that the mixed culture route has the highest potential, based on this specific case. However, based on current knowledge this production route is economically not feasible.

As shown by this study, there are various possibilities to achieve optimizations. It is therefore recommended to conduct further market-driven research up to 2015 on:

- maximizing the VFA-production from sludge;
- producing VFA from other organic waste streams;
- increasing the PHA-storage capacity of the biomass;
- development of a suitable PHA-processing method based on price, yield, purity, waste streams and reuse of residuals;
- quality and uniformity of the obtained PHA.

Since the conclusion of this study is mainly based on cost and not on sustainability, it is also recommended to compare the optimized PHA-production and processing route with the digestion process on sustainability by performing a life cycle analysis (LCA). The period 2015 to 2020 could be used to start-up a demonstration installation, fully in line with the schedule as presented in the roadmap.

# STOWA IN SHORT

STOWA (Foundation for Applied Water Research) is the knowledge centre of the regional water managers (mostly the Water Boards) in the Netherlands. Its mission is to develop, collect, distribute and implement applied knowledge, which the water managers need in order to adequately carry out the tasks that their work supports. This expertise can cover applied technical, scientific, administrative-legal or social science fields.

STOWA is a highly demand-driven operation. We carefully take stock of the knowledge requirements of the Water Boards and ensure that these are placed with the correct knowledge providers. The initiative for this mainly lies with the users of this knowledge, the water managers, but sometimes also with knowledge institutes and business and industry. This two-way flow of knowledge promotes modernisation and innovation.

Demand-driven operation also means that we are constantly looking for the 'knowledge requirements of tomorrow' – requirements that we dearly want to put on the agenda before they become an issue – in order to ensure that we are optimally prepared for the future.

We ease the burden of the water managers by assuming the tasks of placing the invitation to tender and supervising the joint knowledge projects. STOWA ensures that water managers remain linked to these projects and also retain 'ownership' of them. In this way, we make sure that the correct knowledge requirements are met. The projects are supervised by committees, which also comprise regional water managers. The broad research lines are spread out per field of practice and accounted for by special programme committees. The water managers also have representatives on these committees.

STOWA is not only a link between the users of knowledge and knowledge providers, but also between the regional water managers. The collaboration of the water managers within STOWA ensures they are jointly responsible for the programming, that they set the course, that several Water Boards are involved with one and the same project and that the results quickly benefit all Water Boards.

STOWA's fundamental principles are set out in our mission:

*Defining the knowledge needs in the field of water management and developing, collecting, making available, sharing, strengthening and implementing the required knowledge or arranging for this together with regional water managers.*

# BIOPLASTIC UIT SLIB

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	AFKORTINGENLIJST	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
	SUMMARY	
	STOWA IN BRIEF	
<b>1</b>	<b>INTRODUCTIE</b>	<b>1</b>
	1.1 Aanleiding	1
	1.2 Doelstelling	1
	1.3 Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>ACHTERGROND BIOPLASTIC</b>	<b>3</b>
	2.1 Inleiding	3
	2.2 Bioplastic, terminologie	3
	2.3 Het biopolymeer Polyhydroxyalkanoaat	3
	2.4 Certificering van bioplastic	4
	2.5 PHA-opslagmechanismen	5
	2.6 PHA-productieroutes	8
	2.6.1 Selectie PHA-accumulerende micro-organismen	8
	2.6.2 Productieroutes	9
<b>3</b>	<b>PHA-MARKT</b>	<b>11</b>
	3.1 Inleiding	11
	3.2 Huidige markt	11
	3.2.1 Wereldwijd	11
	3.2.2 Nederland	12
	3.3 Verwachte markt	13
	3.4 Huidige marktprijs versus gewenste marktprijs	14
	3.5 Toepassingsmogelijkheden van bioplastics, toegespitst op PHA	16
	3.5.1 Consumentenproducten	17
	3.5.2 Farmaceutische & medische producten	17
	3.5.3 Land- en tuinbouw	17
	3.5.4 Catering	18
	3.5.5 Verpakkingsmaterialen	18
	3.5.6 Overige toepassingen	18

<b>4</b>	<b>PROCESSEN EN TECHNIEKEN</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	Inleiding	19
<b>4.2</b>	Onderzoek naar PHA-productie en Pilot studies	19
4.2.1	CellaTM-proces	19
4.2.2	TU Delft proces	20
<b>4.3</b>	Benodigde technieken voor geselecteerde PHA-productieprocessen	21
4.3.1	VFA-fermentatie	21
4.3.2	Selectieproces micro-organismen	22
4.3.3	PHA-productieproces	22
4.3.4	PHA-opwerkingsproces	24
4.3.5	Biogasproductie	25
<b>4.4</b>	Uitgangspunten	25
<b>4.5</b>	Invloed op rwzi en milieu	27
4.5.1	Rich Culture	27
4.5.2	Mixed culture	29
4.5.3	Duurzaamheid	30
<b>5</b>	<b>ECONOMISCHE HAALBAALHEID</b>	<b>32</b>
<b>5.1</b>	Introductie	32
<b>5.2</b>	Economische analyse	33
5.2.1	Jaarlijkse kosten	33
5.2.2	Jaarlijkse kosten PHA-productie, groene weide	36
5.2.3	Jaarlijkse kosten PHA-productie, bestaande slibverwerking door vergisting	38
5.2.4	Gevoeligheidsanalyse van het PHA-productieproces op basis van de kostenverdeling per deelproces	39
5.2.5	Optimalisatiemogelijkheden	41
<b>5.3</b>	Economische analyse; rwzi Bath	43
5.3.1	Waterschap Brabantse Delta; Rwzi Bath	43
5.3.2	Rwzi Bath; inkopen van koolstofbron	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSIES, VISIE EN AANBEVELINGEN</b>	<b>46</b>
<b>6.1</b>	Conclusies	46
<b>6.2</b>	Visie	48
<b>6.3</b>	Aanbevelingen	50
<b>7</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>52</b>
	<b>BIJLAGEN</b>	
bijlage 1	schematische weergave van de twee pha-productieroutes, de pha-opwerkingsmethode en het referentieproces	55
bijlage 2	overzicht pha-opwerkingsmethoden	60
bijlage 3	verantwoording procesontwerp	62
bijlage 4	influentamenstelling	65
bijlage 5	Massabalans	66
bijlage 6	warmtebalans	72
bijlage 7	Additionele informatie kostenraming	75
bijlage 8	Uitgangspunten Kostenraming economische haalbaarheid	78
bijlage 9	Detail overzicht opbouw jaarlijksekosten	81

# 1

## INTRODUCTIE

### 1.1 AANLEIDING

Jaarlijks wordt wereldwijd circa 280 miljoen ton plastic geproduceerd [1]. Vooral voor plastic producten met een korte levenscyclus is het interessant om biologisch afbreekbare plastics te gebruiken. Op dit moment al worden bioplastics gebruikt voor een groeiend aantal markten, variërend van verpakking tot elektronica. De groeiende vraag naar duurzame oplossingen en de ontwikkeling van steeds weer nieuwe materialen is een stimulans voor de gehele bioplasticmarkt. Een voorbeeld van een grondstof voor een volledig biologisch afbreekbaar plastic is polyhydroxyalkanoaat (PHA).

De kosten voor conventionele full-scale microbiologische productie van PHA worden voor ongeveer 40% bepaald door de benodigde grondstoffen. Deze grondstoffen zijn onder andere een koolstofbron (glucose, zetmeel of plantaardige olie) en nutriënten. De kosten van de koolstofbron zijn ongeveer 70% van dit percentage [2]. Kostenreductie met betrekking tot de microbiologische PHA-productie kan worden bereikt door procesoptimalisatie. Optimalisatie van microbiologische PHA-productie is mogelijk door het gebruik van efficiëntere micro-organismen of het toepassen van goedkopere grondstoffen. Om deze laatste reden is PHA-productie uit (primaire) zuiveringsslib interessant omdat dit slib, na bewerking, ingezet kan worden als goedkope koolstofbron.

PHA-productie uit zuiveringsslib is genoemd als één van de verwaardingsroutes in het visiedocument 'Routekaart afvalwaterketen tot 2030' [3]. Dit visiedocument, gepubliceerd in mei 2012, beschrijft afvalwater als een bron van nutriënten, energie en schoon water. Op verzoek van het transitieteam grondstoffen, werkgroep bioplastics, is daarom een verkenning uitgevoerd naar de haalbaarheid van PHA-productie uit zuiveringsslib voor alle waterschappen in Nederland.

### 1.2 DOELSTELLING

Deze verkenning heeft tot doel om de technische en economische potentie van de productie van PHA uit zuiveringsslib voor de waterschappen in Nederland in kaart te brengen. Het gaat hierbij expliciet om de actuele haalbaarheid met de huidige inzichten. Daarnaast wordt kort ingegaan op de toekomstvisie en wordt de invloed van mogelijke optimalisatieslagen geschetst. De volgende onderwerpen komen hierbij aan bod:

- de basiskennis over PHA-productie;
- de PHA-markt in de wereld en in Nederland inclusief toepassingsmogelijkheden;
- een verkenning van de technische en economische haalbaarheid van twee geselecteerde PHA-productieroutes, inclusief het effect van het PHA-productieproces op het functioneren van een rioolwaterzuiveringinstallatie.

### **DOEL VAN DEZE STUDIE:**

Verkenning naar de technische en economische haalbaarheid van PHA-productie uit zuiveringsslib.

### **AFBAKENING VAN DEZE STUDIE**

Het gaat in deze verkennende studie voornamelijk om een indicatie van de technische en economische haalbaarheid. Het betreft de specifieke haalbaarheid van twee geselecteerde PHA-productieroutes op basis van huidige inzichten.

Een analyse van duurzaamheidsaspecten valt buiten de scope van deze studie maar kan inzicht verschaffen in de duurzaamheid van PHA-productie ten opzichte van de referentiesituatie.

De indicatieve kostendeckende verkoopprijzen in EUR per kilogram PHA, zoals berekend in deze studie, hebben een nauwkeurigheid van circa 50 %.

De twee geselecteerde routes voor PHA-productie gaan uit van alleen primair slib als koolstofbron; hierdoor is de uitkomst van deze studie zeer specifiek voor de uitgewerkte cases. In de discussie, weergegeven aan het eind van dit rapport, wordt in detail ingegaan op aanvullende begrenzing van deze studie.

### **1.3 LEESWIJZER**

In hoofdstuk 2 komt de achtergrond aan bod met betrekking tot bioplastics, in het bijzonder de onderwerpen 'het biopolymeer PHA', 'het PHA-opslagmechanisme' en 'de twee geselecteerde kansrijke PHA-productieroutes'. Hoofdstuk 3 behandelt de PHA-markt, waarbij ingegaan wordt op de huidige markt, de verwachte markt, de relatie omvang, prijs en kwaliteit en de toepassingsmogelijkheden. In hoofdstuk 4 komen de processen en technieken aan bod met betrekking tot PHA-productie uit zuiveringsslib en wordt de invloed van dit proces op de rwzi en het milieu besproken. In hoofdstuk 5 is de economische haalbaarheid beschreven. Hoofdstuk 6 geeft de conclusies, visie en de aanbevelingen weer.



# 2

## ACHTERGROND BIOPLASTIC

### 2.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk komt de achtergrondinformatie aan de orde met betrekking tot de productie van bioplastic uit zuiveringsslib. Als eerste wordt beschreven wat plastic een bioplastic maakt. Vervolgens wordt ingegaan op het specifiek bioplastic Polyhydroxyalkanoaat (PHA), wordt PHA vergeleken met het biopolymeer polylactic acid (PLA) en wordt aandacht besteed aan de certificering van bioplastic. Daarnaast wordt het PHA-opslagmechanisme uitgelegd aan de hand van de anaerobe en aerobe procesvoering in de aeratietank op een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi). Als laatste wordt ingegaan op twee geselecteerde productieroutes; de 'mixed' en de 'rich' culture route, inclusief de selectiemethoden voor het verkrijgen van biomassa die in staat is om zoveel mogelijk PHA op te slaan.

### 2.2 BIOPLASTIC, TERMINOLOGIE

Bioplastic is een term die wordt gebruikt voor biologisch afbreekbare plastics en/of hernieuwbare plastics. Plastics vervaardigd uit hernieuwbare bronnen kunnen wel geschaard worden onder de naam 'bioplastics' maar zijn dus niet per definitie biologisch afbreekbaar.

Een plastic is biologisch afbreekbaar of biodegradeerbaar wanneer het door micro-organismen (bacteriën of schimmels) afgebroken kan worden tot water en kooldioxide. De biologische afbreekbaarheid hangt mede af van de chemische structuur. Polymeren als polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP) bevatten alleen koolstof en waterstof en kunnen niet door bacteriën of schimmels worden afgebroken.

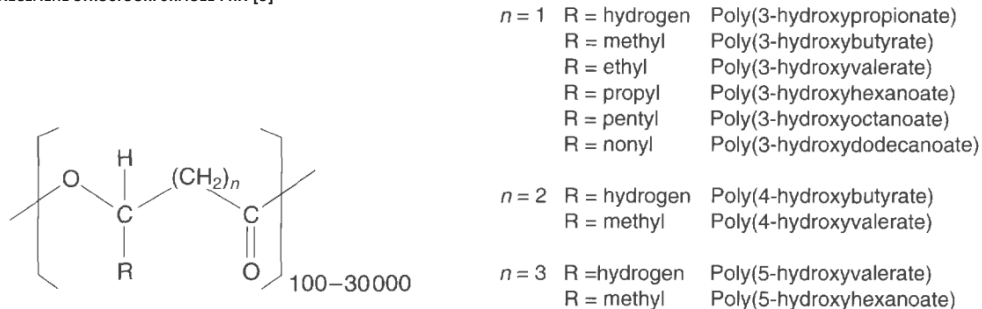
Composteerbaar plastic is plastic dat in industriële composteringsinstallaties (onder gecontroleerde omstandigheden) voldoende snel afbreekt. De norm EN13432 definieert de snelheid en mate van de biologische afbreekbaarheid waaraan een composteerbaar plastic moet voldoen [4].

### 2.3 HET BIOPOLYMEER POLYHYDROXYALKANOAAAT

Polyhydroxyalkanoaat (PHA), is een biologisch afbreekbaar polymeer (lineaire polyester) en wordt door organismen geproduceerd met een koolstofbron (zetmeel, glucose of plantaardige olie) als substraat. De conventionele productiemethode maakt gebruik van één bepaald micro-organisme (monocultuur) dat onder steriele omstandigheden wordt opgekweekt, waarna gestuurd wordt op maximale PHA-opslag. Tijdens de PHA-productie wordt de koolstofbron onder de juiste condities en door middel van verschillende tussenstappen aan elkaar gekoppeld tot een biopolymeer. Deze PHA's worden vervolgens opgeslagen in intracellulaire compartimenten. Het type koolstofbron (bijvoorbeeld het type vluchtige vetzuur (VFA)) dat wordt toegediend aan de PHA-fermentatie heeft invloed op het type biopolymeer dat uiteindelijk gevormd wordt. In afbeelding 2.1 is de algemene structuurformule van PHA

weergegeven met daarbij een aantal mogelijke variaties in structuur als gevolg van variatie in bijvoorbeeld de VFA-samenstelling.

AFBEELDING 2.1 ALGEMENE STRUCTUURFORMULE PHA [5]



Wanneer PHA als grondstof voor plastic wordt toegepast ontstaan biologisch afbreekbare plasticproducten. Omdat al meer dan 130 monomeren geïdentificeerd zijn uit vele soorten PHA's, is de productie van polymeren met uiteenlopende eigenschappen (broosheid, flexibiliteit en elasticiteit) mogelijk. Dit is een groot voordeel ten opzichte van het biologisch afbreekbare biopolymeer polylactic acid (PLA), dat bestaat uit slechts twee monomeren (D-lactaat en L-lactaat). PLA is dus een biopolymeer dat bestaat uit melkzuur monomeren, welke voornamelijk vervaardigd worden door fermentatie van maïszetmeel. Op dit moment wordt dit type bioplastic vooral ingezet in verpakkingsmateriaal en textielvezels. Minder gunstige eigenschappen van PLA zijn de lage smeltsterkte en de broosheid van het materiaal. In tabel 2.1 zijn enkele overeenkomsten en verschillen met betrekking tot PLA en PHA weergegeven.

TABEL 2.1 VERGELIJKING VAN PLA EN PHA [4]

	PLA	PHA
Grondstof	glucose/zetmeel	glucose/zetmeel/plantaardige olie/VFA
Afbreekbaarheid	composteerbaar	biodegradeerbaar
Eigenschappen	stijf, transparant en glossy	koolstofbron afhankelijk

## 2.4 CERTIFICERING VAN BIOPLASTIC

Het belangrijkste kenmerk van PHA's is de mogelijkheid tot biologische afbraak, ook onder niet-composteringsomstandigheden. De termen biologisch afbreekbaar en composteerbaar worden vaak verward. Momenteel worden vier labels toegepast die de biologische afbreekbaar van een product aanduiden, het betreft de labels [6]:

- OK compost (composteerbaar onder industriële condities, 55-60 °C);
- OK compost HOME (composteerbaar in composteervat);
- OK compost SOIL (biologisch afbreekbaar in de grond);
- OK compost WATER (biologisch afbreekbaar in water).

Producttoetsing vindt plaats volgens de norm EN13432. Puur PHA is in principe composteerbaar onder mildere condities vergeleken met PLA (PLA kan gecertificeerd worden als OK compost) en daarom biodegradeerbaar in de grond en in water (PHA kan gecertificeerd worden als OK compost HOME/SOIL/WATER). Hierbij moet worden opgemerkt dat ook de productomvang een rol speelt, dikkere materialen resulteren in een verminderde composteerbaarheid vergeleken met dunne materialen.

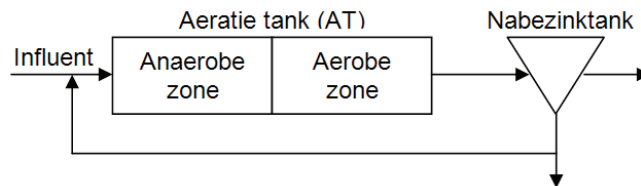
Daarnaast is er certificering voor biobased producten. Een bioplastic mag pas biobased genoemd worden als minimaal 20 % van het product bestaat uit een koolstofbron welke hernieuwbaar is. Hernieuwbaar wil zeggen dat de koolstofbron aangevuld kan worden ten opzichte van het verbruik van de bron [7].

## 2.5 PHA-OPSLAGMECHANISMEN

Een van de groepen organismen die van nature in staat zijn tot PHA-accumulatie zijn de fosfaataccumulerende organismen (PAO's). Deze organismen komen ook voor in het actief-slibproces van een rwzi, wanneer fosfaat biologisch wordt verwijderd middels het bio-P-proces in de aeratie tank (AT). Aan de hand van deze groep organismen wordt het PHA-opslagmechanisme besproken.

In het biologisch fosfaatverwijderingsproces (afbeelding 2.2), wordt extra fosfaat opgenomen door PAO's. Het fosfaat wordt intracellulair opgeslagen in de vorm van poly-fosfaat. Indien nodig kan poly-fosfaat (poly-P) als energiebron worden gebruikt door afbraak tot ortho-fosfaat, ortho-fosfaat wordt hierbij uitgescheiden [8].

AFBEELDING 2.2 BIOLOGISCHE FOSFAATVERWIJDERING IN AT



Het communale afvalwater komt (meestal via een vuilrooster en voorbezinktank) binnen in de AT. In de anaerobe zone wordt het organisch materiaal afgebroken en wordt fosfaat uitgescheiden door PAO's. Het fosfaatrijke water stroomt door naar de aerobe zone waar het fosfaat door de PAO's wordt opgeslagen.

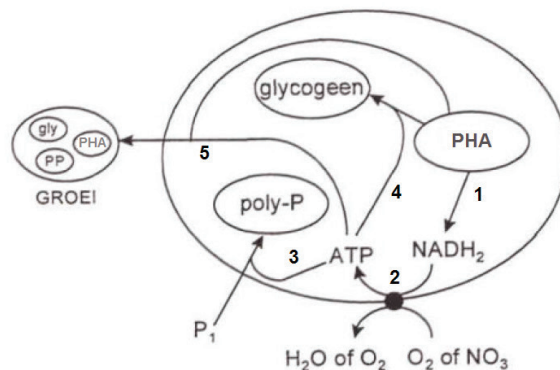
De werking van de PAO's in de aerobe zone verloopt als volgt (zie afbeelding 2.3).

### ZUURSTOFRIJKE (AEROBE) ZONE:

PHA, opgeslagen in de zuurstofarme zone, wordt afgebroken. Deze afbraak resulteert in energiegeneratie (ATP). ATP wordt gebruikt voor:

- fosfaat opname uit het afvalwater om vervolgens op te slaan als poly-fosfaat;
- glycogeenopslag;
- celgroei.

AFBEELDING 2.3 DE WERKING VAN PAO'S IN DE AEROBE ZONE [9]



- 1 het in de anaerobe zone opgeslagen PHA wordt afgebroken, waarbij Nicotinamide Adenine Dinucleotide ( $\text{NADH}_2$ ) vrij komt;
- 2 uit  $\text{NADH}_2$  wordt door middel van de elektronentransportketen (oxidatieve fosforylatie) Adenosine TriPhosphate (ATP) geproduceerd. Daarnaast wordt (onder aerobe condities) ATP geproduceerd door middel van de citroenzuurcyclus;
- 3 met de energie uit ATP wordt fosfaat uit het water opgenomen en opgeslagen als poly-P;
- 4 daarnaast worden de afbraakproducten van PHA gebruikt om, samen met de energie uit ATP, glycogeen op te bouwen;
- 5 verder worden de afbraakproducten van PHA in combinatie met de energie uit ATP ingezet voor de groei van micro-organismen.

Na de aerobe zone stroomt het water verder naar de nabezinktank, hier bezinkt het actieve slib (voornamelijk micro-organismen). Een deel van de slibstroom wordt afgevoerd (surplus-slib); het overige deel wordt teruggevoerd in de AT.

De werking van de PAO's in de anaerobe zone is als volgt (afbeelding 2.4):

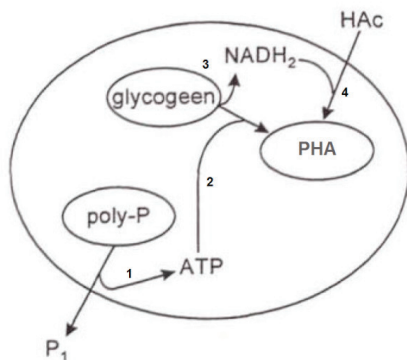
#### ZUURSTOFARME (ANAEROBE) ZONE:

Poly-fosfaat, opgeslagen in de zuurstofrijke zone, wordt afgebroken. Deze afbraak resulteert in energiegeneratie (ATP). ATP wordt gebruikt voor:

- PHA-productie uit de aanwezige koolstofbron.

Daarnaast wordt glycogeen afgebroken, de afbraakproducten en de hierbij vrijgekomen energie worden ook gebruikt in de PHA-productie.

AFBEELDING 2.4 DE WERKING VAN DE PAO'S IN DE ANAEROBE ZONE [9]



- 1 poly-P wordt afgesplitst waarbij ATP wordt gegenereerd en ortho-fosfaat wordt uitgescheiden;
- 2 uit de afbraakproducten van glycogeen wordt PHA geproduceerd, waarbij de benodigde energie afkomstig is van het gegenereerde ATP (uit poly-P- en glycogeen afbraak);
- 3 bij de afbraak van glycogeen komt tevens  $\text{NADH}_2$  vrij, dat in stap 4 als reducerend vermogen fungeert;
- 4 met  $\text{NADH}_2$  als reducerend vermogen en een koolstofbron (HAc; acetaat) wordt PHA geproduceerd.

Tijdens een geoptimaliseerd PHA-fermentatieproces komen de organismen die in staat zijn tot intracellulaire PHA-opslag (onder andere fosfaat accumulerende organismen) in aanraking met een koolstofbron (lagere vetzuren, bijv. acetaat) én zuurstof. Omdat zowel zuurstof

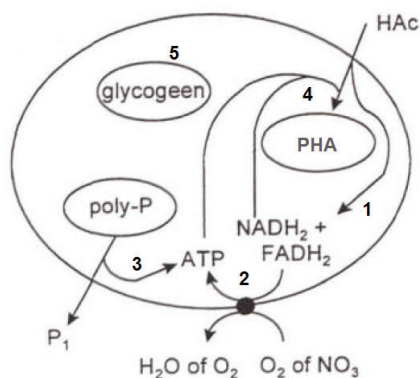
als een koolstofbron beschikbaar is zullen de organismen geen PHA afbreken, zoals beschreven onder 'de werking van de PAO's in de aerobe zone' maar juist opslaan. Intracellulaire PHA-opslag verloopt als volgt (afbeelding 2.5):

#### ZUURSTOFRIJKE (AEROBE) ZONE MET KOOLSTOFBRON (ACETAAT):

Poly-fosfaat, opgeslagen in de aerobe zone, wordt afgebroken. Deze afbraak resulteert in energiegeneratie (ATP). Daarnaast wordt energie voor een deel gegenereerd uit de verbranding van acetaat en vervangt de rol van glycogeen. ATP wordt gebruikt voor:

- PHA-productie uit de aanwezige koolstofbron.

AFBEELDING 2.5 DE WERKING VAN DE PAO'S IN DE BIJZONDERE SITUATIE [9]



- 1 metabolisatie van de koolstofbron (Hac; azijnzuur) levert het reducerend vermogen (dit vindt niet meer plaats vanuit de afbraak van glycogeen);
- 2  $\text{NADH}_2$  en/of  $\text{FADH}_2$  wordt daarnaast door middel van het elektronentransportsysteem in het celmembraan omgezet tot ATP. Daarnaast wordt (onder aerobe condities) door middel van de citroenzuurcyclus ATP geproduceerd;
- 3 poly-P wordt afgesplitst waarbij ATP wordt gegenereerd en ortho-fosfaat wordt afgescheiden;
- 4 PHA wordt geproduceerd uit een koolstofbron (HAc), met energie uit ATP en  $\text{NADH}_2$ ;
- 5 glycogeen heeft geen functie in dit proces.

In een waterzuiveringsproces met biologische fosfaatverwijdering is er in de aerobe-/anoxische zone normaal geen koolstofbron meer aanwezig, waardoor opslag van PHA in deze zone niet voorkomt. De koolstofbron is al grotendeels opgenomen in de anaerobe fase [9].

In bovenstaand voorbeeld is uitgegaan van acetaat (C2) als koolstofbron. Ook andere vluchtige vetzuren als propionaat (C3), butyraat (C4) en valeraat (C5) kunnen worden opgenomen en daarbij dienen als koolstofbron. De verschillende monomeren resulteren in verschillende samenstellingen van het biopolymeer (zie ook afbeelding 2.1). Tabel 2.1 geeft de mogelijke vormen van PHA weer met betrekking tot de monomeren acetaat en propionaat.

TABEL 2.2 OMZETTING VAN VFA NAAR PHA [10]

acetaat	+	acetaat	→	poly-3-hydroxybutyraat (P(3HB))
propionaat	+	propionaat	→	poly-3-hydroxy-2-methylvaleraat (P(3H2MV))
acetaat	+	propionaat	→	poly-3-hydroxyvaleraat (P(3HV)) + poly-3-hydroxy-2-methylbutyraat (P(3H2MB))

## 2.6 PHA-PRODUCTIEROUTES

In voorgaande paragrafen is het mechanisme achter PHA-opslag uitgewerkt. Hieruit blijkt dat PHA-opslag zowel onder anaerobe condities (zoals plaatsvindt op een rwzi) als onder aerobe condities plaats kan vinden (dit vindt niet plaats op een rwzi, omdat in de aerobe zone relatief weinig koolstofbron aanwezig is). De PHA-opslag onder aerobe condities in de aanwezigheid van een koolstofbron, is gunstiger vergeleken bij PHA-opslag onder anaerobe condities. Dit is verklaarbaar doordat een deel van het substraat onder aerobe condities kan voorzien in extra energie voor PHA-opslag [10]. De PHA-productieprocessen, zoals in deze paragraaf worden beschreven, gaan om die reden uit van PHA-opslag onder aerobe condities.

### 2.6.1 SELECTIE PHA-ACCUMULERENDE MICRO-ORGANISMEN

Een rijke cultuur aan organismen die PHA op kunnen slaan, kan verkregen worden door onder andere een anaerobe-aerobe methode of het 'Feast and Famine principle'.

#### ANAEROBE-AEROBE METHODE

Onder zuurstofrijke (aerobe) condities zijn micro-organismen in staat om een koolstofbron te gebruiken als energievoorziening. Onder zuurstofarme (anaerobe) condities is dit niet voor alle micro-organismen mogelijk. Omdat bepaalde PHA-accumulerende organismen een energiereserve aanleggen tijdens zuurstofrijke condities (Polyfosfaat of Glycogeen), kan de koolstofbron ook onder anaerobe condities worden opgenomen. Dit levert een voordeel op ten opzicht van organismen die niet over deze energiebron beschikken en dus onder anaerobe condities geen koolstofbron op kunnen nemen. Door zuurstofrijke en zuurstofarme condities af te wisselen vindt selectie van PHA-accumulerende organismen plaats.

Er zijn twee soorten micro-organismen welke van nature voorkomen op een rwzi en die, naast PHA-productie, onder aerobe condities in staat zijn tot intracellulaire poly-P of glycogeen opslag. Deze organismen zijn respectievelijk PAO's en GAO's (glycogeen accumulerende organismen). PAO's en GAO's hebben een competitief voordeel tijdens anaerobe condities ten opzichte van overige organismen. De reden hiervoor is dat de opgeslagen energie in de vorm van poly-P of glycogeen (dat via de glycolyse kan voorzien in energie) onder deze condities vrijgemaakt kan worden. Het gebruik van deze energiebron levert deze organismen onder anaerobe condities een competitief voordeel op ten opzicht van organismen die niet over deze energiebron beschikken [10].

#### FEAST AND FAMINE PRINCIPLE

In de feestmaal fase (feast fase) wordt de koolstofbron en zuurstof toegediend en geconsumeerd. Wanneer de koolstofbron op is, start de honger fase (famine fase). Omdat PHA-accumulerende organismen in staat zijn om de koolstofbron zeer snel op te nemen en om te zetten in PHA ontstaat een competitief voordeel ten opzichte van overige organismen. Door feest- en honger fase af te wisselen vindt selectie van PHA-accumulerende organismen plaats.

In het 'feast and famine' proces worden de organismen geselecteerd door perioden van aan- en afwezigheid van een koolstofbron. Tijdens de feast-fase is een koolstofbron beschikbaar en wordt PHA opgeslagen. Tijdens de famine-fase is geen koolstofbron beschikbaar en wordt PHA afgebroken. De energie die hierbij vrijkomt wordt gebruikt voor bijvoorbeeld groei. De organismen die PHA's kunnen produceren zijn in staat om zeer snel een koolstofbron op te nemen. Op deze manier wordt de competitie aangegaan met overige organismen [10].

## 2.6.2 PRODUCTIEROUTES

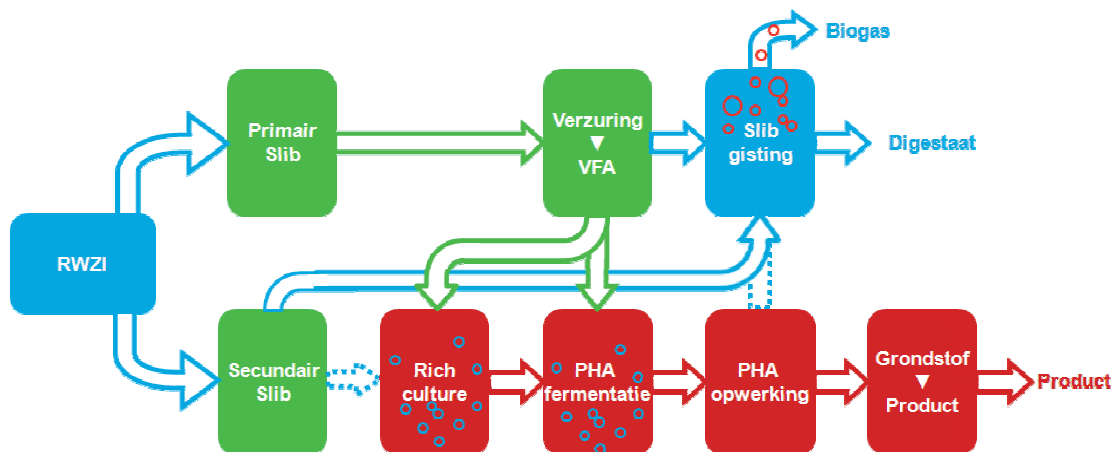
In het kader van deze verkenning zijn twee PHA-productieroutes uit zuiveringsslib geselecteerd, namelijk; PHA-productie middels een 'rich culture' en een 'mixed culture'.

### RICH CULTURE

Met de term 'rich culture' wordt een bacteriecultuur aangeduid waarin alle organismen in staat zijn om PHA op te slaan. De biomassa bestaat echter niet uit één bacteriesoort zoals bij conventionele PHA-productiemethoden. Deze cultuur is tot stand gekomen en wordt in stand gehouden door continue selectie als omschreven in paragraaf 4.3.2. Door continue selectiedruk blijft de cultuur bestaan uit PHA-accumulerende organismen zonder dat steriele procesvoering noodzakelijk is. Secundair zuiveringsslib, afkomstig uit een communale rwzi met een bio-P proces, kan als startmateriaal dienen voor het verkrijgen van een rich culture. De processtappen zijn als volgt (zie afbeelding 2.6):

- 1 primair slib, afkomstig van de rwzi, wordt omgezet in VFA's;
- 2 secundair slib wordt eenmalig ingezet als startcultuur, waarna biomassa wordt geproduceerd onder continue selectiedruk in een sequencing batch reactor (SBR) met VFA's als koolstofbron;
- 3 na de omzetting tot VFA's vindt fasescheiding plaats en wordt de waterfractie, rijk aan VFA's, toegediend als koolstofbron aan de rich culture waardoor PHA-fermentatie plaatsvindt;
- 4 de vaste fractie uit de VFA-productie wordt samen met het secundaire slib naar de slibverwerking verpompt voor verdere verwerking tot digestaat en biogas;
- 5 de cellen, rijk aan PHA, worden door een chemische behandeling opgebroken. Het intracellulair opgeslagen PHA wordt opgewerkt tot grondstof voor bioplastics (deze opwerking is omschreven in paragraaf 4.3.4). De vloeistof met celresten wordt als afvalstroom verwerkt;
- 6 de grondstof voor bioplastic wordt verwerkt tot eindproduct.

AFBEELDING 2.6 PHA-PRODUCTIEROUTE MIDDELS EEN RICH CULTURE



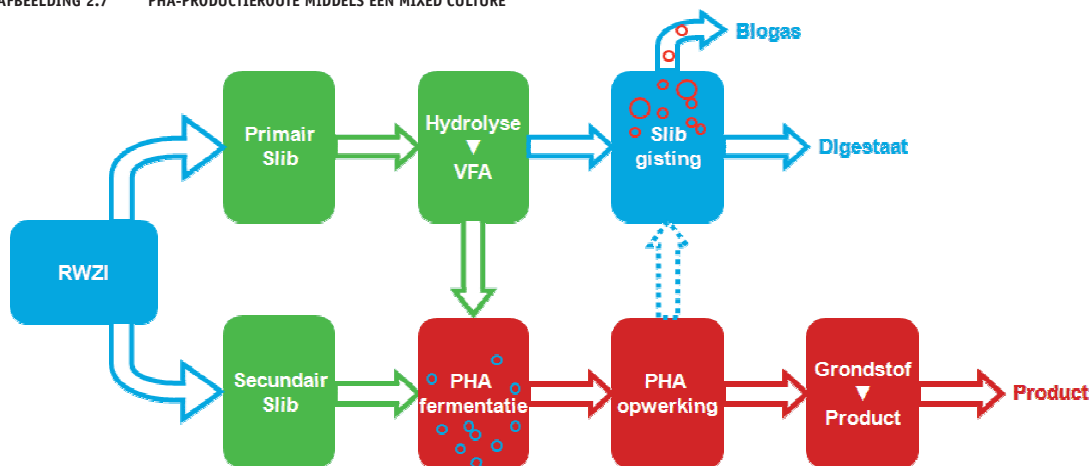
### MIXED CULTURE

Met de term 'mixed culture' wordt een bacteriecultuur aangeduid waarvan een deel van de organismen in staat is om PHA op te slaan. Secundair zuiveringsslib, afkomstig uit een communale rwzi (voornamelijk rwzi's met een biologisch fosfaatverwijderingsproces), is een voorbeeld van een mixed culture. De processtappen van dit proces zijn als volgt (zie afbeelding 2.7):

- 1 primair slib, afkomstig van de rwzi, wordt omgezet in VFA's;
- 2 secundair slib (mixed culture) wordt verpompt in een PHA-fermentatietank;
- 3 na de omzetting tot VFA's vindt fasescheiding plaats en wordt de waterfractie, rijk aan VFA's, toegediend als koolstofbron aan de mixed culture. Vervolgens vindt PHA-fermentatie plaats;

- 4 de vaste fractie uit de VFA-productie wordt naar de slibverwerking verpompt voor verdere verwerking tot digestaat en biogas;
- 5 de cellen, rijk aan PHA, worden door een chemische behandeling opgebroken. Het intracellulair opgeslagen PHA wordt opgewerkt tot grondstof voor bioplastics (deze opwerking is omschreven in paragraaf 4.3.4). De vloeistof met celresten wordt als afvalstroom verwerkt;
- 6 de grondstof voor bioplastic wordt verwerkt tot eindproduct.

AFBEELDING 2.7 PHA-PRODUCTIEROUTE MIDDELS EEN MIXED CULTURE



Wanneer mogelijk zal het toepassen van de 'mixed culture' route de voorkeur hebben, omdat hierbij alle VFA's gebruikt kunnen worden voor PHA-opslag. Echter, het is locatieafhankelijk welke strategie toegepast kan worden. Wanneer secundairslib aanwezig is dat in voldoende mate (30-40 % op basis van volatile suspended solids (VSS)) PHA kan accumuleren zal naar alle waarschijnlijkheid gekozen worden voor de mixed culture route. Is dit niet het geval dan kan een deel van de verkregen VFA's worden ingezet om een rich culture op te kweken en in stand te houden. Het gebruik van VFA's voor het in stand houden van de rich culture, gaat ten koste van de PHA-productie (procesontwerp en massabalansen worden besproken in hoofdstuk 4 en in bijlage III en IV).

Daarnaast moet gesteld worden dat PHA-productie zeker niet als plug and play technologie kan beschouwd worden. De beschreven techniek is geen blauwdruk die op elke zuivering op identieke wijze kan worden toegepast, doordat omstandigheden als slib en influent kwaliteit locatieafhankelijk zijn. In tabel 2.3 zijn voor- en nadelen van beide PHA-productieroutes kort weergegeven.

TABEL 2.3 VOOR- EN NADELEN VAN GESELECTEERDE PRODUCTIEROUTES TEN OPZICHTE VAN ELKAAR

	voordeel	nadeel
Rich culture	er zijn minder onzuiverheden aanwezig tijdens het PHA-opwerkingsproces door het gebruik van biomassa die in staat is tot hogere intracellulaire PHA-opslag; heeft een positieve invloed op chemicaliënverbruik en wellicht op de eindkwaliteit van het product	de productie van biomassa die in staat is tot PHA-opslag resulteert in de consumptie van een koolstofbron; de beschikbare koolstofbron is hierdoor niet volledig inzetbaar voor PHA-opslag
Mixed culture	het gebruik van secundair slib als mixed culture kost geen/weinig extra koolstofbron, de biomassa is afkomstig van een rwzi (secundair slib); de beschikbare koolstofbron is hierdoor volledig inzetbaar voor PHA-opslag	er zijn meer onzuiverheden aanwezig tijdens het PHA-opwerkingsproces door het gebruik van biomassa die in staat is tot lagere intracellulaire PHA-opslag; heeft een negatieve invloed op chemicaliënverbruik en wellicht op eindkwaliteit van het product



# 3

## PHA-MARKT

### 3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de huidige en toekomstige wereldwijde PHA-markt. Alle (gevisualiseerde) waarden zijn afkomstig van het Institute for Bioplastics and Biocomposites [11]. Daarnaast wordt de potentiële Nederlandse PHA-markt beschreven, met name de nichemarkt binnen de land- en tuinbouw. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de relatie tussen omvang, prijs en kwaliteit en toepassingsmogelijkheden.

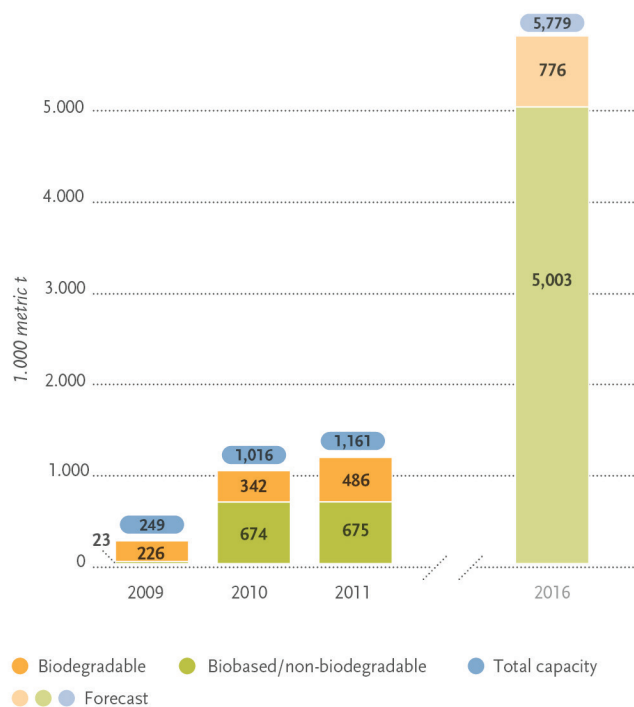
### 3.2 HUIDIGE MARKT

Bioplastics worden gebruikt voor een groeiend aantal markten, variërend van verpakking tot elektronica. Door een groeiende vraag naar duurzame oplossingen en de ontwikkelingen van steeds weer nieuwe materialen groeit de Europese markt snel. In deze paragraaf zijn cijfers uit 2011 weergegeven.

#### 3.2.1 WERELDWIJD

De wereldwijde productie van bioplastics is van 2009 tot 2011 gestegen van 249 kton naar 1.160 kton per jaar (afbeelding 3.1). Het betreft zowel biologisch afbreekbaar als biobased plastic. Biobased plastic is wel geproduceerd uit hernieuwbare bronnen, maar niet biologisch afbreekbaar. De jaarlijkse stijging in de periode 2009 tot 2011 bedroeg gemiddeld circa 115%. Ter vergelijking: de wereldwijde plasticmarkt is gestegen van 270 Mton in 2010 naar 280 Mton in 2011, wat neerkomt op een stijging van 4%.

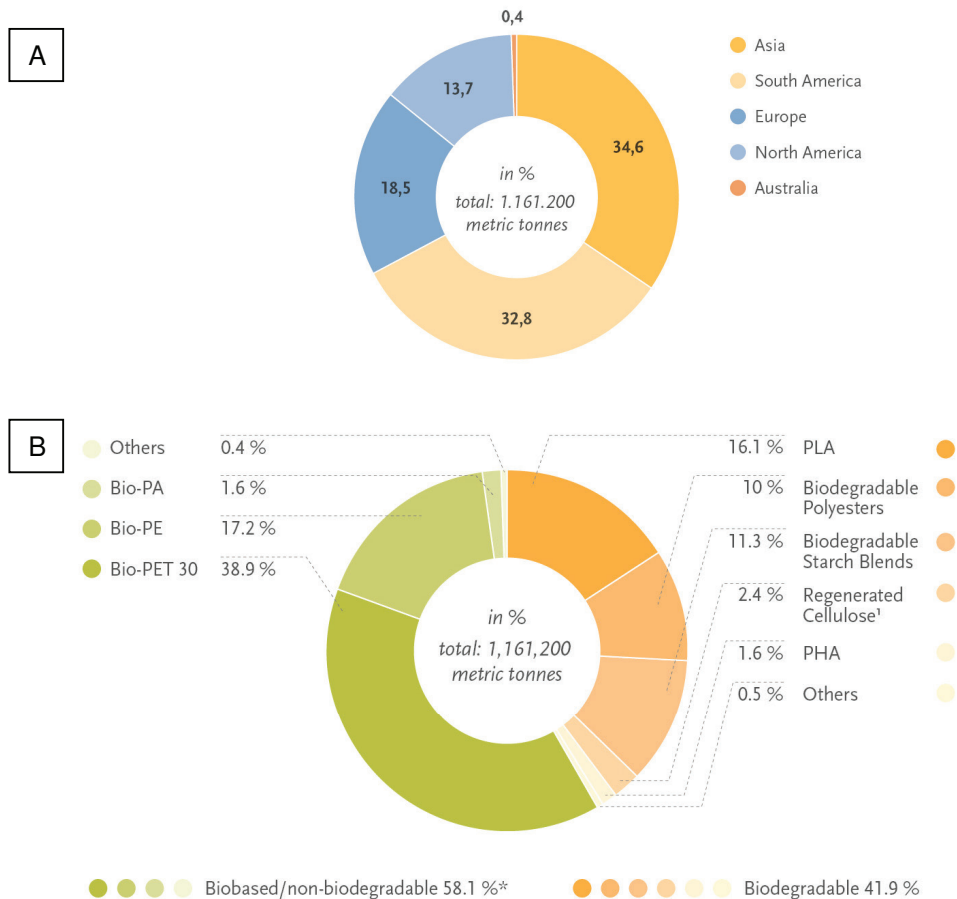
AFBEELDING 3.1 WERELDWIJDE PRODUCTIECAPACITEIT BIOPLASTICS [11]



Bioplastics worden wereldwijd geproduceerd, afbeelding 3.2 (A) geeft de wereldwijde productiecapaciteit per regio weer. In 2011 werd ongeveer twee derde van de totale hoeveelheid bioplastic in Azië en Zuid-Amerika geproduceerd, Europa en Noord-Amerika volgen met samen ongeveer 30 % van de totale productiecapaciteit.

Naast de productiecapaciteit per regio is ook de productiecapaciteit per type bioplastic weergegeven in afbeelding 3.2 (B). PHA is de kleinste gedefinieerde groep en maakt in 2011 voor 1,6% deel uit van de totale bioplasticmarkt, omgerekend is dit een jaarlijkse wereldproductie 19 kton PHA.

AFBEELDING 3.2 WERELDWIJDE PRODUCTIECAPACITEIT BIOPLASTICS PER REGIO (A) EN PER TYPE (B) (2011) [11]



### 3.2.2 NEDERLAND

Uit het onderzoek blijkt dat in Nederland jaarlijks totaal circa 1.800 kton aan kunststoffen op de markt geïntroduceerd wordt (2010 en 2011) [12, 13]. Het totale afvalvolume aan kunststoffen is minder en ligt tussen de 800 en 940 kton per jaar (2010) [13]. Dit impliceert dat Nederland een netto exporteur van kunststofproducten is (als onderdeel van een apparaat of als verpakking). Het exacte aandeel van bioplastics in deze huidige markt is niet bekend [13].

Omdat de kwaliteit (de levering van een biopolymeer (mix) met constante producteigenschappen) van bioplastics uit slib mogelijk lager is in vergelijking met conventionele bioplastics, en het feit dat bioplastic uit zuiveringsslib op dit moment, net zoals gewonnen struviet uit slib,

onder de regelgeving van afvalstoffen valt, bestaat de kans dat de toepassingsmogelijkheden binnen nichemarkten vallen. In dit geval zou de land- en tuinbouw een belangrijke nichemarkt voor bioplastic uit slib kunnen zijn, omdat de kwaliteit (homogeniteit van het biopolymeer en gewaarborgde productveiligheid) van het bioplastic, binnen deze nichemarkt, waarschijnlijk minder van belang wordt geacht. Additioneel onderzoek naar de kwaliteit (product eigenschappen en productveiligheid) en uniformiteit (het leveren van biopolymeer met een constante kwaliteit) met betrekking tot PHA uit zuiveringsslib is noodzakelijk om de toepasbaarheid te kunnen beoordelen.

De hoeveelheid afval die jaarlijks in Nederland ingezameld wordt vanuit de land- en tuinbouw is circa 48 kton (inclusief aanhangend zand, tot wel 40 % op basis van gewicht) [13]. Dit omvat voornamelijk de producten landbouwfolie, tuinbouwfolie en bloempotten. Het is niet bekend welk percentage deze specifieke afvalstroom vertegenwoordigt van de totaal op de markt geïntroduceerde kunststof. Met andere woorden, de verhouding tussen het nationaal gebruik en de geëxporteerde kunststof met betrekking tot de land- en tuinbouw is niet bekend. Met de ruwe aanname dat de verhouding tussen op de markt gebrachte land- en tuinbouwplastic en het ingezamelde afvalvolume gelijk is aan dat van kunststoffen in het algemeen, is circa 100 kton bioplasticproductie mogelijk wanneer deze gehele nichemarkt wordt vervangen door bioplastic.

Naast dat bioplastic een huidige markt kan vervangen is de toepassing in een nieuwe markt wellicht interessanter. Het vinden van een nieuwe nichemarkt waarin PHA uit zuiveringsslib ingezet kan worden in zo hoogwaardig mogelijke toepassingen is hier van belang en verdient aandacht in vervolgstudies.

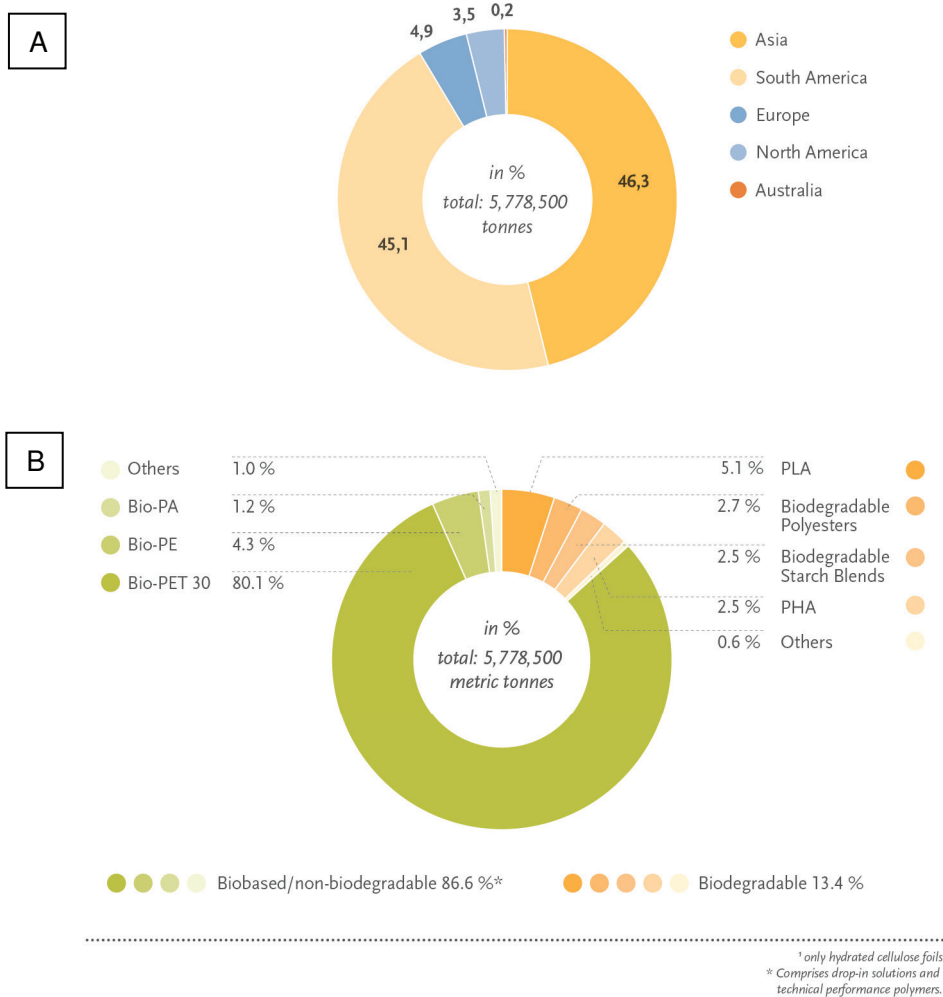
### 3.3 VERWACHTE MARKT

Door een groeiende vraag naar duurzame oplossingen en de ontwikkeling van steeds weer nieuwe materialen groeit de Europese bioplasticmarkt met ongeveer 20% per jaar. De drijfveren voor deze groei zijn onder andere kostenreductie, duurzaamheid, innovatie, grondstofprijs [14]. In deze paragraaf worden de verwachtingen voor het jaar 2016 beschreven.

Verwacht wordt dat de wereldwijde productiecapaciteit van bioplastics in 2016 is gestegen naar 5.800 kton. Niet biodegradeerbare bioplastics maken naar verwachting een grotere groei door in vergelijking met biodegradeerbare plastics (afbeelding 3.1), respectievelijk circa 600 en 60% in de periode van 2011 tot 2016. De jaarlijkse stijging tot 2016 bedraagt naar verwachting gemiddeld 30-40 %. Verwacht wordt dat het aandeel van PHA in 2016 is gestegen naar 2,5%, omgerekend een productie van 145 kton PHA per jaar.

Daarnaast wordt een verschuiving verwacht met betrekking tot de productielocatie. Azië en Zuid-Amerika zullen naar verwachting een grote rol spelen in de bioplasticproductie. Europa is een interessante onderzoeks- en ontwikkelingslocatie en blijft een grote gebruiker van bioplastics. Verwacht wordt dat Europa in 2016 circa % zal bezitten van de wereldwijde bioplastic productiefaciliteiten [14].

AFBEELDING 3.3 WERELDWIJDE PRODUCTIECAPACITEIT PER REGIO (A) EN PER TYPE (B) (2016) [11]



### 3.4 HUIDIGE MARKTPRIJS VERSUS GEWENSTE MARKTPRIJS

De huidige marktprijs van puur PHA, geproduceerd middels de conventionele productiemethode op basis van glucose, zetmeel of plantaardige olie, ligt in 2013 op EUR 4,- tot EUR 5,- per kg [15]. Marktprijzen van verschillende (bio)plastics zijn weergegeven in tabel 3.1 en tevens bevestigd tijdens het interview met de Wageningen UR Food & Biobased Research [16]. Volgens Rodenburg Biopolymers zal de toepasbaarheid van PHA economisch haalbaar worden wanneer de marktprijs van PHA onder de EUR 3,- kg uitkomt (gewenste marktprijs). Op den duur zal, volgens Rodenburg Biopolymers, een marktprijs van rond de EUR 2,- kg moeten worden bereikt om te kunnen concurreren met overige bioplastics. Wanneer PHA voor dezelfde prijs als polypropreen (1,30-1,55) of polystyreen (1,75-1,90) geproduceerd kan worden, wordt het volgens Rodenburg Biopolymers mogelijk om de gehele markt over te nemen. Het overnemen van deze markt is mogelijk omdat PHA vergelijkbare eigenschappen heeft en daarenboven volledig biologisch afbreekbaar is [15].

TABEL 3.1

## MARKTPRIJZEN VOOR VERSCHILLENDE (BIO) PLASTICS

type plastic	marktprijs (bulk) [EUR/kg] [4]
Polyetheen, Polyproppeen en Polyvinylchloride	1,00-1,50
Polystyreen en Polyetheentereftalaat	tot 2,00
Poly lactide	1,50-2,00
Zetmeel plastics (blends)	2,00-4,00
Cellulose plastics	4,00-5,00
Bio-PE	1,50-2,25
PHA	4,10-4,70

Rodenburg Biopolymers geeft aan dat de zuiverheid van PHA minimaal boven de 90% dient te liggen, hierbij zijn geur en kleur belangrijke parameters. Wanneer PHA uit zuiveringsslib gewonnen wordt, is het volgens Rodenburg Biopolymers waarschijnlijk dat de grondstof alleen toegepast kan worden in applicaties waarbij geen hoge kwaliteitseisen aan het product worden gesteld. Productapplicaties zijn volgens Rodenburg Biopolymers mogelijk in bijvoorbeeld de agrarische sector, omdat de kwaliteitseisen binnen deze niche wellicht een minder grote rol spelen [15].

Ook de heer Bolck van de Wageningen UR Food & Biobased Research geeft aan dat het de vraag is of elk type industrie gebruik zal gaan maken van bioplastic uit zuiveringsslib. Voor bijvoorbeeld de voedingsindustrie is het van belang dat een continue kwaliteit bioplastic wordt geleverd die voldoet aan strenge eisen [16].

Wanneer vluchtige vetzuren als koolstofbron worden toegediend, is consistentie in VFA-producten gewenst. Variatie in VFA-samenstelling kan een grote invloed hebben op de uiteindelijk producteigenschappen aldus de Wageningen UR. De Wageningen UR kan vanuit praktijkervaring zeggen dat het leveren van een product met constante producteigenschappen zelfs middels monoculturen met zuiver inputmateriaal lastig is. Over variatie in producteigenschappen in relatie tot mixed cultures is bij de Wageningen UR niets bekend [16].

Verder geeft de Wageningen UR aan dat een wisselende productkwaliteit mogelijk te ondervangen is door verschillende batches op te mengen zodat een constant product de productieplant verlaat, waarbij productapplicaties mogelijk zijn in bijvoorbeeld de agrarische sector [16].

De marktprijs van enkel het intermediaire product (de droge biomassa met ongeveer 80% PHA) zal naar verwachting van de TU Delft rond de EUR 0,5 tot EUR 1,- /kg liggen. Om een gewenste marktprijs voor PHA te bereiken van EUR 3,- tot EUR 4,- /kg, mogen de PHA-opwerkingskosten niet hoger worden dan EUR 2,- à EUR 3,5/kg PHA [17].

### TOEKOMST

Een uitspraak doen over toekomstige prijzen voor bioplastics is moeilijk. De huidige prijzen voor bioplastics zouden in de toekomst omlaag kunnen gaan door de ontwikkeling van efficiëntere processen. Verwacht wordt dat de prijs van petrochemisch geproduceerde plastics relatief zullen gaan stijgen ten opzichte van bioplastics. Dit omdat de kosten van petrochemisch geproduceerde plastics sterker gekoppeld zijn aan de stijgende aardolieprijs dan die van bioplastics [15].

Daarnaast kan wetgeving een extra stimulans zijn voor een toename in bioplasticproductie door het verbieden van niet afbreekbare plasticsoorten voor bepaalde toepassingen. Hierdoor

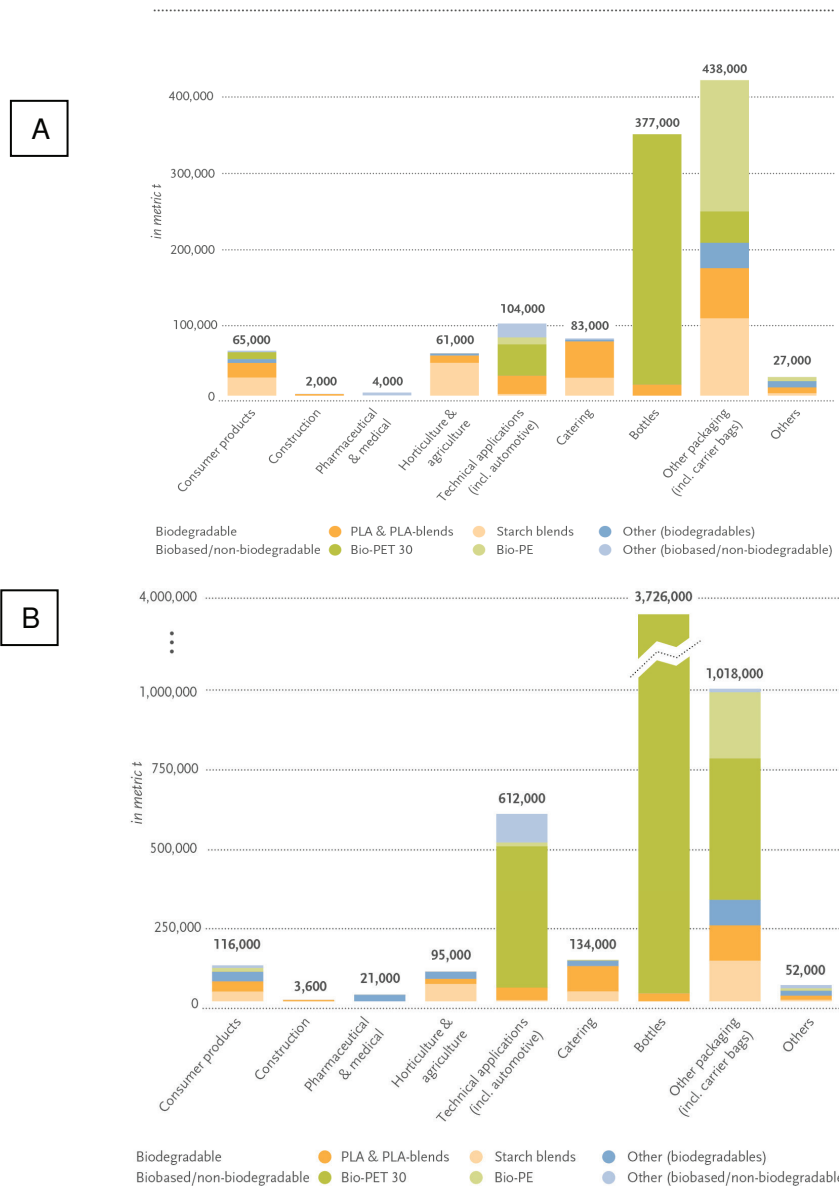
wordt productie van bioplastic noodzakelijk [11]. Voorbeelden van dergelijke regelgeving zijn het verbod op niet composteerbare plastic single-use tassen in Italië en het invoeren van extra heffingen in U.K. [18][19]. Ook het wegnemen van belemmeringen, bijvoorbeeld via een ‘green deal’, zou een stimulans kunnen geven aan het gebruik van bioplastic.

### 3.5 TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN BIOPLASTICS, TOEGESPITST OP PHA

De potentiële toepassingsmogelijkheden van PHA worden weergegeven in afbeelding 3.4. In deze afbeelding is de wereldwijde productiecapaciteit per toepassingsmogelijkheid voor zowel 2011 (A) als ook voor 2016 (B) weergegeven. Hierbij valt PHA onder de noemer overig (biodegradeerbaar).

Zoals blijkt uit deze afbeelding kan PHA worden toegepast in consumentenproducten, farmaceutische en medische producten, land- en tuinbouw, catering, verpakkingsmaterialen en in overige toepassingen.

AFBEELDING 3.4 TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN BIOPLASTICS 2011 (A) EN 2016 (B) [11]



In de volgende subparagrafen worden de toepassingsmogelijkheden van bioplastics nader uitgewerkt. Hierbij moet worden vermeld dat niet altijd gewerkt wordt met één bepaald type biopolymeer maar dat polymeerblends veelvuldig worden toegepast.

Beschikbare PHA's zijn bijvoorbeeld poly-hydroxybutyraat (P3HB), poly3-hydroxybutyraat-co-4-hydroxybutyraat (P(3HB4HB)), poly-hydroxybutyraatvaleraat (PHBV) en poly-hydroxybutyraathexanoaat (PHBH). Deze PHA's hebben verschillende eigenschappen (zoals de heat deflection temperature). Door deze eigenschappen met elkaar te combineren ontstaat de juiste grondstof voor het te produceren product. Daarnaast kunnen PHA's met andere biopolymeren worden opgemengd, bijvoorbeeld om de biodegradeerbare fractie van het polymeer te vergroten [4].

### 3.5.1 CONSUMENTENPRODUCTEN

In consumentenproducten is het gebruik van materialen met een biologische oorsprong (biobased) belangrijker dan de biodegradeerbaarheid van het product. PHA voldoet aan beide aspecten. Het goedkopere PLA kan biobased worden geproduceerd, maar biodegradeerbaarheid kan alleen worden bereikt onder composteerscondities.

Het eerste elektronische consumentenproduct gemaakt van biobased plastic was de Sony Walkman™. Hiervoor is gebruik gemaakt van PLA. Vervolgens zijn meer producten uit bioplastics vervaardigd, onder andere toetsenborden, computermuizen en mobiele telefoons [20].

Vanwege de hogere prijs van PHA, ligt het voor de hand dat consumentenproducten eerder uit PLA vervaardigd worden dan uit PHA. Aan de andere kant is het niet ondenkbaar dat PHA wordt toegevoegd als productverbeteraar, doordat PHA beschikt over betere producteigenschappen.

### 3.5.2 FARMACEUTISCHE & MEDISCHE PRODUCTEN

Dankzij de biodegradeerbare eigenschappen van PHA, wordt PHA toegepast in de medische industrie bijvoorbeeld als materiaal voor hechtingen, pleisters, orthopedische pinnen, synthetische hartkleppen en weefselbegeleidende materialen. Ook worden PHA's gebruikt voor het inkapselen van medicijnen, zodat de medicijnen op de juiste plaats en tijd vrijkomen in het lichaam [21].

Speciale eigenschappen van bepaalde bioplastics, waaronder PHA, maken de toepassing in hygiëneproducten interessant. Deze bioplastics laten waterdamp door maar blijven waterdicht, waardoor ademend bioplastic ontstaat. Mogelijke toepassingen zijn luiers, lakens, wegwerp handschoenen, etc. [20].

Vanwege de verwachte kwaliteit van PHA uit zuiveringsslib, en de Nederlandse wetgeving rond slib, is het niet waarschijnlijk dat dit biopolymeer als grondstof kan dienen voor medische toepassingen. Ook het Dutch Polymer Institute plaatst een kanttekening bij de medische toepasbaarheid van uit afvalwater geproduceerde biopolymeren: 'Onzuiverheden in het materiaal mogen in het lichaam beslist geen toxische afbraakproducten vormen' [22]. Nader onderzoek is nodig om de kwaliteit van het verkregen biopolymeer te toetsen.

### 3.5.3 LAND- EN TUINBOUW

Voor de land- en tuinbouw is voornamelijk de biodegradeerbaarheid van belang. Onkruidwerende folies kunnen bijvoorbeeld na gebruik ondergeploegd worden. Hetzelfde

geldt voor geleidingsdraden en bevestigingsclips in de tuinbouw. Wanneer deze producten vervaardigd zijn uit bioplastics, is het niet meer noodzakelijk om de producten apart in te zamelen en af te voeren [20].

PHA uit zuiveringsslib zou een grote rol kunnen gaan spelen als grondstof voor producten die hun toepassing vinden in de land- en tuinbouw. Een voorbeeld hiervan is het project 'van tomaat naar autodeur'. Op 3 juni 2013 werd door Veolia Water en de provincie Fryslân een intentieverklaring getekend om bioplastic voor de tuinbouw te gaan produceren met onder andere afval afkomstig van de tuinbouw.

#### **3.5.4 CATERING**

Catering producten als bekertjes, borden en bestek hebben een korte levensduur. Tijdens evenementen bijvoorbeeld worden grote hoeveelheden cateringmaterialen gebruikt. Het gebruik van bioplastic is dan niet alleen een ecologisch alternatief, maar heeft ook toegevoegde waarde doordat het plastic samen met de etensresten ingezameld en verwerkt kan worden [20].

Het is de vraag of de kwaliteit van het biopolymeer voldoende is om toe te passen in producten bestemd voor catering toepassingen. Ook hier is nader onderzoek gewenst.

#### **3.5.5 VERPAKKINGSMATERIALEN**

Verpakkingsproducenten kunnen bioplastics vaak zonder problemen toepassen in het productieproces gebruikmakend van conventionele machines. Op dit moment worden bioplastics voornamelijk gebruikt voor de productie van plasticassen welke weer ingezet kunnen worden voor het verzamelen van afval. Verdere applicaties zijn eierendozen, flessen, netjes, schalen, bakjes, enzovoort. De voordelen van het gebruik van biodegradeerbare plastics is een lagere milieubelasting en besparing op kosten voor verbranding van afval, omdat al deze producten gecomposteerd kunnen worden [20].

Wanneer enkel PHA als biopolymeer wordt toegepast, is volledige biologische afbraak mogelijk. Vanwege de eventueel verminderde kwaliteit van PHA uit zuiveringsslib en de Nederlandse wetgeving rond zuiveringsslib, wordt verwacht dat dit biopolymeer niet voor elke verpakkingstoepassing kan worden ingezet.

#### **3.5.6 OVERIGE TOEPASSINGEN**

Er zijn nog meer toepassingsmogelijkheden denkbaar voor bioplastic en PHA, zoals bureaubehoeften, tape, speelgoed, coatings en zelfs brandstofadditief.

Voor het verkrijgen van brandstofadditieven dient esterificatie van PHA plaats te vinden via een gekatalyseerde zure hydrolyse. De methylesters kunnen vervolgens worden toegevoegd aan conventionele brandstoffen of ethanol om de verbrandingswaarde te verhogen. Wel is aanzienlijk meer onderzoek nodig voor het gebruik van PHA als biobrandstof [23].



# 4

## PROCESSEN EN TECHNIEKEN

### 4.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt eerst kort uiteen gezet welke partijen op dit moment bezig zijn met onderzoek naar PHA-productie (uit slib). Daarnaast wordt voor elke geselecteerde PHA-productieroute afzonderlijk, per productiestap, weergegeven welke technieken benodigd zijn. Hierop volgt een samenvattende paragraaf met betrekking tot de uitgangspunten. Vervolgens wordt de invloed van PHA-productie op een rwzi beschreven. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de paragraaf duurzaamheid, waarin de beschreven PHA-productieroutes kort worden vergeleken met de conventionele PHA-productieroute.

### 4.2 ONDERZOEK NAAR PHA-PRODUCTIE EN PILOT STUDIES

#### 4.2.1 CELLA™-PROCES

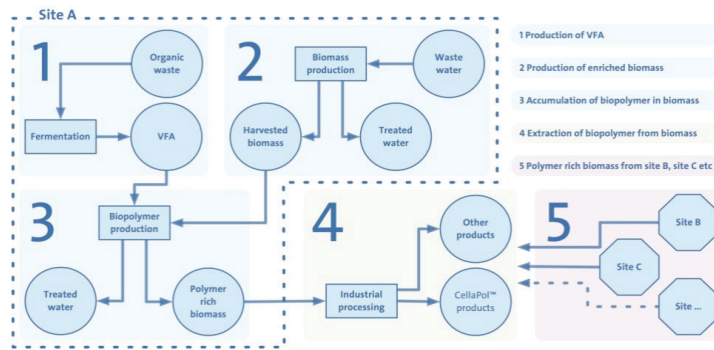
Informatie als weergegeven in deze paragraaf is schriftelijk aangeleverd door AnoxKaldnes [24]. Het betreft een vanuit het Engels vertaalde samenvatting van de originele tekst.

#### PHA-PRODUCTIE PRINCIPE

Het PHA-productieprincipe dat AnoxKaldnes beheert onder de naam Cella™ bestaat achtereenvolgens uit de volgende stappen (afbeelding 4.1):

- 1 VFA-productie uit organisch afval door anaerobe verzuring;
- 2 biomassa productie:
  - route 1:** Natuurlijke verrijking van microbiologie (selectie van PHA-producerende organismen) op een bestaande waterzuivering (eventueel door middel van kleine aanpassingen aan de zuiveringsinstallatie);
  - route 2:** Productie van micro-organismen met VFA als koolstofbron. In sommige situaties kan een korte selectiestap worden uitgevoerd om secundair slib te upgraden naar de kwaliteit van slib als gebruikt in route 1 (hierbij wordt gebruik gemaakt van het feast en famine principe als omschreven in paragraaf 2.6.1). Binnen deze selectiestap kan zowel VFA als opgelost BZV (Biologisch Zuurstof Verbruik) (influent) als koolstofbron worden toegepast;
- 3 VFA's worden aan de biomassa toegevoegd waardoor intracellulaire PHA-accumulatie optreedt;
- 4 biomassa met intracellulair opgeslagen PHA wordt geconcentreerd geoogst en gestabiliseerd. Middels een solvent extractie op een centrale locatie wordt PHA geëxtraheerd, vervolgens kan bioraffinage worden toegepast op het biomassa residu (zijnde niet-PHA) waarbij lipiden, nutriënten en energie kunnen worden teruggewonnen.

AFBEELDING 4.1 CELLA™ PHA-PRODUCTIE



AnoxKaldnes richt zich voornamelijk op laag geconcentreerde afval(water)stromen als koolstofbron, zonder nutriëntenlimitatie toe te passen tijdens de PHA-fermentatie.

### PARTNERS

Partners in de verschillende onderzoeken zijn:

- Industrieën in Zweden;
- Aquiris en Veolia Environment;
- BioTRIP: AnoxKaldnes API, Bioclear, KNN en Suiker Unie;
- BioVAP: AnoxKaldnes, KNN, Van Hall Larenstein en Wassenaar;
- Nederlandse waterschappen en industrieën (tuinbouw/papierindustrie).

### STATUS ONDERZOEK

AnoxKaldnes heeft inmiddels circa 10 jaar ervaring op het gebied van PHA-productie uit verschillende soorten afvalstromen, inclusief slib. De resultaten van dit onderzoek tonen een potentie met betrekking tot waardecreatie door de extractie van biopolymeren uit verrijkt biomassa. Onderstaande opsomming geeft een overzicht van een aantal onderzoeksactiviteiten:

- pilot plant in Lund, Zweden (2008-2013). VFA-productie werd bewerkstelligd uit afvalwater van de zuivelindustrie;
- pilot plant in Eslöv, Zweden (2008-2013). PHA-productie werd bewerkstelligd met gefermenteerd afvalwater als koolstofbron (lage concentraties) tot opslagcapaciteiten van 65% VSS;
- pilot plant op communale afvalwaterzuivering in Brussel, België (2011-2013). PHA-productie werd bewerkstelligd met verschillende koolstofbronnen, waaronder anaerobe verzuurd slib, tot opslagcapaciteiten van 50% VSS;
- pilot plant Lund, Zweden. Deze pilot is gericht op de extractie van PHA uit biomassa;
- businesscase met resultaten uit een praktijkstudie voor het project BioTRIP (Biologische Transformatie van Reststromen In marktgevraagde bioPolymeren) om economische haalbaarheid aan te tonen [25];
- verschillende quick-scans voor Nederlandse waterschappen en -industrieën.

### TOEKOMSTVERWACHTING

Op de korte termijn (2013/2014) wordt een eerste demonstratiefaciliteit van de Cella™ technologie in Nederland verwacht. Op het seminar 'van tomaat naar autodeur' 3 juni 2013 werd door Veolia Water en de provincie Fryslân een intentieverklaring getekend om bioplastie te gaan produceren.

#### 4.2.2 TU DELFT PROCES

Informatie als weergegeven in deze paragraaf is schriftelijk aangeleverd door de TU Delft [26].

##### PHA-PRODUCTIE PRINCIPE

Het proces waaraan TU Delft onderzoek heeft verricht gaat uit van een afvalwater als koolstofbron. Hiervoor dient het afvalwater onder anaerobe condities verzuurd te worden. Het water, rijk aan VFA's, wordt deels ingezet om micro-organismen te kweken in een batchgewijs proces waarin de bacteriën een feast-famine regime ondergaan. De geproduceerde micro-organismen worden in een laatste stap met het overige deel van het water, rijk aan VFA, in contact gebracht waarbij de cellen maximaal PHA opslaan.

TU Delft richt zich voornamelijk op geconcentreerde afval(water)stromen die dienen als koolstofbron en het toepassen van nutriëntenlimitatie tijdens de PHA-fermentatie om de PHA-opslagcapaciteit te vergroten.

##### PARTNERS

TU Delft verricht onderzoek en is betrokken in het procesontwerp. Paques is betrokken bij het procesontwerp, voert de opschaling naar praktijkinstallaties uit en zal zich inzetten voor de commerciële vermarkting.

##### STATUS ONDERZOEK

TU Delft heeft de afgelopen 10 jaar uitvoerig onderzoek verricht op laboratoriumschaal. Daarnaast is een haalbaarheidsstudie verricht met afvalwater uit de papierindustrie als uitgangspunt. Momenteel loopt er een pilot proef bij Mars in Veghel. Daarnaast wordt onderzoek gedaan naar de optimalisatie van de PHA-opwerking uit slib.

##### TOEKOMSTVERWACHTING

De TU Delft verwacht dat industrieel afvalwater succesvol kan worden ingezet voor de productie van PHA. Succesvol betekent hierbij dat deze manier van PHA-productie kan concurreren met de bestaande industriële PHA-productie, zowel op productkwaliteit als op productiekosten. De belangrijkste factor voor succes is volgens de TU Delft het uiteindelijk PHA-gehalte in de biomassa. Het vertrouwen dat het proces commercieel interessant is, is mede gebaseerd op de hoge PHA-gehalten die reeds behaald zijn (80-90% DS onder groeilimiterende omstandigheden).

#### 4.3 BENODIGDE TECHNIKEN VOOR GESELECTEERDE PHA-PRODUCTIEPROCESSEN

In deze paragraaf worden voor elke geselecteerde PHA-productieroute afzonderlijk en per productiestap, de benodigde technieken omschreven. Voor een schematische weergave van de twee PHA-productieroutes, de PHA-opwerkingsroute en van het referentieproces, zie bijlage I.

##### 4.3.1 VFA-FERMENTATIE

De fermentatie van slib tot vluchtige vetzuren is identiek voor de rich culture en de mixed culture. Voor de productie van VFA's uit de volledige stroom primair slib is uitgegaan van een anaerobe verzuring bij 35 °C. De verblijftijd van slib in de reactor is 4 dagen. VFA-fermentatie vanuit primair slib is veelvuldig onderzocht, voornamelijk in batchsystemen. De VFA-opbrengst bij batchgewijze fermentatie van primair slib is temperatuur- en pH-afhankelijk en varieert tussen 0,15 en 0,5 gVFA/gVSS [2724][28][29]. Continue procesvoering is mogelijk, maar resulteert in lagere VFA-concentraties en het risico op biogasvorming. Om deze redenen is

voor deze studie uitgegaan van een batch-proces met een gemiddelde VFA-opbrengst van 0,25 gVFA/gVSS. Dit is tevens in overeenstemming met de resultaten van de pilot-opstelling van AnoxKaldnes in Brussel [30]. Hierbij moet worden opgemerkt dat tijdens verzuringsfase naast VFA's ook waterstof ontstaat, waardoor ATEX-richtlijnen van kracht kunnen zijn. Daarnaast moet in het ontwerp rekening gehouden worden met geuremissie van vluchtige vetzuren (gesloten tanks) en corrosiviteit van vluchtige vetzuren (materiaal keuze).

Na VFA-productie wordt de VFA-rijke, waterige stroom middels een centrifuge van de vaste fractie gescheiden. De vaste fractie wordt vervolgens verpompt naar de vergister, de stroom met VFA's wordt gebruikt voor PHA-productie (zie bijlage IV voor de massabalans).

Benodigde apparatuur (zie bijlage I voor visualisatie, gele kader):

- gravitaire indikking;
- VFA-fermentatietank met mengsysteem en temperatuurbeheersing;
- centrifuge voor scheiding van slib- en waterfractie (VFA's);
- buffer, voor de opslag van VFA's;
- slibpompen, voor in- en uitgaande stromen.

#### 4.3.2 SELECTIEPROCES MICRO-ORGANISMEN

##### **RICH CULTURE**

Teneinde een rich culture te verkrijgen is een selectieproces noodzakelijk. De selectie wordt uitgevoerd volgens het 'feast and famine' principe waarbij een deel van de verkregen VFA's als koolstofbron wordt ingezet. Uit onderzoek van de TU Delft blijkt dat met continue cycli van 12 uur efficiënte selectie wordt bewerkstelligd. Op tijdstip 0 wordt een koolstofbron gedoseerd die snel geconsumeerd wordt (1 uur, 2,72 g acetaat/gram actief biomassa). In de opvolgende periode (11 uur) treedt selectie op. Na 12 uren is de biomassaconcentratie verdubbeld en kan deze extra verkregen biomassa worden ingezet voor PHA-productie. Biomassa productie vindt plaats bij 30 °C [30].

Benodigde apparatuur (zie bijlage I voor visualisatie, blauwe kader):

- selectiereactor met beluchtingselementen en temperatuurbeheersing;
- doseerpomp, voor VFA;
- luchtblower;
- pompen, voor in- en uitgaande stromen.

##### **MIXED CULTURE**

Secundair slib is doorgaans in staat om 10-20% aan PHA op te slaan op basis van het VSS-gehalte. Er zijn zuiveringen waar dit percentage hoger ligt. Voor deze studie is uitgegaan van goed geconditioneerd slib dat in staat is om 40% PHA op te slaan op basis van het VSS-gehalte. Deze aanname is gebaseerd op informatie verkregen tijdens het interview met AnoxKaldnes [30]. De conditionering gebeurt door juiste procesvoering op de rwzi; een verrijkingstap voor het eigenlijke PHA-accumulatieproces is hierbij niet noodzakelijk.

#### 4.3.3 PHA-PRODUCTIEPROCES

##### **RICH CULTURE**

De PHA-productie wordt uitgevoerd onder niet-limiterende omstandigheden waardoor de opslagcapaciteit 70% van het DS bedraagt in plaats van 90% DS onder stikstofflimitatie.

Volledige nutriëntenlimitatie is, zonder voorbereiding, niet mogelijk wanneer gebruikt gemaakt wordt van een VFA-stroom, verkregen na slibverzuring. Omdat een opslagcapaciteit van 70% DS behaald werd op laboratoriumschaal met acetaat als koolstofbron is voor deze studie uitgegaan van een opslagcapaciteit van 60% DS. De gemiddelde opbrengst van PHA op VFA is, als blijkt uit onderzoek van de TU Delft, 0,43 gram PHA per gram acetaat bij 30 °C (voor deze studie is aangenomen dat eenzelfde opbrengst wordt verkregen wanneer een mix van VFA's wordt toegediend). De koolstof bron wordt op t=0 toegevoegd, waarbij de maximale PHA-concentratie in de cel wordt bereikt na circa 5 uur [31].

Omdat de concentratie VFA circa 7,5 g/l bedraagt, is in het ontwerp gekozen voor continue aanvoer van de VFA-stroom. Dit resulteert in een continue afloop van de PHA-fermentatietank. Deze stroom bevat tevens biomassa die middels een tussenbezinktank wordt gescheiden van de waterfractie. De biomassa wordt vervolgens teruggevoerd naar de PHA-fermentatietank (zie bijlage IV voor de massabalans). Na de PHA-fermentatie wordt de biomassa ontwaterd en opgeslagen. Uit onderzoek van de TU Delft blijkt dat het intracellulair opgeslagen PHA na ontwatering van de cellen onder anaerobe omstandigheden stabiel blijft voor minstens 1 week [17].

Benodigde apparatuur (zie bijlage I voor visualisatie, groene kader):

- reactor met beluchting en temperatuurbeheersing;
- doseerpomp, VFA-dosering;
- luchtblower;
- tussenbezinktank;
- centrifuge;
- biomassaopslag;
- pompen, voor in- en uitgaande stromen.

#### **MIXED CULTURE**

AnoxKaldnes heeft PHA-opslagcapaciteiten van 40 % behaald op basis van VSS met goed geconditioneerd communaal slib. In een maximale situatie zou een PHA-opslagcapaciteit van 50% VSS behaald kunnen worden. Omdat secundair slib continu vrijkomt, is buffering noodzakelijk voordat PHA-accumulatie plaats kan vinden. Tijdens de PHA-fermentatie wordt de biomassa (VSS) verdubbeld (uitgaande van een PHA-opslagcapaciteit van 50% VSS), waarbij 50% van de uiteindelijke massa PHA bedraagt. Er vindt dus geen slibreductie plaats tijdens de PHA-fermentatie. Voor deze studie is uitgegaan van een PHA-opslagcapaciteit van 40% op basis van VSS. De gemiddelde opbrengst van PHA op VFA is ook voor deze route aangenomen als 0,43 gram PHA per gram acetaat bij 30 °C. Echter, doordat niet voldoende VFA wordt geproduceerd om al het secundaire slib op de zuivering in te zetten voor PHA productie, wordt circa 85 % direct vergist (zie bijlage IV voor de massabalans). In deze studie is VFA-productie uit secundair zuiveringsslib niet doorgerekend, zie hiervoor de aanbevelingen. Omdat ook voor deze route geldt dat de VFA-concentratie relatief laag is (circa 7,5 g/l), is ook in dit ontwerp gekozen voor een tussenbezinktank die de biomassa scheidt van de waterfractie. De biomassa wordt vervolgens teruggevoerd naar de PHA-fermentatietank. Na de PHA-fermentatie wordt het PHA-rijke biomassa ontwaterd middel van een centrifuge en opgeslagen.

Benodigde apparatuur (zie bijlage I voor visualisatie, groene kader):

- buffer voor secundair slib;
- reactor met beluchting en temperatuurbeheersing;
- doseerpomp, VFA-dosering;

- luchtblower;
- tussenbezinktank;
- centrifuge;
- buffer voor biomassaopslag;
- pompen, voor in- en uitgaande stromen.

#### 4.3.4 PHA-OPWERKINGSPROCES

In het ontwerp is uitgegaan van een centrale opwerking waarbij de biomassa met intracellulair opgeslagen PHA van de zuivering wordt vervoerd naar de centrale opwerking.

De manier van PHA-opwerking is in sommige gevallen specifiek voor het type biopolymeer en voor de toepassing van het biopolymeer, zoals blijkt uit onderzoek op de Wageningen UR. Voorbeelden van door de Wageningen UR onderzochte technieken zijn: middellange PHA-polymeren afscheiden als een latex na celdisruptie met bijvoorbeeld loog en/of enzymen, solvent extractie met bijvoorbeeld hexaan of heptaan. Daarnaast geeft dhr. Bolck van de Wageningen UR aan dat het gebruik van natriumhypochloriet tijdens de PHA-opwerking in de meeste gevallen resulteert in een gereduceerde polymeerlengte door oxidatie van de polymeerketens [16].

De opwerkingsmethodes waaraan onderzoek is verricht bij de TU Delft zijn [17]:

- Natriumhydroxide (NaOH) + Sodium dodecyl sulfate (SDS);
- NaOH + natriumhypochloriet;
- Ethanol kan hierbij dienen als mogelijke polishing stap.

Op laboratoriumschaal zijn veel opwerkingsmethoden onderzocht, een overzicht van literatuurreferenties is weergegeven in bijlage II. In dit rapport is uitgegaan van een opwerkingsmethode welke in eerste instantie is geselecteerd op het toepassen van zo min mogelijk milieubelastende stoffen, en waarbij een zo hoog mogelijke opbrengst en zuiverheid kan worden gerealiseerd. De opwerkingsmethode is ontwikkeld op 10-liter schaal door gebruik te maken van een reïncultuur (biomassa concentratie 10 g/l) [32]. Voor deze studie is aangenomen dat deze opwerkingsmethode op full-scale dezelfde resultaten behaalt op mixed- en rich cultures bij een biomassaconcentratie van 50 g/l.

Om de celwanden open te breken wordt een combinatie van natriumchloride (NaCl) en NaOH gebruikt. Een voorbehandeling met zoutoplossing (8 g/l) resulteert in een onbalans van het celmembraan waardoor de celwand makkelijker openbreekt bij verdere behandeling. NaOH (0,1M) wordt nadien toegevoegd om het celmateriaal op te lossen waardoor relatief zuiver PHA overblijft. Een polishingstap met ethanol (20%<sub>v/v</sub>), na centrifugatie, resulteert in een opwerkingsproces met 95% opbrengst en 91 % zuiverheid [32] (zie bijlage IV voor de massabalans). Kanttekeningen bij deze opwerkingsstap is dat enkel PHA wordt geoogst, al het cel materiaal wordt afgevoerd met het afvalwater waardoor hergebruik van celmateriaal niet mogelijk is, daarnaast wordt een additionele afvalstroom gecreëerd. Het is niet bekend hoe de verschillende zware metalen, aanwezig in zuiveringsslib, zich gedragen onder deze procescondities. Hierdoor is niet in te schatten of het verkregen product zware metalen bevat.

Benodigde apparatuur (zie bijlage I voor visualisatie):

- buffer, biomassa;
- NaCl-reactor met roerwerk;
- NaOH-reactor met roerwerk;

- was-reactor met roerwerk;
- ethanol-reactor met roerwerk;
- ontwateringscentrifuges;
- pompen, ingaande en uitgaande stromen;
- doseerpompen, NaCl, NaOH en ethanol;
- afvalwaterbuffer (ethanol);
- droger;
- pompen, voor in- en uitgaande stromen.

#### 4.3.5 BIOGASPRODUCTIE

De hoeveelheid biogas die geproduceerd kan worden met het navergisten van primair slib en het vergisten van het (overige deel) secundair slib is berekend aan de hand van het Chen en Hashimoto model [33], bij een temperatuur van 37 °C en een verblijftijd van 25 dagen. Overige parameters zijn weergegeven in tabel 4.1. Door de VFA-productie uit primair slib neemt de afbraak van organisch materiaal af. Dit is in de berekening gecompenseerd door de asrest te verhogen met de fractie aan organisch materiaal dat tijdens de verzuring wordt omgezet in VFA's. In het referentieproces wordt al het slib verwerkt door vergisting.

Benodigde apparatuur (zie bijlage I voor visualisatie):

- bandindikker inclusief PE-dosering;
- slibgistingtank;
- gashouder;
- WKK;
- uitgegistslibbuffer;
- centrifuge;
- slibsilos;
- pompen, voor in- en uitgaande stromen.

#### 4.4 UITGANGSPUNTEN

In tabel 4.1 zijn de uitgangspunten en ontwerpparameters samengevat als beschreven in paragraaf 4.3 en in bijlage III. In bijlage III zijn de ontwerpkeuzes per deelproces verantwoord. Voor het ontwerpen van alle apparatuur is een ontwerpfactor van 1,2 gebruikt. De effectieve volumina werden vermenigvuldigd met deze factor zodat pieksituaties kunnen worden opgevangen. Uitzonderingen hierop zijn: indikkers en pompen, welke dubbel zijn uitgelegd op het te verwachten debiet. Daarnaast zijn de centrifuges dubbel uitgelegd op 50% van het te verwachten debiet.

TABEL 4.1 SAMENVATTING PROCESUITGANGSPUNTEN/ONTWERPPARAMETERS

parameter	eenheid	waarde	
Ontwerpfactor		1,2	
Tank hoogte/diameter		0,8	
<b>Slib</b>			
Primair slibproductie	kgDS/i.e./jaar	7,9 <sup>1</sup>	
Secundair slibproductie	kgDS/i.e./jaar	8,4 <sup>2</sup>	
Organisch stofgehalte primair slib	%	75	
Organisch stofgehalte secundair slib	%	70	
PE dosering indikker	g actief PE/kg <sub>DS</sub>	5	
PE dosering centrifuge	g actief PE/kg <sub>DS</sub>	12,5	
Bezinsnelheid primair slib	m/h	1	
Verlies in centrifuge (droge stof)	%	2,5	
<b>PHA algemeen</b>			
VFA-productie	g VFA / g VSS	0,25	
Temperatuur VFA-productie	°C	35	
Verblijftijd VFA-productie	dagen	4	
VFA-consumptie	g acetaat / g biomassa (gedurende 1 <sup>e</sup> uur)	2,72	
PHA-productie	g PHA / g VFA	0,43	
Bezinsnelheid PHA-biomassa	m/h	0,5	
Buffer PHA-rijk biomassa	dagen	7	
<b>PHA Rich</b>			
PHA-opslagcapaciteit	% DS	60	
Aantal productie batches per reactor	n/dag	4	
Aantal cultuur batches per reactor	n/dag	2	
<b>PHA Mixed</b>			
PHA-opslagcapaciteit	% VSS	40	
Aantal productie batches per reactor	n/dag	1	
<b>PHA opwerking</b>			
PHA verlies centrifuge	%	1	
Biomassa buffer (cellen)	dagen	2	
Afvalwater buffer (ethanol)	dagen	7	
Start nieuwe opwerkingscyclus na	uur	4	
<b>Biogas productie</b>			
Temperatuur	°C	37	
Verblijftijd	dagen	25	
<b>Chen en Hashimoto [33, 34]</b>			
Asgehalte	%	25	PS 30
Maximale VSS-reductie	%	65	40
Afbraakconstante	-	1,00	1,50
kg CZV/kg VSS	kg/kg	1,80	1,42
Minimale sibleeftijd	d	2,85	2,85
Temperatuurfactor	-	1,08	1,08
Rendement WKK elektriciteit	%	40	
Rendement WKK warmte	%	40	
<b>Warmte [35]</b>			
Warmteoverdracht	kJ/kg/K	4,2	
Warmteoverdrachtscoëfficiënt dak	W/m <sup>2</sup> /K	0,4	
Warmteoverdrachtscoëfficiënt wand	W/m <sup>2</sup> /K	0,4	
Warmteoverdrachtscoëfficiënt grond	W/m <sup>2</sup> /K	0,3	



parameter	eenheid	waarde
Warmteverlies per unit operatie	%	10
Warmteverlies warmtewisselaar	%	10
<b>Warmteverdeling WKK</b>		
Intercooler	%	15
Rookgas	%	40
Warmwatercircuit	%	45
<b>Energie</b>		
Pomp/blower energie	kWh/m <sup>3</sup>	0,05
Meng-energie	kW/m <sup>3</sup>	0,005
Energieverbruik centrifuge	kWh/m <sup>3</sup>	1,5
Energieverbruik bandindikker	kWh/kg <sub>DS</sub>	0,045
Energieverbruik droger	kWh/m <sup>3</sup>	0,6
Gasverbruik droger	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1,2
Verbrandingswarmte aardgas	MJ/m <sup>3</sup>	35
Rendement biogasketel	%	95

<sup>1</sup> Hierbij is uitgegaan van een influentsamenstelling als weergegeven in bijlage VI met een verwijderingsrendement (voorbezinktank) van 60% op total suspended solids (TSS) (primaire slibproductie) en 30% op CZV (Chemisch zuurstof verbruik)

<sup>2</sup> De resterende CZV-vracht wordt voor circa 90% verwijderd in de AT, met dit gegeven is de slibproductie berekend op basis van het kengetal 0,34 kgslib/kg verwijderd CZV.

Bijlage IV geeft de massabalansen weer waarin alle procesuitgangspunten en ontwerpparameter als omschreven in de paragrafen 4.3-4.4 en bijlage III zijn verwerkt. Met deze massabalansen is de omvang van alle apparatuur bepaald welke is gebruikt in de economische analyse. De economische haalbaarheid wordt beschouwd in hoofdstuk 5.

#### 4.5 INVLOED OP RWZI EN MILIEU

In deze paragraaf worden de mogelijke invloeden van de PHA-productie op de rwzi, per PHA-productieroute, besproken. De verkregen waarden zijn afkomstig uit de massabalans, zie bijlage IV, welke opgesteld is met de procesuitgangspunten en ontwerpparameters als omschreven in de paragrafen 4.3-4.4 en in bijlage III.

##### 4.5.1 RICH CULTURE

Omdat primair slib als koolstofbron wordt gebruikt en PHA-accumulerend biomassa separaat van de zuivering wordt opgekweekt heeft het implementeren van het productieproces op de rwzi in eerste instantie geen gevolgen voor de waterlijn; wel voor de slibverwerkingslijn.

Door PHA-productie op een rwzi te integreren wordt minder biogas geproduceerd omdat het primair slib wordt ingezet voor VFA-productie. De referentiesituatie (rwzi 300.000 i.e. met slibverwerking door vergisting) produceert 3.855 Nm<sup>3</sup> biogas/dag, na PHA-productie met betrekking tot de rich culture route afgenomen tot 2.856 Nm<sup>3</sup> biogas/dag. Dit resulteert in een lagere elektriciteitsproductie, de afname is 2.343 kWh per dag.

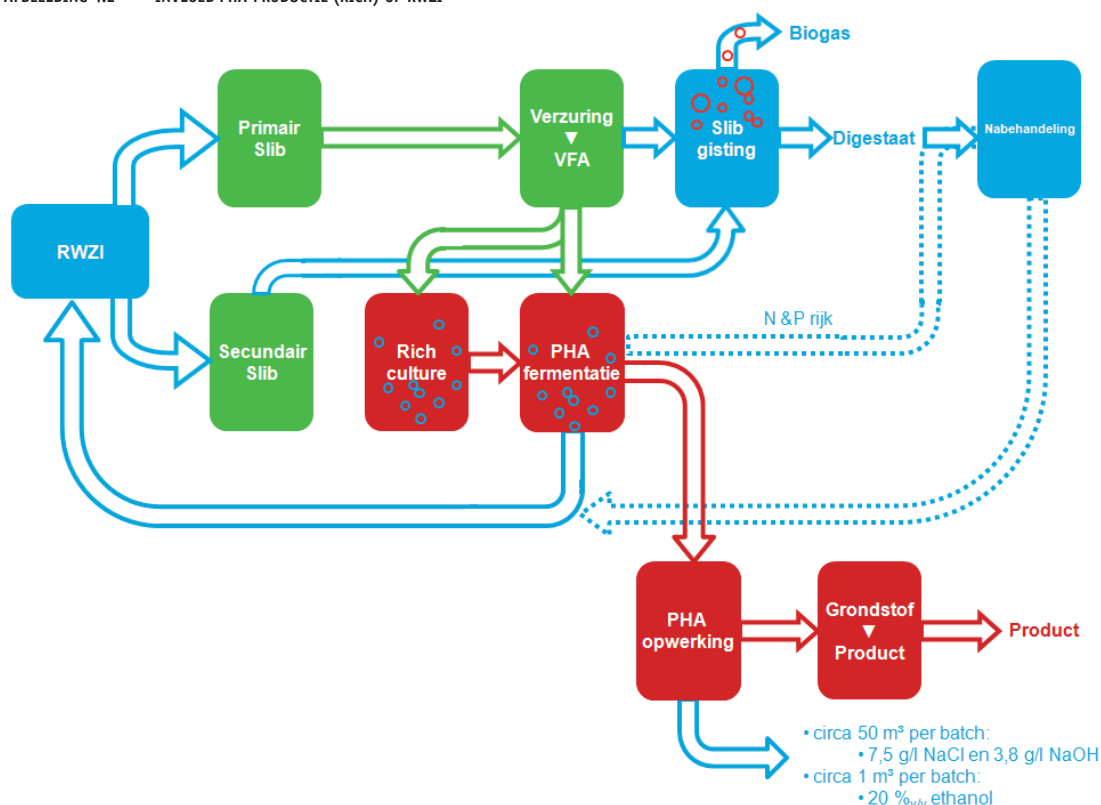
Het PHA-productieproces middels de rich culture is nogmaals schematisch weergegeven in afbeelding 4.2. De ingaande stroom met betrekking tot de PHA-fermentatie bevat voornamelijk VFA-rijk water, mogelijk met een licht verhoogde concentratie stikstof wat vrij komt na de verzuringstap van 4 dagen. Tijdens de PHA-fermentatie is het mogelijk dat fosfaat vrijkomt, het achterliggende mechanisme is beschreven in paragraaf 2.5. Om de uiteindelijke concentratie in te schatten zijn de volgende aannames gedaan:

- de biomassa heeft dezelfde eigenschappen als bio-P slib;
- het aandeel fosfaat op basis van droge stof is 3,5% in bio-p slib. De 3,5% DS fosfaat bestaat uit 2% DS fosfaat in vastgelegde vorm (celmateriaal) en 1,5% DS biologisch vastgelegd fosfaat (intracellulair opgeslagen).

Wanneer het biologisch vastgelegd fosfaat volledig vrijkomt tijdens PHA-fermentatie, resulteert dit in een concentratie van circa 45 mg  $\text{PO}_4\text{-P}$  /l.

Nabehandeling van een fosfaatrijke stroom, in de vorm van struvietvorming, is aantrekkelijk wanneer voldoende stikstof aanwezig is, de pH rond de 7,5 ligt en de fosfaatconcentratie hoger is dan 50-60 mg  $\text{PO}_4\text{-P}$ /l (opgelost fosfaat) [34]. Omdat dit niet het geval is en omdat het volume van deze stroom <1% van het influent bedraagt (circa 140 m<sup>3</sup>/dag), kan de waterfractie afkomstig uit de PHA-fermentatie terug geleid worden naar de waterlijn. Additionele kosten door extra slibproductie vanwege extra chemische fosfaatverwijdering, zijn geïntegreerd in de economische analyse, zoals beschreven in hoofdstuk 5.

AFBEELDING 4.2 INVLOED PHA-PRODUCTIE (RICH) OP RWZI



Daarnaast produceert de PHA-opwerking op de centrale verwerkingslocatie de volgende twee afvalwaterstromen:

- circa 50 m<sup>3</sup> per batch met 7,5 g/l NaCl en 3,8 g/l NaOH (inclusief opgelost celmateriaal);
- circa 1 m<sup>3</sup> per batch met 20%<sub>v/v</sub> ethanol.

De stroom met NaOH, NaCl en opgelost CZV zal behandeld moeten worden. De CZV en stikstofvrachten zijn bepaald aan de hand van de volgende kentallen: 0,9 kg CZV/ kg DS en 50 gN/kg DS [37]. Een overzicht van de ingeschatte vrachten is weergegeven in tabel 4.2 en zijn gebaseerd op 900 kg ds/batch.

TABEL 4.2

AFVALWATERVRACHTEN NA CENTRALE PHA-OPWERKING, RICH CULTURE ROUTE

component	vracht (kg/dag)
CZV	4.900
Stikstof	270

Met onderstaande formule kunnen de concentraties stikstof en CZV (mg/l) en het debiet worden omgerekend naar i.e. equivalent, welke in deze situatie neer komt op 45.000 i.e. Additionele kosten voor de zuivering (aangenomen als zijnde een conventionele afvalwaterzuivering) van deze stroom zijn geïntegreerd in de economische analyse, zoals beschreven in hoofdstuk 5.

$$i. e. = \frac{((4,57 * N_{kj}) + CZV)}{136} * \text{geloosd debiet (m}^3\text{)}$$

De stroom met ethanol kan mogelijk aan de VFA-fermentatie en of slibgisting toegevoegd worden waardoor de VFA- en of biogasopbrengst verhoogd wordt. Een tweede optie voor de afvalwaterstroom met 20%<sub>v/v</sub> ethanol is de terugwinning van ethanol middels bijvoorbeeld een destillatieproces of membraantechnologie. Kosten of opbrengsten van deze relatief kleine stroom zijn niet verwerkt in de economische analyse.

#### 4.5.2 MIXED CULTURE

Omdat primair slib als koolstofbron wordt gebruikt en PHA-accumulerend biomassa onttrokken wordt uit de zuivering (surplusslib) heeft het implementeren van het productieproces op de rwzi in eerste instantie geen gevolgen voor de waterlijn; wel voor de slibverwerkingslijn.

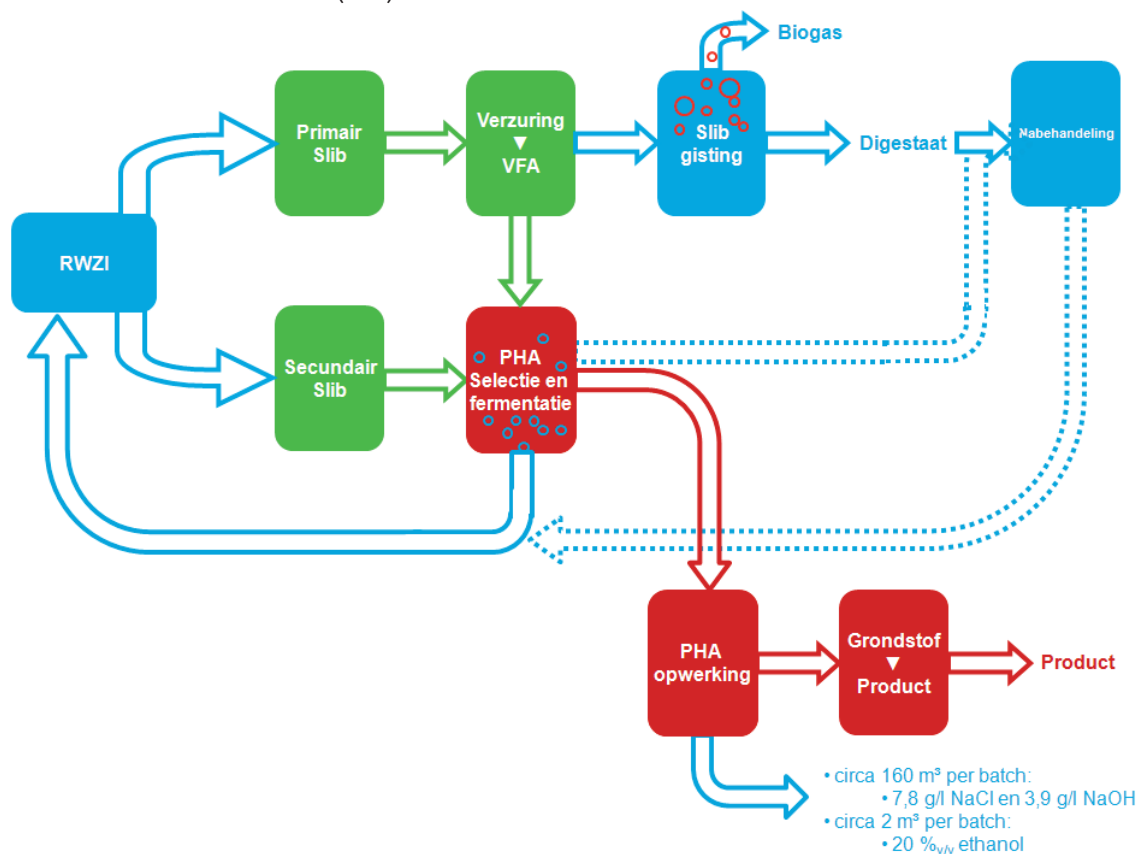
Door PHA-productie op een zuivering toe te passen wordt minder biogas geproduceerd omdat het primair slib en een deel van het secundaire slib wordt ingezet voor respectievelijk VFA-productie en als PHA-accumulerende biomassa (978 kg<sub>DS</sub>/dag). De referentiesituatie produceert 3.855 Nm<sup>3</sup> biogas/dag. Bij PHA-productie via de mixed culture route neemt dit af tot 2.688 Nm<sup>3</sup> biogas/dag. Omdat de bijbehorende warmteproductie niet voldoet aan de warmtevraag, als weergegeven in bijlage VII, wordt 421 Nm<sup>3</sup> biogas/dag rechtstreeks omgezet in warmte middels een biogasketel. Dit resulteert in een afname van elektriciteitsproductie met 3.725 kWh per dag. Het inzetten van biogas voor warmtevoorziening is enkel noodzakelijk voor de mixed culture route. Deze route maakt gebruik van grotere volumina, waardoor meer warmte nodig is vergeleken met de rich culture route.

Het PHA-productieproces middels de mixed culture is nogmaals schematisch weergegeven in afbeelding 4.3. Voor de berekening van de maximale fosfaatconcentratie zijn dezelfde aannames gebruikt als in paragraaf 4.5.1.

De waterfractie uit de PHA-fermentatie bevat in dit geval circa 180 mg PO<sub>4</sub>-P/l. Omdat de fosfaatconcentratie meer dan 60 mg PO<sub>4</sub>-P/l bedraagt, is struvietprecipitatie mogelijk als kan worden voldaan aan een voldoende hoge stikstofvracht en een pH van minimaal 7,5. Bekend is dat de stikstofvracht in het rejectiewater van de centrifuges na vergisting in het algemeen voldoende hoog is om fosfaat neer te slaan. Aangeraden wordt om, indien mogelijk, de nabehandeling van het rejectiewater na de gisting te combineren met de behandeling van de waterfractie uit de PHA-fermentatie (circa 120 m<sup>3</sup>/dag). Na deze deelstroombehandeling wordt het water teruggevoerd naar de rwzi.

Voor deze studie is aangenomen dat de extra fosfaatvracht die vrijkomt chemisch wordt vastgelegd, waarbij extra slib wordt geproduceerd. Additionele kosten door extra slibproductie zijn geïntegreerd in de economische analyse, als beschreven in hoofdstuk 5.

AFBEELDING 4.3 INVLOED PHA-PRODUCTIE (MIXED) OP RWZI



Daarnaast produceert de PHA-opwerking op de centrale verwerkingslocatie de volgende twee afvalwaterstromen:

- circa 160 m<sup>3</sup> per batch met 7,8 g/l NaCl en 3,9 g/l NaOH;
- circa 2 m<sup>3</sup> per batch met 20%<sub>v/v</sub> ethanol.

De CZV en stikstofvrachten van de stroom rijk aan NaCl, NaOH, CZV en stikstof zijn weergegeven in tabel 4.3 en zijn gebaseerd op 5.300 kg DS/batch.

TABEL 4.3 AFVALWATERVRACHTEN NA CENTRALE PHA-OPWERKING, MIXED CULTURE ROUTE

component	vracht (kg/dag)
CZV	28.400
Stikstof	1.600

Omgerekend naar i.e. equivalent, is dit 262.000 i.e. en vormt daarmee een aandachtspunt in een mogelijke vervolgstudie. In deze verkennende studie zijn additionele kosten voor de zuivering van deze stroom geïntegreerd in de economische analyse, als beschreven in hoofdstuk 5. Hergebruikopties met betrekking tot ethanol zijn dezelfde als in paragraaf 4.5.1.

#### 4.5.3 DUURZAAMHEID

De uitgevoerde verkennende studie betreft een haalbaarheidstudie. Omdat duurzaamheid een belangrijk thema is, zijn duurzaamheidsaspecten in het ontwerp zoveel mogelijk opgenomen. Echter, een kwantitatieve analyse door de PHA-productieprocessen te vergelijken met het conventionele PHA-productieproces bijvoorbeeld aan de hand van GER-waarden<sup>1</sup> is niet uitgevoerd. Wel kan gesteld worden dat de in deze studie voorgestelde PHA-productiemethoden

duurzamer zijn vergeleken met de conventionele PHA-productiemethode op de volgende punten:

- het gebruik van een afvalstof als grondstof (van primair slib naar VFA) in plaats van glucose, zetmeel of plantaardig olie als koolstofbron;
- het proces wordt bedreven onder niet steriele omstandigheden, in plaats van steriele fermentatie waardoor relatief veel energie wordt bespaard.

1 De GER-waarde staat voor 'Gross Energy Requirement' en drukt de primaire energie-inhoud van een materiaal uit, waarbij het energieverbruik in de gehele keten van winning tot productie van de stof is meegeteld. De GER-waarde is de som van chemische energie (ingesloten in gewonnen grondstoffen) en toegevoegde energie (brandstoffen, elektriciteit tijdens toegepaste processen) [38].

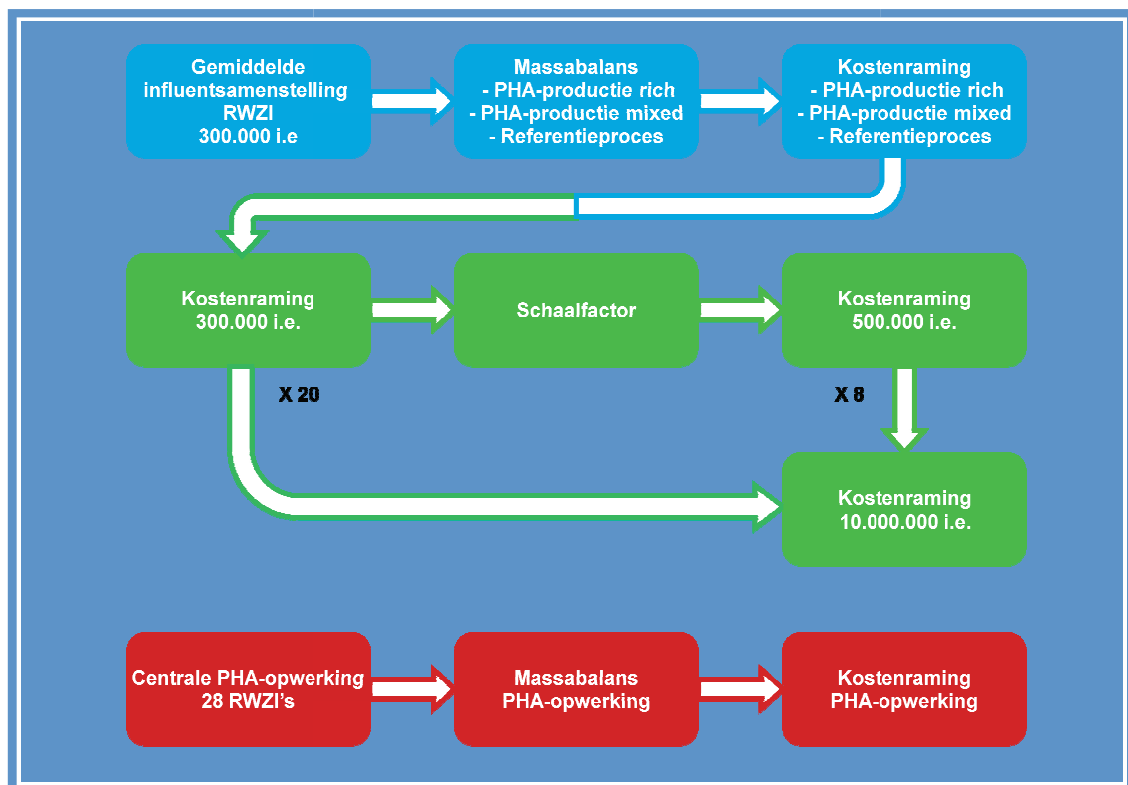
# 5

## ECONOMISCHE HAALBAALHEID

### 5.1 INTRODUCTIE

In dit hoofdstuk wordt de economische haalbaarheid omschreven aan de hand van een casestudie waarin is uitgegaan van 28 fictieve PHA-productielocaties (20 maal 300.000 i.e. en 8 maal 500.000 i.e. influent verwerkingscapaciteit). De PHA-opwerking wordt centraal uitgevoerd, waarbij de totale fictieve capaciteit 10.000.000 i.e. bedraagt. Slibverwerking door middel van vergisting (biogasproductie) is hierbij als referentieproces gebruikt.

De reden om een businesscase op te stellen met een totale fictieve capaciteit van 10.000.000 i.e. is dat circa 50 % van het zuiveringsarsenaal in Nederland (totaal circa 24.000.000 i.e.) is voorzien van gistinginstallaties. Omdat op deze locaties normaliter een voorbezinktank aanwezig is, zodat voorzien kan worden in primair slib, wordt met deze businesscase voor PHA-productie een goed beeld gegeven van de potentie om zuiveringsslib uit Nederland in te zetten voor bioplasticproductie. Omdat gistinginstallaties voornamelijk op grote en middelgrote rwzi's staan, is gekozen voor fictieve zuiveringen ter grootte van 300.000 en 500.000 i.e.



## 5.2 ECONOMISCHE ANALYSE

In deze paragraaf is de economische analyse van de casestudie nader uitgewerkt. Het betreft een analyse van de 28 fictieve rwzi's met een gezamenlijke fictieve capaciteit van 10.000.000 i.e. De ontworpen PHA-opwerking heeft de capaciteit om de volledige hoeveelheid PHA op te zuiveren tot grondstof, waarmee een schaalvoordeel wordt gecreëerd ten opzichte van kleine decentrale opwerkingfaciliteiten op elke rwzi. De uitgangspunten voor de kostenraming zijn weergegeven in bijlage 8. Voor alle geraamde kosten geldt een nauwkeurigheid van  $\pm 50\%$ .

### 5.2.1 JAARLIJKSE KOSTEN

In deze paragraaf zijn de jaarlijkse kosten weergegeven van zowel de mixed en rich culture route, als van het referentieproces. Waar mogelijk is een onderscheid gemaakt tussen kosten gerelateerd aan PHA-productie, PHA-opwerking en slibverwerking door vergisting. Een overzicht van de jaarlijkse kosten is weergegeven in tabel 5.1. De bedragen betreffen de totale jaarlijkse kosten voor de gezamenlijke productiecapaciteit en hebben betrekking op de rich culture route, de mixed culture route, en de referentiesituatie. Hierin zijn tevens de transportkosten, de kosten voor afvalwaterverwerking van de PHA-opwerking en de kosten voor de additionele fosfaatverwijdering (zie paragraaf 4.5) meegenomen. De gedetailleerde opbouw van deze kosten is opgenomen in bijlage 9 en wordt nader behandeld in paragraaf 5.3.4.

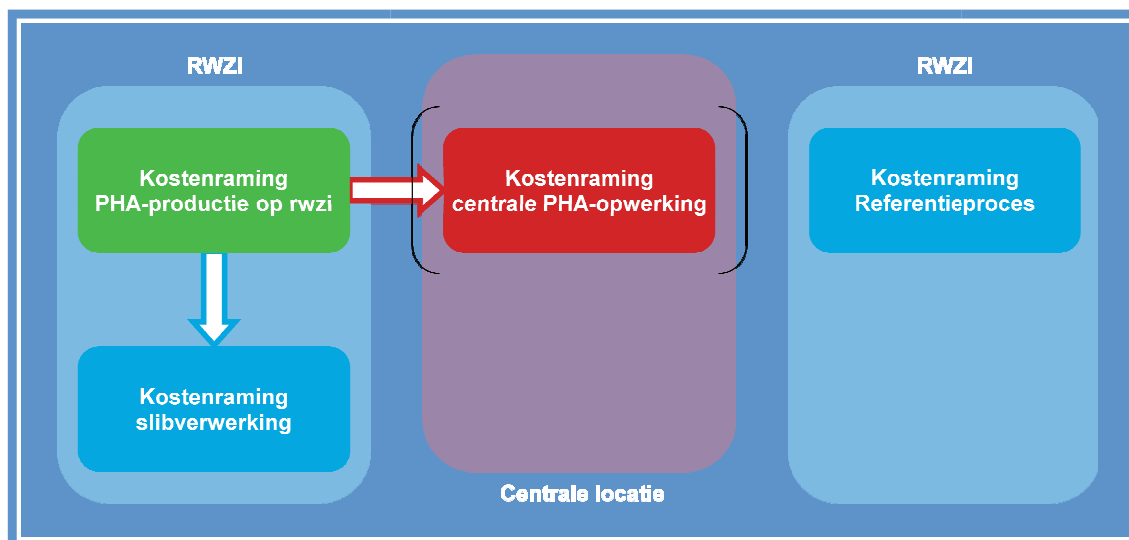
TABEL 5.1 JAARLIJKSE KOSTEN VOOR TOTALE PRODUCTIECAPACITEIT PER ROUTE

	rich culture EUR/jaar	mixed culture EUR/jaar	referentieproces EUR/jaar
Slibverwerking (gisting)	78.920.000,-	73.590.000,-	90.120.000,-
PHA-productie*	26.870.000,-	27.770.000,-	0,-
VFA-productie	15.330.000,-	15.320.000,-	0,-
Biomassa productie	2.940.000,-	0,-	0,-
PHA-fermentatie	8.600.000,-	12.450.000,-	0,-
PHA-opwerking	5.270.000,-	16.600.000,-	0,-
Personeel**	2.080.000,-	2.080.000,-	0,-
Totaal	113.140.000,-	120.040.000,-	90.120.000,-

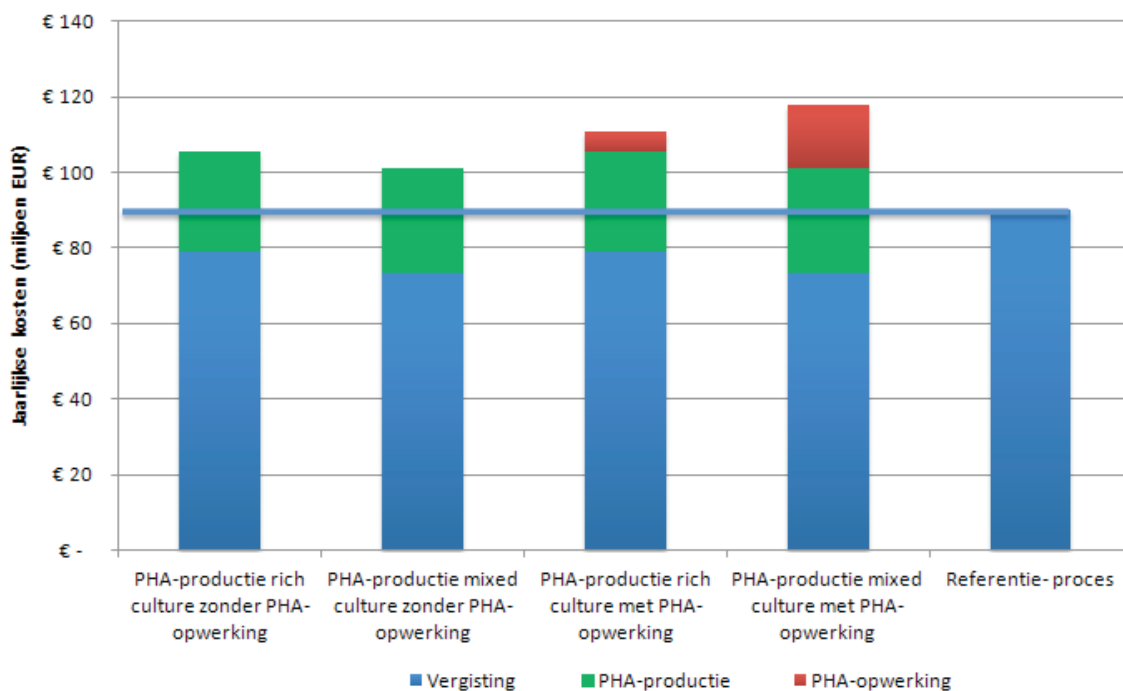
\* paragraaf 5.2.4 beschrijft een gevoeligheidsanalyse met betrekking tot deze kostenverdeling

\*\*personeelskosten m.b.t. het referentieproces zijn meegenomen in de totale jaarlijkse kosten van de slibverwerking

De waarden uit tabel 5.1 zijn gevisualiseerd in afbeelding 5.1. In afbeelding 5.1 wordt daarnaast een onderscheid gemaakt in de kosten die jaarlijks op alleen de zuivering worden gemaakt en kosten van het gehele PHA-productieproces, inclusief de jaarlijkse kosten van de centrale PHA-opwerkingslocatie. De methodiek is hieronder gevisualiseerd.



AFBEELDING 5.1 JAARLIJKSE KOSTEN VOOR TOTALE PRODUCTIECAPACITEIT PER ROUTE



De opbouw van de jaarlijkse kosten per route is weergegeven in tabel 5.2. Het gaat om de totale jaarlijkse kosten van de gezamenlijke locaties.

Tabel 5.3 geeft een uitsplitsing van de jaarlijkse kosten van de centrale PHA-opwerking weer (als benoemd in tabel 5.2).



TABEL 5.2 OPBOUW JAARLIJKSE KOSTEN

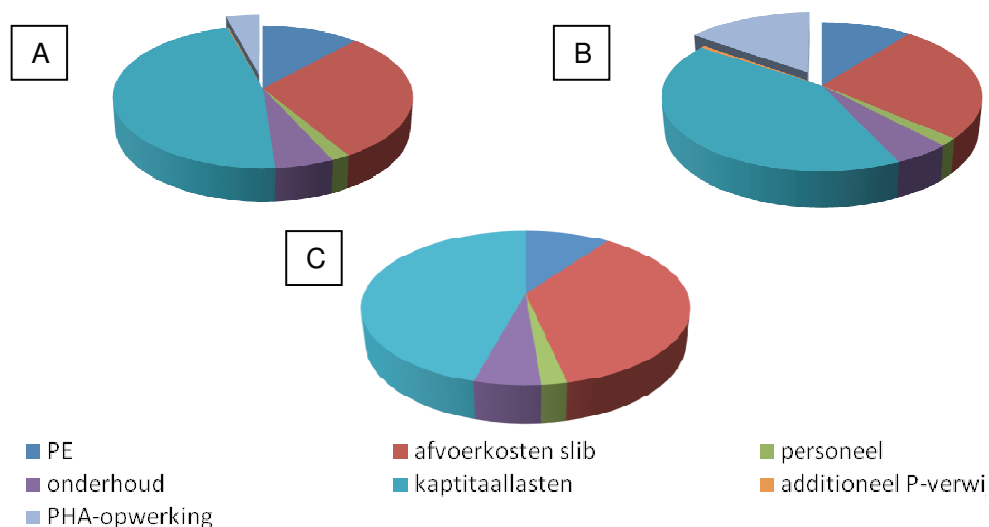
	rich culture EUR/jaar	mixed culture EUR/jaar	referentieproces EUR/jaar
PE-verbruik	13.730.000,-	13.120.000,-	9.650.000,-
Afvoerkosten slib	34.460.000,-	32.300.000,-	35.870.000,-
Personeel	2.080.000,-	2.080.000,-	2.080.000,-
Onderhoud	6.550.000,-	6.090.000,-	5.430.000,-
Kapitaallasten	54.280.000,-	50.480.000,-	45.010.000,-
Additionele P-verwijdering	240.000,-	820.000,-	-
PHA-opwerking	5.270.000,-	16.600.000,-	-
Elektriciteit	-3.480.000,-	-1.450.000,-	-7.930.000,-
Totaal	113.140.000,-	120.040.000,-	90.110.000,-

TABEL 5.3 OPBOUW JAARLIJKSE KOSTEN PHA-OPWERKING

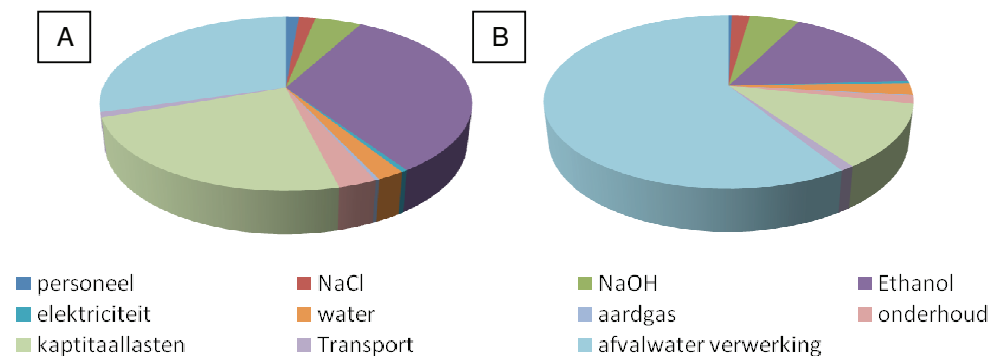
	rich culture EUR/jaar	mixed culture EUR/jaar
Personeel	65.000,-	65.000,-
NaCl	92.000,-	309.000,-
NaOH	259.000,-	870.000,-
Ethanol	1.748.000,-	3.111.000,-
Elektriciteit	25.000,-	72.000,-
Water	107.000,-	361.000,-
Aardgas	15.000,-	27.000,-
Onderhoud	144.000,-	264.000,-
Kapitaallasten	1.190.000,-	2.186.000,-
Afvalwater verwerking	1.577.000,-	9.168.000,-
Transport naar productielocatie	51.000,-	171.000,-
Totaal	5.270.000,-	16.600.000,-

De waarden uit tabel 5.2 en tabel 5.3 zijn gevisualiseerd in afbeelding 5.2 en afbeelding 5.3.

AFBEELDING 5.2 VISUALISATIE OPBOUW JAARLIJKSE KOSTEN VAN RICH CULTURE ROUTE (A), MIXED CULTURE ROUTE (B) EN REFERENTIEPROCES (C)



AFBEELDING 5.3 VISUALISATIE OPBOUW JAARLIJKSE KOSTEN PHA-OPWERKING VAN RICH CULTURE ROUTE (A) EN MIXED CULTURE ROUTE (B)



### 5.2.2 JAARLIJKSE KOSTEN PHA-PRODUCTIE, GROENE WEIDE

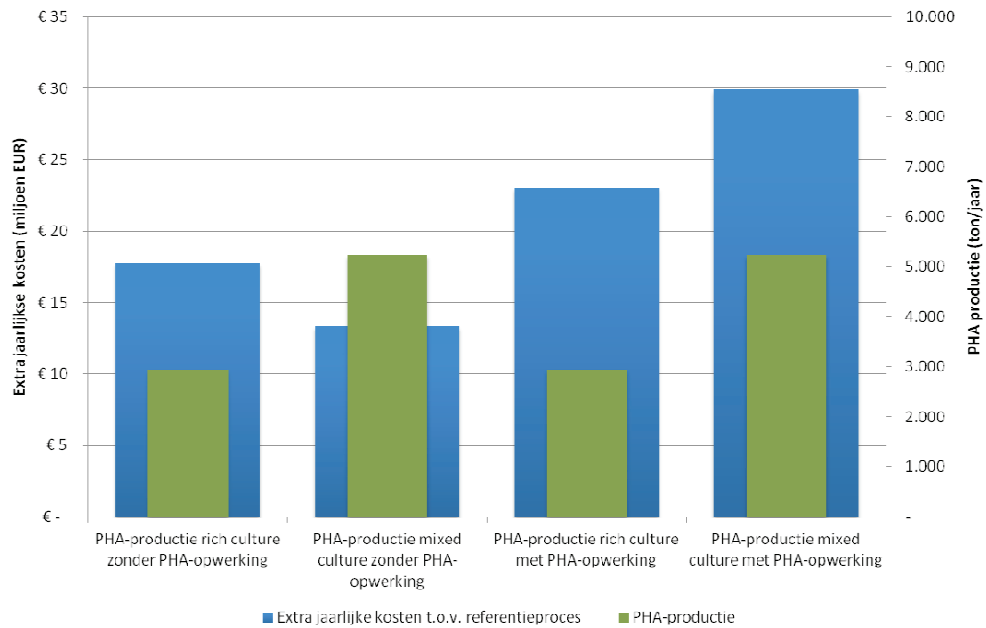
In deze paragraaf wordt ingegaan op de vergelijking tussen PHA-productie, met en zonder PHA-opwerking, en het referentieproces. Afbeelding 5.1 geeft de totale jaarlijkse kosten weer voor beide PHA-productie routes en voor het referentieproces. Het betreft hier kosten die gemaakt worden bij nieuwbouw, de zogenoemde groene weidevariant. Uit deze figuur is op te maken dat extra geïnvesteerd moet worden om PHA te produceren ten opzichte van het referentieproces (alle kosten boven de lijn in afbeelding 5.1). Omdat slibverwerking door vergisting als referentieproces functioneert, worden de jaarlijkse kosten van het referentieproces afgetrokken van de jaarlijkse kosten van beide PHA-productieroutes. Het verschil wordt in afbeelding 5.4 benoemd als 'Extra jaarlijkse kosten'. Omdat de hoeveelheid geproduceerd PHA bekend is, wordt inzicht verkregen in de indicatieve kostendekkende verkoopprijs. Zowel de extra jaarlijkse kosten (EUR/jaar) als de PHA-productie (ton/jaar) zijn gevisualiseerd in afbeelding 5.4 op respectievelijk de primaire en secundaire as.

**Groene weide:** de totale kosten van de referentiesituatie worden in mindering gebracht op de totale kosten van de PHA-productie.

**PHA-productieproces zonder opwerking:** Het productieproces exclusief PHA-opwerking; wanneer deze jaarlijkse kosten worden gedeeld door het aantal geproduceerde kilo's PHA resulteert dit in de kostendekkende verkoopprijs van PHA-rijk biomassa (ruw) dat nog opwerking behoeft.

**PHA-productieproces met PHA-opwerking:** Het productieproces inclusief PHA-opwerking; wanneer deze jaarlijkse kosten worden gedeeld door het aantal geproduceerde kilo's PHA resulteert dit in de kostendekkende verkoopprijs van PHA als grondstof (puur).

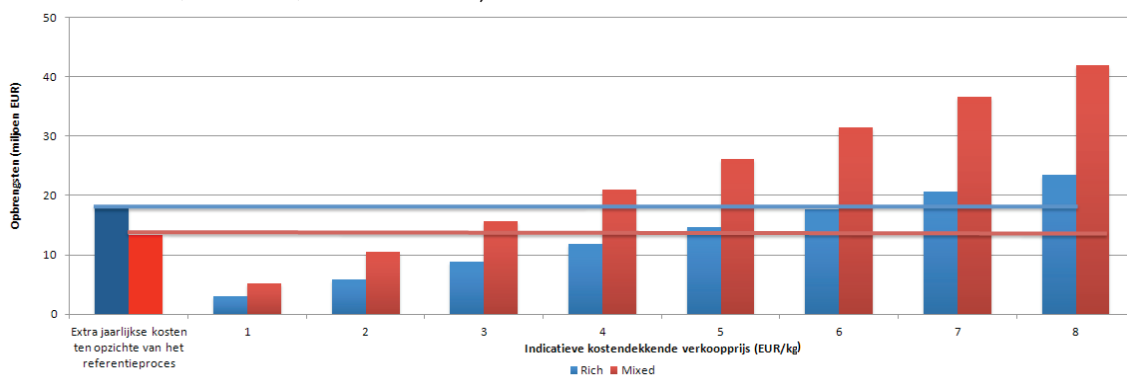
AFBEELDING 5.4 EXTRA JAARLIJKSE KOSTEN TEN OPZICHTE VAN REFERENTIEPROCES EN DE PHA-PRODUCTIE (RICH EN MIXED, MET EN ZONDER PHA-OPWERKING)



Aan de hand van de jaarlijks geproduceerde tonnages PHA (2.840 en 5.240 voor respectievelijk de rich en mixed culture route) en de extra jaarlijkse kosten ten opzichte van het referentieproces (EUR 17.750.000,- en EUR 13.315.000,- voor respectievelijk de rich en mixed culture route zonder verdere opwerking (ruw product); EUR 23.020.000,- en EUR 29.920.000,- voor respectievelijk de rich en mixed culture route met PHA-opwerking (puur product)) wordt de indicatieve kostendekkende PHA-prijs berekend.

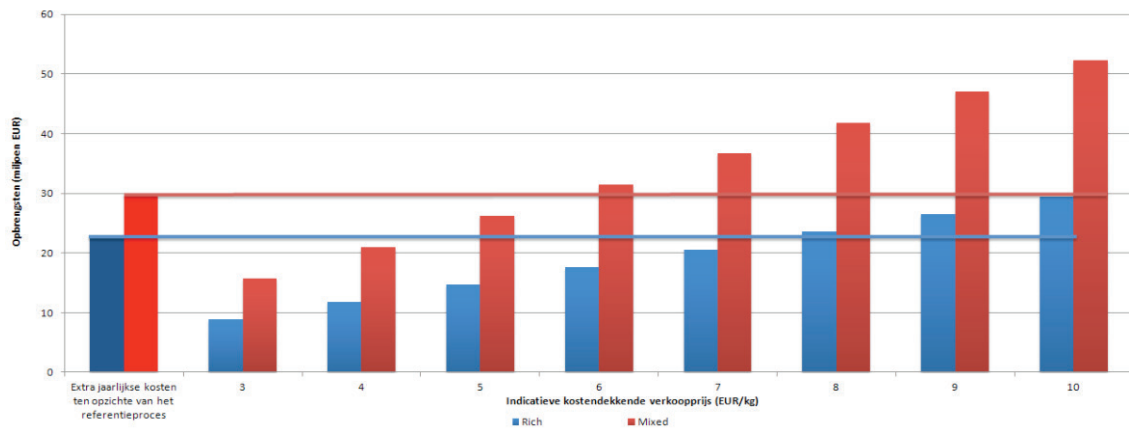
Om een inzicht te verkrijgen in de PHA-productiekosten zonder de PHA-opwerking, is het break even point van de PHA-rijke biomassa weergegeven in afbeelding 5.5 (EUR/kgPHA). Hieruit is op te maken dat de indicatieve kostendekkende verkoopprijs van PHA-rijke biomassa 2,5 EUR/kg PHA bedraagt voor de mixed culture route. De indicatieve kostendekkende verkoopprijs van PHA-rijke biomassa met betrekking tot de rich culture route is 6,0 EUR/kg PHA.

AFBEELDING 5.5 BREAK EVEN POINT PHA-PRODUCTIEROUTES ZONDER PHA-OPWERKING (RUW PRODUCT), GROENE WEIDE (RICH CULTURE; JAARLIJKS 2.940 KG PHA, MIXED CULTURE; JAARLIJKS 5.240 KG PHA)



Het break even point, de indicatieve verkoopprijs waarmee de jaarlijkse kosten van PHA-productie uit zuiveringsslib inclusief PHA-opwerking volledig worden gedekt, is voor beide PHA-productieroutes weergegeven in afbeelding 5.6. Voor PHA-productie met de mixed culture route is de indicatieve kostendekkende verkoopprijs EUR 5,7. Het toepassen van de rich culture route resulteert in een indicatieve kostendekkende verkoopprijs van EUR 7,8/kg.

AFBEELDING 5.6 BREAK EVEN POINT PHA-PRODUCTIEROUTES INCLUSIEF PHA-OPWERKING (PUUR PRODUCT), GROENE WEIDE (RICH CULTURE; JAARLIJKS 2.940 KG PHA, MIXED CULTURE; JAARLIJKS 5.240 KG PHA)

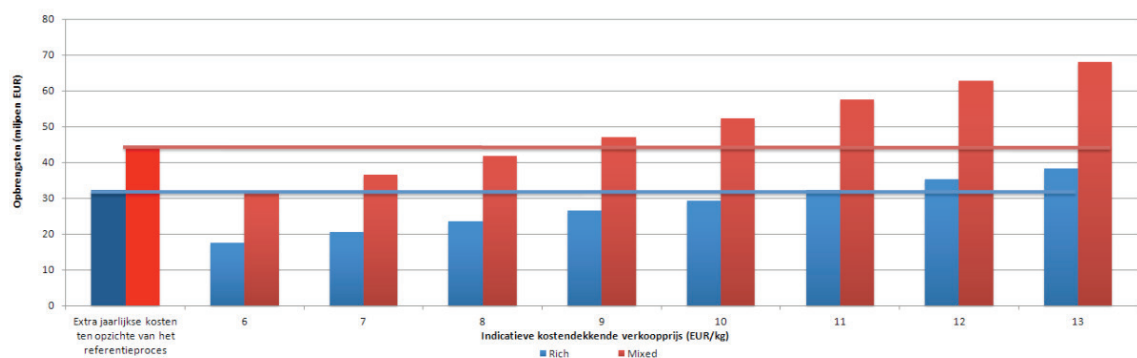


### 5.2.3 JAARLIJKSE KOSTEN PHA-PRODUCTIE, BESTAANDE SLIBVERWERKING DOOR VERGISTING

Niet voor elke zuivering geeft de groene weidevariant een realistisch beeld, omdat op vrijwel alle rwzi's met voorbezinking reeds capaciteit geïnstalleerd is om de organische stof uit zuiveringsslib om te zetten tot biogas. Om deze reden geeft deze paragraaf de kosten weer voor de situatie waarin de bestaande slibverwerking door vergisting gehandhaafd blijft en PHA-productie wordt geïmplementeerd. Hierbij moet worden opgemerkt dat de bestaande slibverwerking op ondercapaciteit bedreven wordt wanneer niet gecorrigeerd wordt voor de verminderde slibvracht. In deze studie is geen rekening gehouden met eventuele additionele biogasproductie door de aanvoer van extern slib of door de extra gecreëerde verblijftijd. De jaarlijkse kosten betreffen nu de jaarlijkse kosten voor PHA-productie en PHA-opwerking (jaarlijkse kosten voor slibverwerking zijn niet meegewogen). De kilogrammen geproduceerd PHA blijven gelijk aan de beschreven waarden uit paragraaf 5.2.2.

Om een inzicht te verkrijgen in de PHA-productiekosten zonder de PHA-opwerking, op een rwzi met een bestaande biogaslijn, is het break even point van het PHA-rijke biomassa weergegeven in afbeelding 5.7. Hieruit is op te maken dat de indicatieve kostendekkende verkoopprijs van PHA-rijk biomassa 5,3 EUR/kg PHA bedraagt voor de mixed culture route. De indicatieve kostendekkende verkoopprijs van PHA-rijk biomassa met betrekking tot de rich culture route is 9,1 EUR/kg PHA.

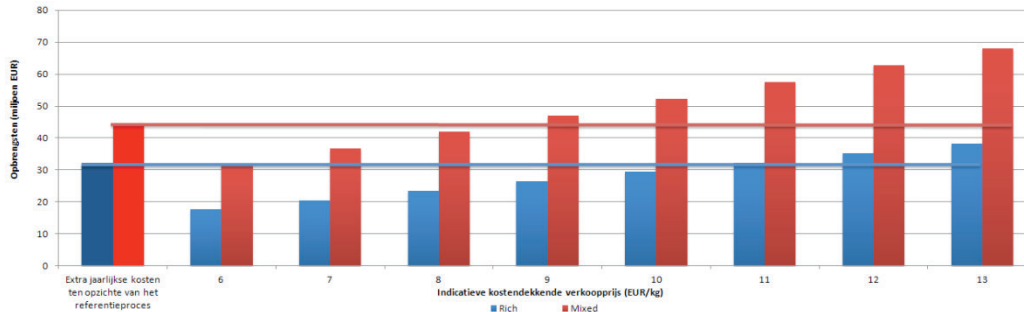
AFBEELDING 5.7 BREAK EVEN POINT PHA-PRODUCTIEROUTES ZONDER PHA-OPWERKING (RUW PRODUCT), BESTAANDE BIOGASLIJN (RICH CULTURE; JAARLIJKS 2.940 KG PHA, MIXED CULTURE; JAARLIJKS 5.240 KG PHA)



Het break even point voor beide volledige PHA-productieroutes, is weergegeven in afbeelding 5.8. Het gaat hierbij om de kosten inclusief PHA-opwerking. Voor PHA-productie met de mixed

culture route is de indicatieve kostendekkende verkoopprijs EUR 8,5 per kg product. Het toepassen van de rich culture route resulteert in een indicatieve kostendekkende verkoopprijs van EUR 10,9 per kg product.

**AFBEELDING 5.8. BREAK EVEN POINT PHA-PRODUCTIEROUTES INCLUSIEF PHA-OPWERKING (PUUR PRODUCT), BESTAANDE BIOGASLIJN (RICH CULTURE; JAARLIJKS 2.940 KG PHA, MIXED CULTURE; JAARLIJKS 5.240 KG PHA)**



De indicatieve kostendekkende verkoopprijs in de situatie waarin de bestaande slibverwerking door vergisting gehandhaafd blijft ligt hoger in vergelijking met de groene weidevariant. Dit is te verklaren doordat de slibverwerking in de groene weidevariant kleiner gedimensioneerd is in vergelijking met het referentieproces, omdat een deel van het slib ingezet wordt voor PHA-productie. Omdat de totale kosten van het referentieproces in mindering worden gebracht op de totale kosten van PHA-productie en -opwerking inclusief slibverwerking door vergisting, worden de kosten van de PHA-productie en -opwerking deels verdisconteerd door de hogere jaarlijkse kosten van slibverwerking door vergisting in het referentieproces (zie afbeelding 5.1). In de situatie met een bestaande gisting moeten de totale jaarlijkse kosten van de PHA-productie en -opwerking volledig worden bekostigd met de verkoop van PHA.

#### 5.2.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN HET PHA-PRODUCTIEPROCES OP BASIS VAN DE KOSTENVERDELING PER DEELPROCES.

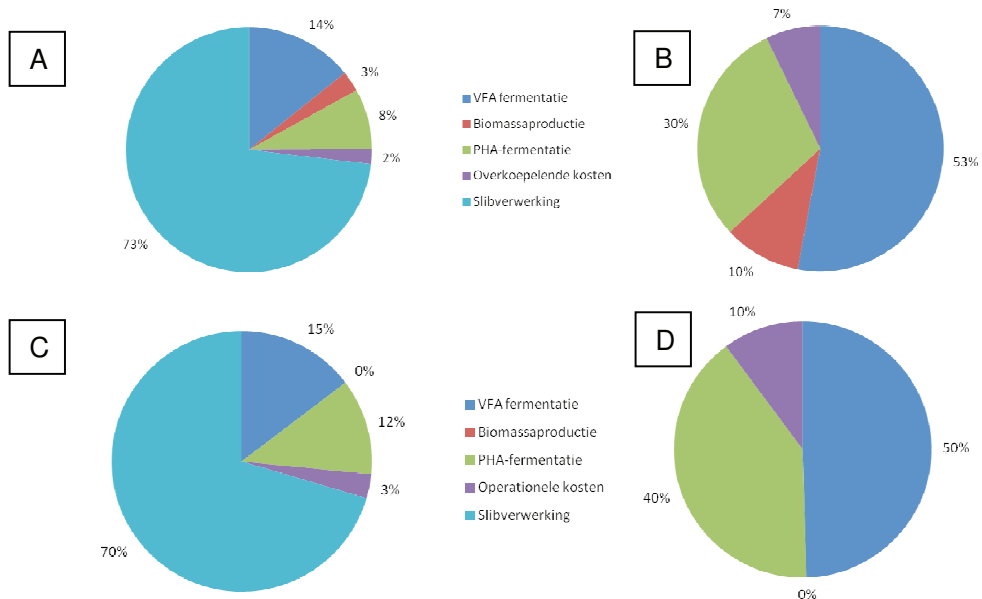
Om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de financiële analyse voor de gehanteerde aannamen, is het proces PHA-productieproces opgedeeld in de volgende deelprocessen:

- VFA-fermentatie;
- biomassaproductie;
- PHA-fermentatie;
- slibverwerking door vergisting;
- overkoepelende kosten (personeelskosten).

De kosten per deelproces zijn in detail uitgewerkt in bijlage 9, voor een fictieve rwzi van 300.000 i.e. In afbeelding 5.9 is de verdeling van de jaarlijkse kosten per route weergegeven. Hieruit blijkt dat de VFA-productie en de eigenlijke PHA-productie de meeste kosten met zich meebrengen (samen circa 25 %) na slibverwerking door vergisting (circa 70 %). De overige kosten, biomassaproductie en personele kosten zijn samen goed voor circa 5 %. De reden dat de slibverwerking het deelproces is met het grootste kostenaandeel, wordt verklaard door het feit dat alleen primair slib als koolstofbron wordt toegepast. Hierdoor kan niet al het aanwezige secundaire slib ingezet worden voor PHA-productie (slechts circa 15 %). Daarnaast kan het primaire slib worden navergist waardoor een beperkte slibreductie wordt bewerkstelligd ten opzichte van de huidige situatie. Echter deze slibverwerkingskosten worden in de groene weide variant niet meegewogen in de indicatieve kostendekkende PHA-prijs omdat de slibverwerkingskosten in het referentieproces hoger zijn. Hierdoor vallen de kosten voor de

PHA-productie in deze variant juist lager uit, het verschil tussen de slibverwerkingskosten uit de case en het referentieproces worden namelijk afgetrokken van de totale kosten van de PHA-productie (zie hiervoor afbeelding 5.1). Ook in de situatie van een bestaande slibverwerking worden deze kosten niet meegewogen in de indicatieve kostendeckende PHA-prijs omdat de slibverwerking reeds is geïnstalleerd. Om deze reden is in afbeelding 5.9 ook de verdeling weergegeven van jaarlijkse kosten zonder slibverwerking.

AFBEELDING 5.9 VERDELING VAN DE KOSTEN PER DEELPROCES (PHA-PRODUCTIE ZONDER OPWERKING); RICH CULTURE ZONDER SLIBVERWERKINGSKOSTEN (A), RICH CULTURE MET SLIBVERWERKINGSKOSTEN (B), MIXED CULTURE MET SLIBVERWERKINGSKOSTEN (C) EN MIXED CULTURE ZONDER SLIBVERWERKINGSKOSTEN (D)



In tabel 5.4 is per deelproces het aandeel van de totale indicatieve kostendeckende verkoopprijs per kg PHA weergegeven. Het gaat hierbij om de variant zonder PHA-opwerking (ruw product), uitgaande van een bestaande slibverwerking door vergisting.

TABEL 5.4 AANDEEL VAN DE DEELPROCESSEN OP DE TOTALE INDICatieve KOSTENDECKENDE VERKOOPPRIJS PER KG PHA; INCLUSIEF PHA-OPWERKING EN BESTAANDE SLIBVERWERKING DOOR VERGISTING

Parameter	Eenheid	Rich	Mixed
VFA-fermentatie	EUR/kg PHA	4,8	2,7
biomassaproductie	EUR/kg PHA	0,9	-
PHA-fermentatie	EUR/kg PHA	2,7	2,1
overkoepelende kosten	EUR/kg PHA	0,6	0,5
Totaal	EUR/kg PHA	9,1	5,3

Deze uitkomst pleit ervoor om optimalisatieslagen door te voeren in de deelprocessen VFA-productie en PHA-productie. Deze deelprocessen hebben namelijk een groot aandeel in de totale indicatieve kostendeckende verkoopprijs. Bij VFA-fermentatie is pH-regulatie een voorbeeld van een optimalisatiemogelijkheid die de specifieke opbrengst (kgVFA/kgVSS) zou kunnen verhogen. Het verhogen van de specifieke VFA-opbrengst resulteert in een reductie van de productiekostenkosten per kilogram VFA. Op dit moment zijn de kosten per kilogram VFA circa EUR 1,2 (zie hiervoor de massabalans in bijlage 5 en de opbouw van de jaarlijkse kosten per deelproces in bijlage 9).

Ook resulteert een verhoogde specifieke opbrengst (kgVFA/kgVSS) in een hogere biomassaconcentratie bij de rich culture route, waardoor bespaard wordt binnen het deelproces PHA-productie. Doordat minder verdunning van biomassa op treedt na het toevoegen van de VFA-rijker stroom, wordt een bacteriecultuur met een hogere concentratie verkregen. Dit resulteert in een kleinere installatie en daarmee een besparing op investeringskosten. Daarnaast levert een hogere VFA-productie meer PHA-productie op. Omdat de verkoop van meer PHA meer inkomsten genereert, wordt daarmee een lagere kostendeekkende verkoopprijs verwacht.

Een andere optie die kostenverlaging kan bewerkstelligen is het inkopen van een geconcentreerde koolstofbron, bijvoorbeeld geconcentreerd acetaat. Deze koolstofbron dient goedkoper te zijn dan EUR 1,2 per kg VFA. Echter, de manier waarop deze grondstof is verkregen bepaald de duurzaamheid van het uiteindelijk geproduceerde PHA.

Daarnaast is optimalisatie van de specifieke PHA-opslagcapaciteit mogelijk. Dit vindt plaats in het deelproces 'PHA-fermentatie' maar heeft ook effect op de opwerkingskosten. Uit afbeelding 5.1 is op te maken dat met name de mixed culture route gebaat is bij een extra besparing op de opwerkingskosten, de verhouding PHA-productiekosten en PHA-opwerkingskosten is 60:40 (bij de rich culture route is deze verhouding 80:20). In de volgende paragraaf wordt deze mogelijkheid nader toegelicht.

#### 5.2.5 OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN

Zoals in de voorgaande paragraaf is gebleken, is de VFA-productie een belangrijk deelproces wanneer het gaat om kostenbesparing. De hoeveelheid geproduceerd VFA, bepaalt de hoeveelheid biomassa die opgekweekt kan worden (rich culture route) of de hoeveelheid secundair slib die ingezet kan worden (mixed culture route). Op deze manier wordt ook de uiteindelijke hoeveelheid geproduceerd product bepaald. Om deze reden is in deze studie een fictieve optimalisatiestap doorgevoerd, waarbij de VFA-productie (gVFA/gVSS) is verhoogd van 0,25gVFA/gVSS naar 0,35 gVFA/gVSS.

Het resultaat is een reductie in de indicatieve kostendeekkende verkoopprijs van EUR 7,8 tot EUR 5,8 en van EUR 5,7 tot EUR 4,9 voor respectievelijk de rich en mixed culture route inclusief PHA-opwerking voor de groene weidevariant. De variant met een bestaande slibverwerking door vergisting daalt van EUR 10,9 tot EUR 8,2 en van EUR 8,5 tot EUR 7,1 voor respectievelijk de rich en mixed culture route inclusief PHA-opwerking. Deze reductie bevestigt het nut om nader onderzoek te verrichten naar een geoptimaliseerde vorm van VFA-fermentatie.

Zoals blijkt uit de voorgaande paragraaf, resulteert een toename in PHA-opslagcapaciteit ook in een kostprijsreductie. Wanneer de PHA-opslagcapaciteit van de rich culture route toeneemt van 60% DS naar 80% DS resulteert dit in een reductie van de indicatieve kostendeekkende verkoopprijs van EUR 7,8 tot EUR 5,5 en van EUR 10,9 tot EUR 7,8 voor respectievelijk de groene weidevariant en de variant met een bestaande slibverwerking door vergisting bij de rich culture route inclusief PHA-opwerking. Wanneer de PHA-opslagcapaciteit vergroot wordt van 40 % VSS naar 60% VSS, wordt de indicatieve kostendeekkende verkoopprijs gereduceerd van EUR 5,7 tot EUR 4,9 en van EUR 8,5 tot EUR 6,9 per kg PHA voor respectievelijk de groene weidevariant en de variant met een bestaande slibverwerking door vergisting bij de mixed culture route inclusief PHA-opwerking. Ook uit deze fictieve optimalisatie blijkt dat optimalisatie resulteert in een lagere indicatieve kostendeekkende verkoopprijs. Om deze reden is het aantrekkelijk om nader onderzoek te verrichten naar een geoptimaliseerde vorm

van PHA-accumulatie. Een combinatie van beide optimalisatiestappen resulteert uiteindelijk in een nog grotere reductie in de indicatieve kostendekkende verkoopprijs.

De hierboven genoemde optimalisatiemogelijkheden komen voort uit de gevoeligheidsanalyse van het PHA-productieproces op basis van de kostenverdeling per deelproces. Er zijn echter meer mogelijkheden om tot een kostenreductie te komen, de mogelijkheden worden hieronder puntsgewijs toegelicht.

Toepassing van hogere drogestofgehalten binnen de verschillende processen:

- De VFA-productie vindt plaats bij 4% DS, omdat gekozen is voor een gravitaire indikstap. Wanneer een mechanische indikstap wordt toegepast kunnen hogere DS-gehalten (4 - 10 % DS) behaald worden en ontstaat er tevens een hoger geconcentreerde VFA-stroom. Dit betekent dat er minder reactorvolume gebouwd hoeft te worden, wat resulteert in lagere kapitaallasten en daarmee in een goedkoper product. De kanttekening hierbij is dat wanneer de ontwatering van het slib na VFA-fermentatie niet wordt verhoogd, er evenveel VFA-rijk water met het slib wordt afgevoerd. Echter, een hogere concentratie VFA's in dit water resulteert daarbij wel in een groter VFA-verlies.
- Ook de biomassaconcentratie in de slibcultuur tanks (rich culture route) en/of in de PHA-productietank (rich en mixed culture route) kan door indikking worden verhoogd ter verlaging van de kapitaallasten. Hierbij dient wel rekening gehouden te worden met voldoende zuurstofoverdracht (met een stijgend DS-gehalte daalt de specifieke zuurstofoverdracht, terwijl de zuurstofvraag wordt verhoogd door de aanwezigheid van meer biomassa). Met andere woorden, de zuurstofoverdracht bepaalt de maximale biomassa concentratie.

Toepassen van gecontroleerde nutriëntlimitatie

- Het is bekend dat micro-organismen meer PHA opslaan onder nutriëntlimiterende omstandigheden. Door de VFA-rijke stroom te ontdoen van bijvoorbeeld fosfaat, door neerslagreactie met een metaal of door struvietprecipitatie, is het potentieel mogelijk een hogere PHA-opslagcapaciteit te behalen. Dit resulteert in hogere opbrengsten per reactorvolume, waardoor de kostprijs van PHA uit slib zal dalen. Hierbij moet de besparing voldoende opwegen tegen de kosten voor deze extra processtap.

Toepassen van bioraffinage

- Een andere mogelijkheid om kosten te reduceren is het toepassen van het concept 'bioraffinage'. Hierbij wordt niet alleen PHA uit de cellen geëxtraheerd maar ook overige nuttige producten zoals lipiden, nutriënten en energie. De opbrengsten van deze producten kunnen kostprijs verlagend werken voor PHA. Hierbij is de keuze van PHA-opwerkingstechniek cruciaal (solvent extractie van PHA leidt tot een residu waar in potentie nutriënten uit terug gewonnen worden, wanneer het niet-PHA-materiaal grotendeels wordt opgelost in een natronloogoplossing is het concept bioraffinage niet meer mogelijk).

Voor deze verkennende studie is niet voor elk van bovengenoemde optimalisatiestappen de invloed op de indicatieve kostendekkende verkoopprijs doorgerekend. Wel blijkt dat er nog voldoende optimalisatiemogelijkheden zijn, die kunnen leiden tot een verdere productiekostenreductie en daarmee verlaging van de indicatieve kostendekkende verkoopprijs van PHA.



De optimalisatiemogelijkheden uit paragraaf 5.2.4 en 5.2.5 samengevat:

Optimalisatiemogelijkheden	Invloed op het deelproces		
	VFA-reactor	PHA-reactor	PHA-opwerking
Specifieke opbrengst verhogen (kgVFA/kgVSS)	X	X	
Inkopen geconcentreerde koolstofbron < EUR 1,20	X	X	
Specifieke PHA-opslagcapaciteit verhogen (kgPHA/kg DS)		X	X
Biomassa/slib concentratie verhogen	X	X	
Bioraffinage toepassen			X

### 5.3 ECONOMISCHE ANALYSE; RWZI BATH

In voorgaande paragrafen is een businesscase opgesteld voor een aantal fictieve rwzi's. In deze paragraaf wordt een additionele route beschreven die specifiek voor rwzi Bath van Waterschap Brabantse Delta van toepassing is. Deze route en de invloed op de economische haalbaarheid wordt in deze paragraaf beschreven in d.

#### 5.3.1 WATERSCHAP BRABANTSE DELTA; RWZI BATH

De rwzi Bath is een conventionele rwzi met eigen slibverweking door vergisting (in 2 slibgistingtanks van elk 5000 m<sup>3</sup>). Per jaar komt 3.600 ton DS aan primair slib vrij, na een eerste indikstap bevat deze slibstroom 4,5 % DS. De secundaire slibstroom omvat 4.500 ton DS per jaar. De concentratie uit de nabezinktank varieert tussen 0,5 en 1 % DS. Na een eerste indikstap bevat deze stroom 6% DS. Omdat rwzi Bath chemische fosfaatverwijdering toepast is het ODS gehalte van dit slib lager in vergelijking met het hiervoor beschreven uitgangspunt (70 %), namelijk 65%.

#### 5.3.2 RWZI BATH; INKOPEN VAN KOOLSTOFBRON

Rwzi Bath heeft de mogelijkheid om vluchtige vetzuren in te kopen. In deze variant wordt het effect beschreven wanneer de koolstofbron voor PHA-productie volledig extern wordt aangevoerd om de volledige hoeveelheid secundair slib in te kunnen zetten voor PHA-productie. Dit heeft de volgende gevolgen:

- het primair slib wordt niet ingezet voor VFA-fermentatie maar direct vergist, hierdoor vervallen de kosten voor VFA-fermentatie;
- de koolstofbron wordt als externe bron aangevoerd, dit brengt additionele kosten met zich mee, ingeschat door het waterschap als 0,25 cent per kg VFA;
- het secundair slib wordt volledig ingezet voor PHA-productie waardoor ruimte in de gisting vrijkomt:
  - aangenomen is dat deze beschikbare ruimte wordt opgevuld met extern slib, zodat geen kapitaalvernietiging van de slibverwerkinginstallatie optreedt. Voor het invoeren van extern slib zijn geen additionele kosten berekend;
  - aangenomen is dat geen additionele stikstof- en fosfaatverwijdering plaats vindt, doordat dezelfde hoeveelheid slib wordt vergist ten opzichte van de huidige situatie;
  - de installatie voor PHA-fermentatie wordt circa 12 maal groter in vergelijking met de fictieve rwzi uit de businesscase.

Bovenstaande omschrijving vertaalt zich naar de waarden als weergegeven in tabel 5.5.

TABEL 5.5 SITUATIE BATH, PHA-PRODUCTIE UIT BESCHIKBAAR SECUNDAIR SLIB

Parameter	Eenheid	Waarde
Secundair slib rwzi Bath	ton DS/jaar	4.500
Secundair slib rwzi Bath	kg DS/dag	12.300
ODS-gehalte	%	65
Secundair slib rwzi Bath	kg VSS/dag	8.000
PHA-opslagcapaciteit	% VSS	40
PHA-productie	kg PHA/dag	5.300
VFA-rendement	kgPHA/kgVFA	0,43
VFA benodigd	kg/dag	12.300
Concentratie VFA	g/l	30
VFA benodigd	m <sup>3</sup> /dag	410

Met de gegevens uit tabel 5.5 zijn kosten in te schatten die gelden voor deze specifieke situatie, zie hiervoor tabel 5.6

TABEL 5.6 SITUATIE BATH, INKOPEN VAN VFA

Parameter	Eenheid	Waarde
VFA-inkoopprijs	€/kg	0,25
VFA-kosten	€/dag	3.100
VFA-kosten	€/jaar	1.132.000
Jaarlijkse kosten PHA-fermentatie kapitaallasten en onderhoud* (5.342 kg PHA/dag); rwzi Bath	€/jaar	2.006.000
Jaarlijkse totale kosten PHA-fermentatie (5.342 kg PHA/dag); rwzi Bath	€/jaar	3.299.200
Personeelskosten	€/fte/jaar	65.000
Personeelskosten*	€/jaar	467.500
Totaal	€/jaar	4.899.000
Indicatieve kostendekkende verkoopprijs per kg PHA (PHA-rijk biomassa)	€/kg	2,5

\* Voor deze kosten is gebruik gemaakt van de volgende schaalfactor:

$$Kosten\ 5300\ kg\ PHA = \frac{kosten\ 450\ kg\ PHA}{\left(\frac{kosten\ 450\ kg\ PHA}{kosten\ 5300\ kg\ PHA}\right)^{0,8}}$$

Waarbij de kosten voor de productie van 450 kg PHA de kosten betreffen als berekend in de businesscase (mixed culture route 300.000 i.e.). Getallen zijn hieronder nogmaals weergegeven:

Jaarlijkse totale kosten PHA-fermentatie (circa 450 kg PHA/dag); case	€/jaar	388.700
Jaarlijkse kosten PHA-fermentatie kapitaallasten en onderhoud (circa 450 kg PHA/dag); case	€/jaar	278.900

Uit bovenstaande tabellen blijkt dat in deze specifieke situatie de kostendekkende verkoopprijs voor het PHA-rijke celmateriaal circa EUR 2,5 per kg PHA-bedraagt. Dit is significant lager vergeleken met de mixed culture route zonder PHA-opwerking in de situatie met een bestaande slibverwerking door vergisting, EUR 5,7 per kg PHA.

Hierbij moet worden vermeld dat kosten voor een VFA-bufler voor de opslag van extern VFA niet zijn meegerekend. Deze additionele kosten zullen naar verwachting een relatief kleine invloed hebben op de uiteindelijke indicatieve kostendekkende verkoopprijs.

Uit dit voorbeeld blijkt dat de lokale situatie en de schaalgrootte invloed hebben op de uiteindelijke indicatieve kostendekkende verkoopprijs per kg PHA. Daarnaast laat dit voorbeeld

zien dat de huidige fermentatiekosten van primair slib naar VFA resulteren in een hogere kostendeckende verkoopprijs (circa EUR 1,2 per kg VFA) in vergelijking met zowel de huidige marktprijs voor VFA-rijk afvalstromen (EUR 0,25 per kg VFA; waterschap Brabantse Delta) als ook voor de marktprijs van bijvoorbeeld azijnzuur (EUR 600-800 per ton; [38]).

# 6

## CONCLUSIES, VISIE EN AANBEVELINGEN

### 6.1 CONCLUSIES

#### **BASISKENNIS OVER PHA**

De eerste doelstelling van dit verkennende onderzoek was het verzamelen van basis kennis over PHA-productie. Samenvattend kan gesteld worden dat:

- Polyhydroxyalkanoaten lineaire polyesters zijn die geproduceerd worden door micro-organismen, waarbij de geproduceerde polymeren intracellulair worden opgeslagen in specifieke compartimenten. Een deel van de micro-organismen in een biologische waterzuivering is reeds in staat om PHA op te slaan. Selectiemethoden als het 'feast en famine' principe en de 'anaerobe-aerobe' methode kunnen worden toegepast om deze specifieke organismen te selecteren door te sturen op een competitief voordeel van deze organismen ten opzichte van overige organismen.
- Er in hoofdlijnen twee manieren zijn om op een rwzi te voorzien in biomassa die in staat is om PHA op te slaan, namelijk:
  - 'mixed culture' route; geconditioneerd secundair slib inzetten als biomassa, waarbij VFA's, verkregen uit de verzuring van primair slib, tijdens de PHA-fermentatie worden ingezet als koolstofbron voor PHA-productie;
  - 'rich culture' route; biomassaproductie onder continue selectiedruk, door gebruik te maken van een deel van de verkregen VFA's uit de verzuring van primair slib. Het overige deel van de VFA's wordt ingezet voor PHA-productie tijdens de PHA-fermentatie.
- Deze verkennende studie naar de mogelijkheid van PHA-productie uit communaal zuiveringsslib laat zien dat PHA-productie technisch mogelijk is. De technologische haalbaarheid wordt bevestigd door diverse onderzoeken, waaronder de pilotproeven van AnoxKaldnes en TU Delft.

#### **PHA-MARKT EN TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN;**

De tweede doelstelling van dit verkennende onderzoek was het in kaart brengen van de PHA-markt inclusief toepassingsmogelijkheden. Gesteld kan worden dat:

- De bioplasticmarkt groeiende is (30-40 % per jaar tot 2016); verwacht wordt dat de productiecapaciteit in 2016 circa 5.800 kton bedraagt. Voor de wereldwijde PHA-productiecapaciteit wordt een toename verwacht van 19 kton in 2011 tot 145 kton PHA in 2016. De potentiële PHA-productie uit Nederlands zuiveringsslib (5.2 kton/jaar) heeft daarmee relatief weinig invloed op de verwachte wereldwijde PHA-markt in 2016.
- De huidige marktprijs circa EUR 4,- tot EUR 5,- per kilogram biopolymeer bedraagt, waarbij de toepassing varieert van medische producten tot land- en tuinbouw toepassingen.

Marktpartijen geven aan dat toepassing van PHA economisch aantrekkelijk wordt, wanneer de grondstofprijs circa EUR 3,- per kilogram biopolymeer bedraagt (gewenste marktprijs).

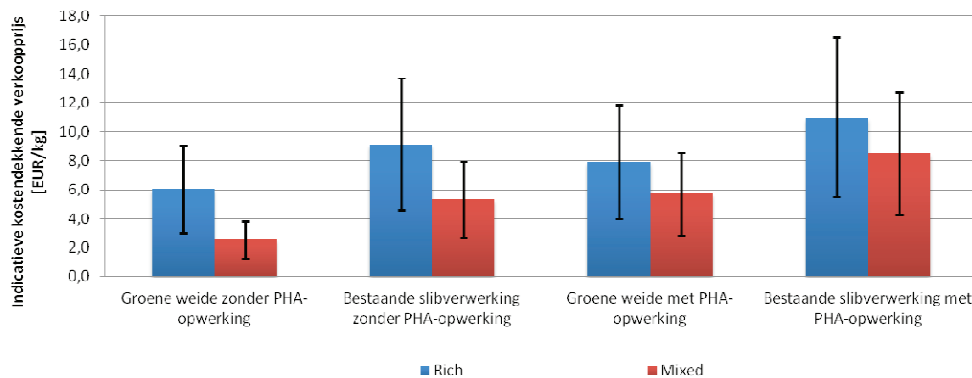
#### VERKENNING VAN DE TECHNISCHE EN ECONOMISCHE HAALBAARHEID;

Het derde doel van deze verkennende studie was het uitvoeren van een verkenning met betrekking tot de technische en economische haalbaarheid van bioplastieproductie, inclusief de invloed van het PHA-productieproces op het functioneren van de rwzi.

Geconcludeerd kan worden dat:

- De mixed culture route uit economisch oogpunt de voorkeur heeft boven de rich culture route, hoewel ook deze route op dit moment economisch niet haalbaar is. Het resultaat van alle varianten is geïllustreerd in afbeelding 6.1.

AFBEELDING 6.1 INDICATIEVE KOSTENDEKKENDE VERKOOPPRIJS VAN PHA (RICH EN MIXED ROUTE; RUW EN PUUR PRODUCT)



- De lokale situatie invloed heeft op de haalbaarheid van PHA-productie. Reeds beschikbare apparatuur of gebouwen of de mogelijkheid om een VFA-rijke stroom in te kopen zijn voorbeelden van factoren die de haalbaarheid voor een specifieke locatie positief beïnvloeden. Dit wordt bevestigd door de additionele case voor rwzi Bath, waar het inkopen van vetzuren en schaalgroottevoordeel resulteren in een indicatieve kostendekkende verkoopprijs van EUR 2,5 van PHA-rijk biomassa (zonder PHA-opwerking; ruw product). Verder moet vermeld worden dat de benoemde kostendekkende verkoopprijzen indicatief zijn omdat alle geraamde bedragen een nauwkeurigheid hebben van  $\pm 50\%$ . Daarnaast zijn aannames gedaan welke nog niet getoetst konden worden aan praktijkresultaten.
- De kostenraming voor de PHA-opwerking vooralsnog een onzekere factor is. Voor deze studie is uitgegaan van een methode waarvan niet precies bekend is of deze toepasbaar is op het verkregen product en of de rendementen uit de literatuur haalbaar zijn in de praktijk. Daarnaast komt bij de PHA-opwerking een significante hoeveelheid afvalwater vrij dat gezuiverd dient te worden. Ook is het waarschijnlijk niet mogelijk om eventueel nuttige componenten uit het cel materiaal te winnen (bioraffinage), omdat de overige biomassa (niet-PHA-materiaal) grotendeels wordt opgelost en vrijkomt als afvalwaterstroom.
- Wanneer de PHA-opwerking centraal wordt uitgevoerd, de invloed van PHA-productie op de rwzi relatief klein is. Doordat VFA's in deze businesscase worden geproduceerd uit primair slib en in het geval van de mixed culture route een deel van het secundair slib (circa 15 %) wordt gebruikt, neemt de biogasproductie, en daarmee de productie van warmte en

elektriciteit, af met 25 - 30%. Daarnaast komt op de rwzi additioneel een relatief kleine afvalwaterstroom vrij (< 1% van het influent). Deze afvalwaterstroom bevat mogelijk fosfaat dat vrijkomt tijdens PHA-accumulatie. Wanneer deze fosfaatvracht chemisch wordt verwijderd resulteert dit in extra slibproductie.

- Bij de PHA-opwerking een relatief grote afvalstroom vrijkomt die voornamelijk bestaat uit opgelost CZV, NaCl en NaOH. Dit is alleen van toepassing wanneer het PHA-opwerkingsproces wordt ingezet die als uitgangspunt dient voor deze studie. De centrale PHA-opwerking levert met de ze techniek naar verwachting een afvalstroom van ongeveer 45.000 en 262.000 i.e. voor respectievelijk de rich- en mixed culture route. Het toepassen van een alternatieve opwerkingsmethode resulteert in een andere afval(water)samenstelling.

## 6.2 VISIE

De verwachte productietoename van bioplastic is veelbelovend. Of de werkelijke groei de prognose zal volgen, is niet zeker. Kostenreductie, duurzaamheid en innovatie zijn invloedsfactoren die de groei van bioplasticproductie beïnvloeden. Daarnaast zijn externe invloedsfactoren op de groei en economische haalbaarheid te benoemen welke in de toekomst mogelijk veranderen, namelijk:

- wet- en regelgeving wordt aangepast, waardoor het gebruik van bioplastic voor bepaalde producten verplicht wordt gesteld;
- grondstofprijzen stijgen, waardoor het produceren van producten uit afval aantrekkelijker wordt;
- elektriciteitsprijs stijgt, waardoor PHA-productie uit zuiveringsslib ten opzichte van de huidige referentie (slibverwerking door vergisting) duurder wordt.
- elektriciteitsprijs daalt, waardoor PHA-productie uit zuiveringsslib ten opzichte van de huidige referentie (slibverwerking door vergisting) goedkoper wordt

De beschreven PHA-productieroutes uit zuiveringsslib voldoen in ieder geval aan het bevorderen van duurzaamheid, innovatie en de zoektocht naar nieuwe grondstoffen. Om deze redenen verdient deze productieroute nadere beschouwing, ook al is deze route op dit moment economisch nog niet haalbaar en zijn externe invloedsfactoren moeilijk te voorspellen.

Redenerend vanuit de technologie, kan gesteld worden dat:

- de mixed culture route de voorkeur heeft wanneer het gaat op de optimale omzetting van koolstofbron naar PHA. Echter, de verminderde PHA-opslagcapaciteit van deze biomassa, resulteert in hogere zuiveringskosten;
- wanneer PHA-accumulerende biomassa niet voorhanden is, PHA-productie via de rich culture route moet plaatsvinden. Hierdoor wordt niet de complete koolstofbron effectief omgezet in PHA. Wel resulteert de hogere PHA-opslagcapaciteit in lagere PHA-opwerkingskosten.

Dit leidt tot de volgende conclusie: wanneer de hogere PHA-opwerkingskosten opwegen tegen de extra inkomsten gegenereerd uit de grotere hoeveelheid te produceren PHA en wanneer PHA-accumulerende biomassa aanwezig/inzetbaar is, gekozen dient te worden voor de mixed culture route.

Redenerend vanuit de markt, kan gesteld worden dat:

- de wensen van eindgebruiker in kaart moeten worden gebracht, specifiek voor een bepaalde (groep) toepassing(en);
- het PHA-productieproces via backward integration moet worden opgezet, gelet op de gewenste kwaliteitseisen van het product.

Dit laatste betekent dat de processen PHA-opwerking, PHA-productie (micro-organismen/procesvoering) en de afval(water)stroom achtereenvolgens moeten worden geselecteerd aan de hand van vooraf opgestelde (kwaliteits)eisen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat meer onderzoek zal moeten worden verricht naar de invloed van de PHA-opwerkingsmethode, de invloed van PHA-productie (rich culture, mixed culture of conventioneel) en de invloed van de koolstofbron en afval(water)stroom op de kwaliteit van het eindproduct.

De grootste risico's die op dit moment volwaardige implementatie van de in deze rapportage behandelde PHA-productieroutes in de weg staan, zijn productkwaliteit en prijs:

- Op dit moment wordt verwacht dat PHA uit zuiveringsslib als eerste toepasbaar is als biologisch afbreekbaar plastic voor land- en tuinbouw toepassingen, omdat veelal uitgegaan wordt van technologiegedreven in plaats van markt gedreven ontwikkelingen. Deze verwachting is gebaseerd op twee redenen: het biopolymeer is vervaardigd uit zuiveringsslib, een reststroom die in Nederland onder de afvalstoffenwetgeving valt en de variatie in slibkwaliteit resulteert in variatie in vetzuursamenstelling en daarmee in een variërende productkwaliteit. Marktpartijen geven aan dat stabiele productkwaliteit gewenst is voor hoogwaardige toepassingen.
- Marktpartijen geven aan dat toepassing van PHA mogelijk wordt wanneer de grondstofprijs de gewenste marktprijs van circa EUR 3,- per kilogram biopolymeer benaderd.

Gelet op het voorgaande vergen deze aspecten nadere verdieping buiten de scope van deze verkenning en dus zal in de toekomst onderzoek moeten plaatsvinden waarbij de producteisen van de eindgebruiker als uitgangspunt worden gehanteerd. Op deze manier is het mogelijk een product te produceren van de juiste kwaliteit met betrekking tot beoogde toepassingsmogelijkheid en de daarbij behorende grondstofprijs (verkoopprijs voor PHA).

De kansen liggen in het doorvoeren van optimalisatieslagen binnen het productieproces, waarbij het maximaliseren van de VFA-productie, intracellulaire PHA-opslag en het selecteren van een geschikte PHA-opwerkingsmethode het meest noodzakelijk/kansrijk worden geacht. Deze optimalisatieslag heeft idealiter het concept 'backward integration' als uitgangspunt.

Samenwerking met andere partijen biedt hierbij perspectief. Het gaat om partijen uit de gehele bioplastic-keten, van grondstofleverancier tot plasticproducent. Voorbeelden hiervan zijn partijen die producteisen kunnen definiëren of partijen die kunnen voorzien in organisch reststromen die eenvoudig ingezet kunnen worden voor VFA's productie. Het betrekken van de gehele keten zorgt ervoor dat voor elke partij een win-win situatie mogelijk wordt en dat een product wordt gedefinieerd waarvan kwaliteit en prijs op elkaar afgestemd zijn.

### 6.3 AANBEVELINGEN

De routekaart afvalwaterketen en het achterliggende document met uitgewerkte actielijnen geven een ontwikkelingstraject weer tot 2030 onderverdeeld in 3 perioden.

- De periode van 2012 tot 2015 wordt gekenmerkt door onderzoek en kennisopbouw omtrent bioplastics. Het gaat hierbij om inzichten in sterke en zwakke punten met betrekking tot inputstromen, technieken en output stromen.
- In de periode van 2015 tot 2020 staat het experimenteren met bioplasticproductie en het opstarten van een demonstratie-installatie centraal.
- Het inrichten van een full-scale productie zou plaats kunnen vinden in de periode van 2020 tot 2030 indien uit het onderzoek met de demonstratie-installatie blijkt dat economisch rendabele en/of duurzame bioplasticproductie mogelijk is.

Deze rapportage vormt een stevige basis wanneer het gaat om de kennisopbouw die volgens de routekaart plaats dient te vinden in de periode 2012 tot 2015. Daarnaast kan de informatie uit dit rapport, inclusief de aanbevelingen voor nader onderzoek en de ontwikkelde visie, dienen als uitgangspunt voor het opzetten van strategische experimenten in de periode 2015 tot 2020. Vervolgens kan een demonstratie-installatie, binnen deze periode, inzicht geven in de gevoeligheid en beheersbaarheid van het proces inclusief de kwaliteit van het eindproduct. Deze paragraaf beschrijft de onderwerpen die nader onderzoek behoeven, gebaseerd op de routekaart afvalwaterketen en de informatie als beschreven in deze rapportage.

Deze verkennende studie geeft een indicatie van de economische haalbaarheid. PHA-productie door middel van de mixed culture route heeft, voor deze specifieke case, de meeste potentie. De indicatieve kostendekkende verkoopprijs komt uit op EUR 6,2 per kg PHA, wanneer wordt uitgegaan van de groene weidevariant en EUR 8,9 per kg PHA met een bestaande slibverwerking door vergisting als uitgangspunt. Omdat de huidige marktprijs zich bevindt tussen EUR 4,- tot EUR 5,- en de gewenste marktprijs circa EUR 3,- per kilogram PHA bedraagt, is PHA-productie uit zuiveringsslib op dit moment niet haalbaar. Wel zijn er verschillende optimalisatieslagen te behalen, zoals is gebleken uit de paragrafen 5.3.4 en 5.3.5. Daarom wordt aanbevolen om tot en met 2015 nader onderzoek te verrichten naar:

- het maximaliseren van de VFA-productie uit slib:
  - door meer vluchtige vetzuren uit primair slib te vervaardigen ontstaat een grotere vracht aan koolstofbron die ingezet kan worden voor de productie van PHA. Daarnaast resulteert een geconcentreerdere VFA-stroom in verminderde investeringskosten doordat PHA-fermentatie met een hogere biomassaconcentratie mogelijk wordt. Wanneer de extra operationele kosten voor de optimalisatie van de VFA-productie (bijvoorbeeld voor pH-regulatie) lager zijn dan de extra opbrengst verkregen door verhoogde PHA-opbrengst, wordt de kostprijs gereduceerd;
- de toepassingsmogelijkheden van VFA-productie uit overige organische reststromen:
  - op dit moment is VFA-productie uit alleen primair slib de limiterende stap; door meer VFA's uit andere reststromen te vervaardigen kan meer secundair slib worden ingezet wat leidt tot extra PHA-productie en mogelijk kostenreductie;
  - daarnaast leidt het toepassen van andere organische reststromen wellicht tot een andere samenstelling van de koolstofbron (type VFA) en daarmee in andere producteigenschappen;



- ook uit secundair slib kan VFA vervaardigd worden; echter, de conversiefactor van VSS naar VFA is lager vergeleken met primair slib. Om deze reden wordt niet aanbevolen om nader onderzoek te verrichten naar additionele VFA-productie uit secundair zuiveringslib, omdat de huidige productieprijs uit primair slib per kg VFA relatief hoog is (circa EUR 1,2 / kg VFA);
- het verhogen van de PHA-opslagcapaciteit van de biomassa:
  - een verhoogde intracellulaire PHA-opslag heeft met name invloed op de PHA-opwerking. Een hogere concentratie PHA verlaagt de zuiveringskosten doordat de zuivering kleiner kan worden gedimensioneerd en minder chemicaliën nodig zijn;
  - een opwerkingsmethode die geschikt is voor het opwerken van PHA uit biomassa, waarbij gelet moet worden op prijs, rendement, zuiverheid (bijvoorbeeld de aanwezigheid van zware metalen), vrijkomende afvalstromen (milieubelasting) en de mogelijkheid van hergebruik met betrekking tot hulpstoffen en reststromen (celmateriaal).

Geadviseerd wordt om een onderzoekstraject op te zetten waarin alle bovenstaande optimalisatie grondslagen nader worden onderzocht en op pilot schaal worden getoetst. Daarnaast wordt aanbevolen om in dit onderzoekstraject ook het aspect backward integration toe te passen, waarbij de juiste technieken worden geselecteerd om tot een product te komen dat voldoet aan de eisen van de eindgebruiker. Omdat de kwaliteit en uniformiteit van de verkregen PHA's bepalend is voor de producteigenschappen en de toepassingsmogelijkheden, is het essentieel dat hierbij analyses worden uitgevoerd op het verkregen product.

Omdat de conclusie van deze studie enkel op kosten is gebaseerd en niet op duurzaamheid, wordt aangeraden om de duurzaamheid van de geoptimaliseerde PHA-productie- en opwerkingsroute te vergelijken met slibverwerking door vergisting, bijvoorbeeld aan de hand van levenscyclusanalyse (LCA).

Vervolgens kan, bij voldoende potentie, een demonstratie-installatie worden opgestart in de periode 2015 tot 2020.

## 7

## REFERENTIES

1. PlasticEurope, 'First estimates suggest around 4% increase in plastics global production from 2010,' 2012. Verkregen via: <http://www.plasticseurope.org/information-centre/press-room-1351/press-releases-2012/first-estimates-suggest-around-4-increase-in-plastics-global-production-from-2010.aspx>, geopend in 2013.
2. J. Choi en S. Y. Lee, 'Factors affecting the economics of polyhydroxyalkanoate production by bacterial fermentation', *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 51, nr. 1, pp. 13-21, 1999.
3. B. Römgens & E. Kruizinga, 'Visiebrochure: Routekaart afvalwaterketen tot 2030', Routekaart Afvalwaterketen, 2012.
4. C. Bolck, J. Ravenstijn, K. Molenveld en P. Harmsen, 'Biobased plastics 2012', Wageningen UR, 2012.
5. S. Lee, 'Plastic bacteria? progress and prospects for polyhydroxyalkanoate production in bacteria', *Trends in Biotechnology*, Elsevier Science, vol. 14, pp. 431-438, 1996.
6. Vincotte, 'Onze logo's-OK Biodegradable SOIL en OK Biodegradable WATER- Wat betekenen ze?', verkregen via: <http://www.okcompost.be/data/pdf-document/Doc-24n-a-OK-Biodegradable-S-W-Betekenis-van-de-logos.pdf>, geopend in 2013.
7. Vincotte, 'OK compost en gebruik van logo's', verkregen via: <http://www.okcompost.be/data/pdf-document/Doc%2031n-a-%20-%20Gebruik%20van%20het%20logo%20OK%20biobased.pdf>, geopend in 2013.
8. Metcalf Eddy. Inc., *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, New York: MCGraw-Hil, 2003.
9. STOWA, *Handboek biologische fosfaatverwijdering*, vol. 15, 2001.
10. H. Salehizadeh en M. v. Loosdrecht, 'Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance', *Biotechnology Advances*, vol. 22, pp. 216-279, 2004.
11. European Bioplastics; 'Institute for Bioplastics and Biocomposites', Oktober 2012. verkregen via: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, geopend in 2013.
12. PlasticEurope, 'Plastics – the Facts 2012 An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011,' 2012, verkregen via: [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20121120170458-final\\_plasticsthefacts\\_nov2012\\_en\\_web\\_resolution.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20121120170458-final_plasticsthefacts_nov2012_en_web_resolution.pdf), geopend in 2013.

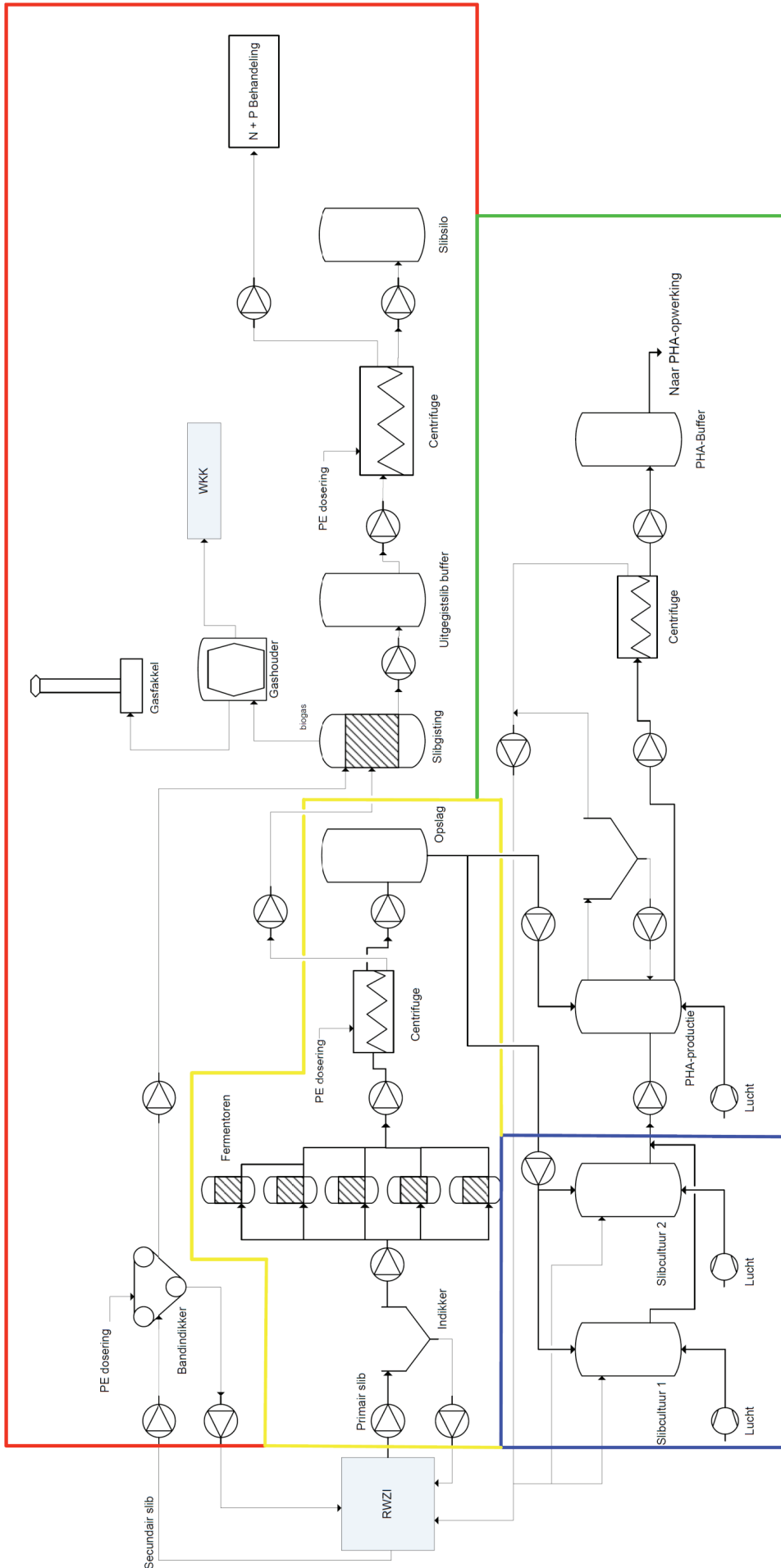
13. L. Jetten, B. Merckx, J. Krebbekx en G. Duivenvoorde, 'Onderzoek kunststof afdankstromen in Nederland,' December 2011, verkregen via: <http://www.agentschapnl.nl/sites/default/files/bijlagen/Onderzoek%20kunststof%20afdankstromen%20in%20Nederland%20-%20december%202011.pdf>, geopend in 2013.
14. European Bioplastics; Institute for Bioplastics and Biocomposites, Juni 2013, verkregen via: <http://en.european-bioplastics.org/market/market-development/market-drivers/>, geopend in 2013.
15. J. v. Soest, Rodenburg Biopolimers, Interview, 22 Maart 2013.
16. C. Bolck, Wageningen UR, Interview, 05 Maart 2013.
17. M. v. Loosdrecht en R. Kleerebezem, TU Delft, Interview, 20 Maart 2013.
18. H. Messia, 'Italy to ban plastic bags in New Year,' CNN, 31 December 2010.
19. G. Wales, 'Retailers', Verkregen via: <http://www.carrierbagchargewales.gov.uk/retailers/?lang=en>, geopend in 2013.
20. M. Thielen, 'Bioplastics Basics, Applications, Markets', Mönchengladbach: Polymedia Publisher GmbH, 2012.
21. T. Sieprath, 'Hoogwaardige microbiële lipiden uit secundaire grondstofstromen', Gent, 2011.
22. E. Rasenberg, 'Bacteriën op dieet maken bioplastic van afvalwater', Chemie Megazine, 01-10-2013, No. 5349
23. X. Zhang, R. Luo, Z. Wang, Y. Deng en G.-Q. Chen, 'Application of (R)-3-Hydroxyalkanoate Methyl Esters Derived from Microbial Polyhydroxyalkanoates as Novel Biofuels', Biomacromolecules, nr. 10, pp. 707-711, 2009.
24. A.G. Werker, AnoxKaldnes, schriftelijke communicatie, 2013.
25. S. Anterrieu, L. Quadri, J. Raap, C. Meeuwissen, B. Fetter and A. Werker. 'Biomass biopolymer potential from water treatment' Water21, pp. 38-39, June 2013.
26. M. v. Loosdrecht, TU Delft, schriftelijke communicatie, 2013.
27. E. Cokgor, S. Oktay, D. Tas, G. Zenging en D. Orhon, 'Influence of pH and temperature on soluble substrate generation with primary sludge fermentation', Bioresour Technology, vol. 100, nr. 1, 2009.
28. S.W. Weon, S.I. Lee en C.W. Lee, 'Nutrient Removal Using Fermented Organic Acids Derived from the Primary Sludge in the Intermittent Aeration Activated Sludge Process', Environmental Engineering research, vol. 16, nr. 4, pp. 213-218, 2011.
29. H. Wu, J. Gao, D. Yang, Q. Zhou en W. Liu, 'Alkaline fermentation of primary sludge for short-chain fatty acids accumulation and mechanisms', Chemical Engineering Journal, vol. 160, pp. 1-7, 2010.
30. A.G. Werker, N Gurieff and R. Wielinga, AnoxKaldnes, Interview, 18 Maart 2013.

31. K. Johnson, 'PHA Production in Aerobic Mixed Microbial Cultures', Thesis; TU Delft, 2010.
  32. S.N.S. Anis, N.M. Iqbal, S. Kumar, A.A. Amirul, 'Effect of different recovery strategies of P(3HB-co-3HHx) copolymer from *Cupriavidus necator* recombinant harboring the PHA synthase of *Chromobacterium* sp. USM2', *Separation and Purification Technology*, pp. 111-117, 04 January 2013.
  33. Y. Chen en A. Hashimoto, 'Substrate utilization kinetic model for biological treatment process', *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 22, nr. 10, pp. 2080-2095, 1980.
  34. STOWA, 'Handboek slibgisting', 2011:16.
  35. STOWA, 'Businesscase Thermofiele Slibgisting', 2012:w15.
  36. W. Moerman Akwadok, Interview, 18 Mei 2013.
  37. Wateropleidingen, Hogere Techniek Afvalwaterzuivering (HTAZ), vol. 2, 2011.
  38. ICIS, 2011, Acetic Acid Prices and Pricing Information verkregen via: <http://www.icis.com/v2/chemicals/9074786/acetic+acid/pricing.html>, geopend in 2013
  39. STOWA, 'Handleiding model milieu-impact en energiebehoefte van rwzi's', 2012:30.
  40. APV, 'APV Dryer Handbook', Verkregen via: [http://userpages.umbc.edu/~dfrey1/ench445/apv\\_dryer.pdf](http://userpages.umbc.edu/~dfrey1/ench445/apv_dryer.pdf), geopend in 2012.
  41. B. Kunasundari and K. Sudech, 'Isolation and recovery of microbial polyhydroxyalkanoates', *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 5, no. 7, pp. 620-634, 2011.
  42. N. Jacquel, C.-W. Lo, Y.-H. Wei, H.-S. Wu and S. S. Wang, 'Isolation and purification of bacterial poly(3-hydroxyalkanoates)', *Biochemical Engineering Journal*, vol. 39, pp. 15-27, 2008.
  43. J. Yu and L. X. L. Chen, 'Cost-effective recovery and purification of polyhydroxyalkanoates by selective dissolution of cell mass,' *Biotechnology*, vol. 22, pp. 547-553, 2006.
  44. Witteveen+Bos, 'Interne informatie'.
  45. Vewin, 'Tarievenoverzicht drinkwater 2013', Rijkswijk, 2013.
  46. Brenntag, Prijsopgave Ethanol, 2013.
- DHV, 2009, Bedrijfsvergelijking zuiveringsbeheer 2009.

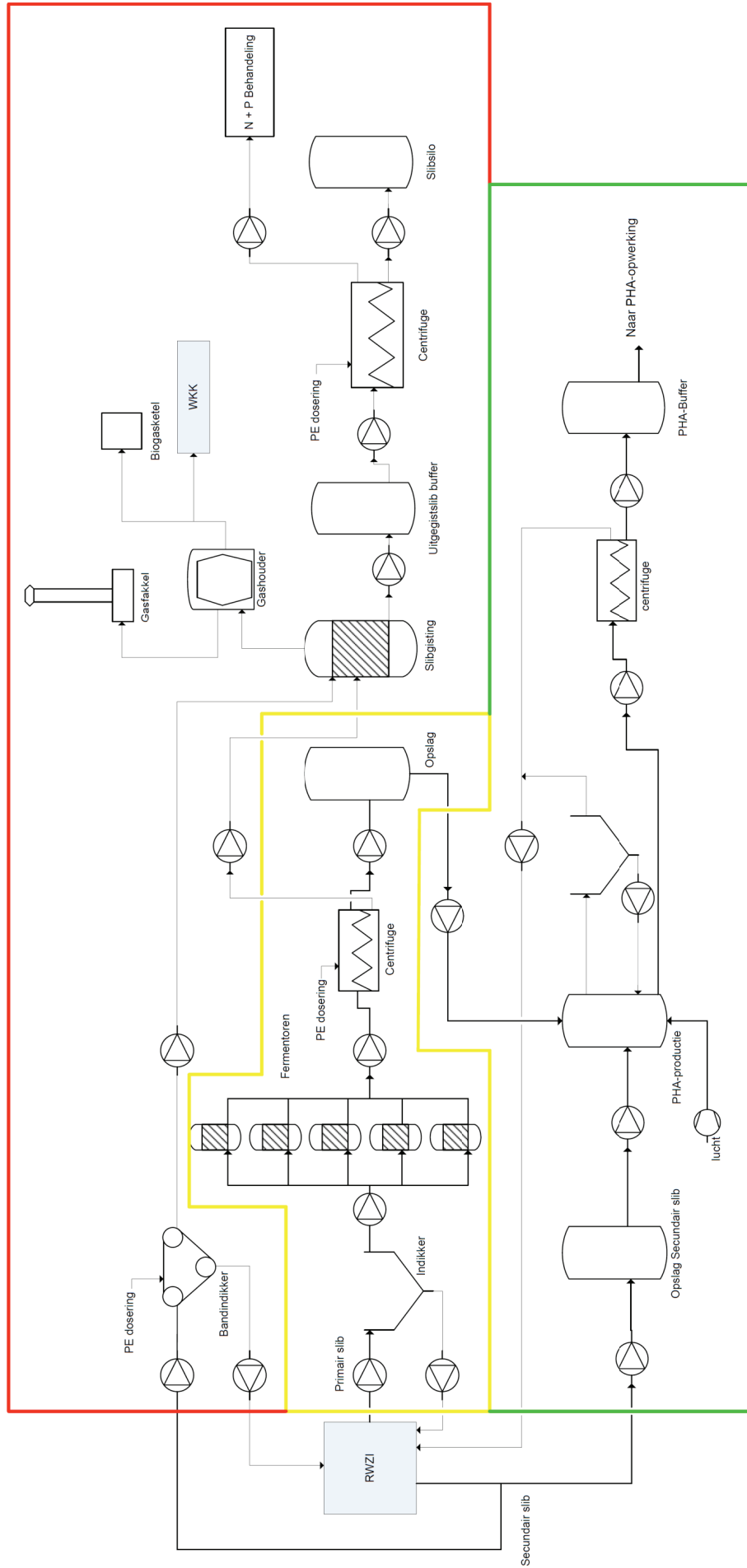
**BIJLAGE 1**

**SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE  
TWEE PHA-PRODUCTIEROUTES, DE  
PHA-OPWERKINGSMETHODE EN HET  
REFERENTIEPROCES**

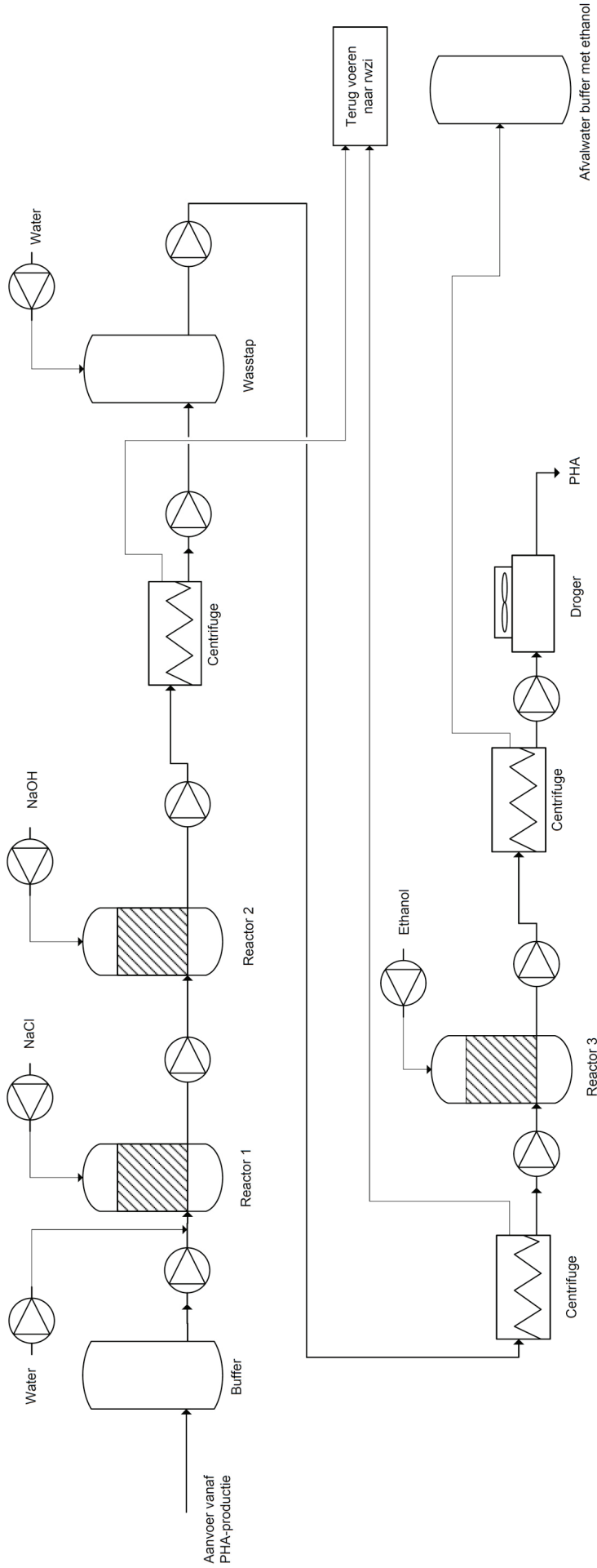
AFBEELDING 1.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE PHA-PRODUCTIE RICH CULTURE



AFBEELDING 1.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE PHA-PRODUCTIE MIXED CULTURE

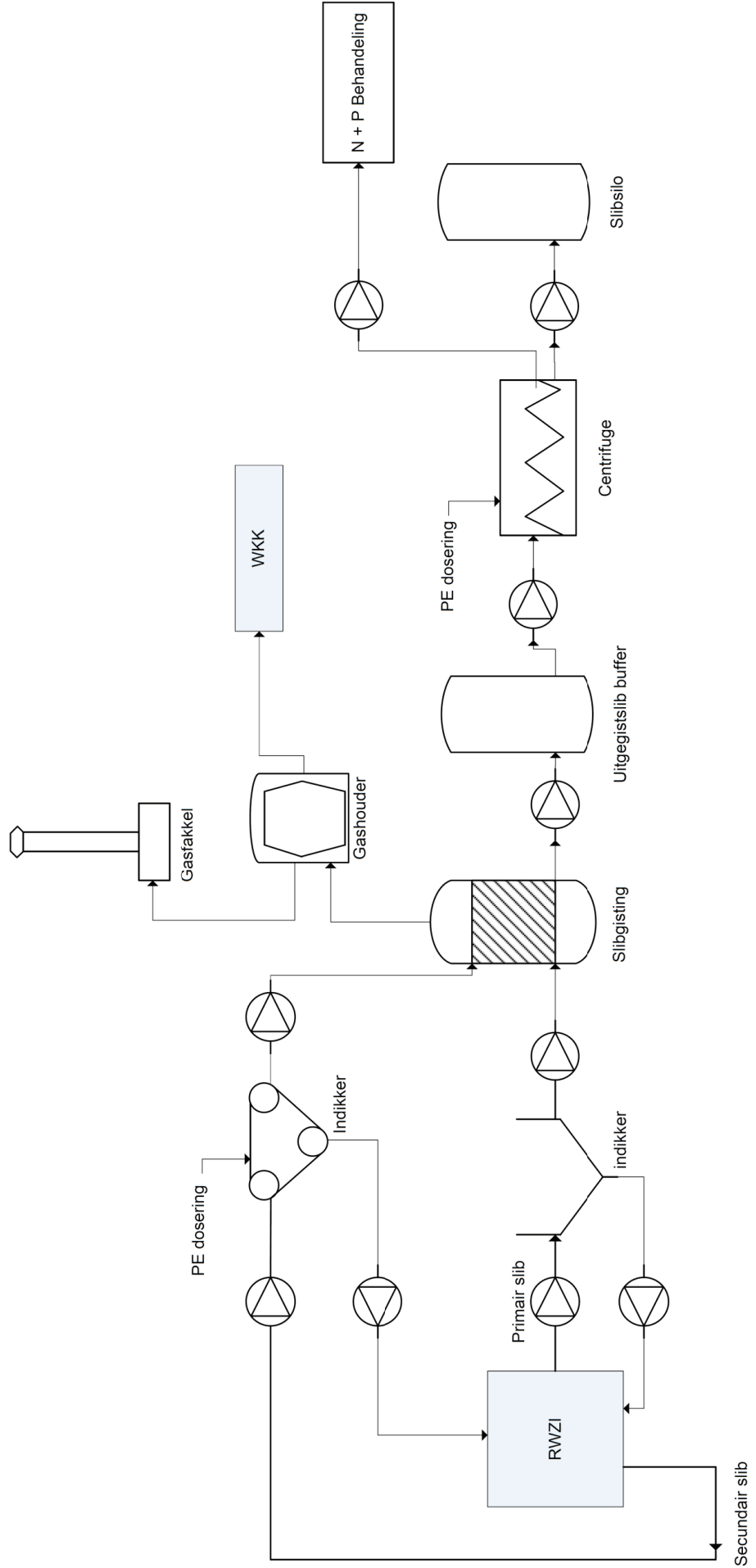


AFBEELDING I.3 SCHEMATISCHE WEERGAVE PHA-OPWERKING





AFBEELDING I.4 SCHEMATISCHE WEERGAVE REFERENTIEPROCES



## BIJLAGE 2

## OVERZICHT PHA-OPWERKINGSMETHODEN

Methode	Chemicaliën	Resultaten			Bacterie	Bron
		Zuiverheid (%)*	Opbrengst (%)*			
<b>Extractie methode</b>						
Solvent extraction	Chloroform	95	96		Monocultuur	[41]
	1,2-propylene carbonate	84	95		Monocultuur	[41]
	Acetone-water process		80-85		Monocultuur	[41]
	Methylene chloride	98	-		Monocultuur	[41]
	Acetone, room temperature		94		Monocultuur	[41]
	Methylene chloride	98	-		-	[41]
	1,2-Propane diol, wash with water and acetone	99,1	79		-	[42]
	Glycerol formal, wash with water and acetone	99,7	85		-	[42]
	Diethyl succinate, wash with water and ethanol	100	90		-	[42]
	Butyrolactone, wash with water and acetone	99,5	90		-	[42]
	1,2-propylene carbonate (continue process will have a lower yield)	>97	95		-	[42]
	Sulfuric acid and Sodium hypochlorite		>95		Monocultuur	[43]
	Sodium Chloride, Sodium hydroxide and Ethanol	90,8	95,3		Mengcultuur	[32]
<b>Oplossen celmateriaal</b>						
Surfactant	SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)	>95-99	>89		Monocultuur	[41][42]
	Sodium hypochlorite	86-99	78-94		Monocultuur	[42]
Surfactant - Sodium hypochlorite	Sodium hypochlorite	86	93		Mengcultuur	[41]
	SDS - Sodium hypochlorite	98	87		Monocultuur	[41]
	Triton X-100 - Sodium hypochlorite	98			Monocultuur	[41]
Surfactant-Chelate	Betaine-EDTA disodium salt	>96	90		Monocultuur	[41]
	Recycled wastewater process	96	90		Monocultuur	[42]
	Chelate-hydrogen peroxide	99,5	-		-	[42]
Dispersion of sodium hypochlorite and chloroform	Chloroform - Sodium hypochlorite	>98	-		Monocultuur	[41]
	Chloroform - Sodium hypochlorite with Al- and Fe-base coagulants	90-94	98-99		Monocultuur	[42]

Methode	Chemicaliën	Resultaten		
		Zuiverheid (%)*	Ophrengst (%)*	Bacterie Bron
Selective dissolution by protons	sulfuric acid	>97	>95	Monocultuur [41]
Enzymatic digestion	Mircobispora sp culture-chloroform	94	-	Monocultuur [41]
	Enzyme combined with SDS-EDTA	93	-	Monocultuur [41]
	Bromelain; pancreatin	89	90	Monocultuur [41]
	Papain	89	90	Monocultuur [41]
	Enzyme combined with SDS-EDTA	95		Monocultuur [42]
	Enzyme combined with SDS-EDTA	92,6	90	Monocultuur [42]
<b>Mechanische behandeling</b>				
Mechanical disruption	SDS-high pressure homogenization	95	98	Monocultuur [41]
	Centrifugation and chemical treatment	98,5	80	- [42]
	High pressure	96,5	80	Monocultuur [42]
Supercritical fluid	SC-CO2	89	-	Monocultuur [41]
Self flotation of cell debris	Chloroform	98	85	Monocultuur [41]
Dissolved air flotation	Enzymatic hydrolysis, sonification, flotation	86	-	Monocultuur [41]
Air classification		95-97	85-90	Monocultuur [41]
Recovery using cell fragility	Alkaline treatment	98,5-99	94-96	Monocultuur [42]

\*In de tabel zijn alleen technieken opgenomen die een zuiverheid en een rendement halen van boven de 50 %

**BIJLAGE 3**

# VERANTWOORDING PROCESONTWERP

In deze bijlage wordt het ontwerp per deelproces verantwoordt, het detail niveau is hierbij hoger dan in de hoofdrapportage. Voor een algemene schematische weergaven van de twee PHA-productieroutes, de PHA-opwerkingsroute en het referentieproces, zie bijlage I.

**VFA-FERMENTATIE**

De productie van VFA's wordt batchgewijs uitgevoerd en heeft een cyclustijd van 4 dagen. Primair slib wordt 24 uur per dag en 7 dagen per week aangevoerd en vervolgens ingedikt tot 4 % DS met een gravitaire indikker. Het plaatsen van zowel een buffer om het slibvolume van circa 4 dagen op te vangen als ook een fermentor met eenzelfde volume, brengt meer kosten met zich dan het bouwen van 5 kleinere fermentoren waarvan 4 fermentoren continu in bedrijf zijn. De resterende fermentor functioneert hierbij als buffer die geladen wordt wanneer de overige fermentoren in bedrijf zijn. Om deze reden is het ontwerp uitgelegd op 5 VFA-fermentoren. Na centrifugatie (6 uur) wordt de stroom rijk aan VFA verpompt naar een buffer met een totale buffercapaciteit van 1 dag.

**RICH CULTURE**

De biomassaproductie heeft een cyclus van 12 uur, welke als volgt is opgebouwd:

- 10 minuten voeden van reactor met VFA;
- circa 11 uur reactietijd;
- 20 minuten bezinken en aflaten van de biomassa.

PHA-fermentatie heeft een cyclus van 6 uur, welke als volgt is opgebouwd:

- 4,5 uur fermentatietijd (inclusief voeden van de reactor met verrijkt slib en VFA);
- 1,5 uur aflaten van biomassa.

Aan de hand van bovenstaande gegevens is voor 2 reactoren gekozen waarin biomassaproductie plaats vindt. Deze reactoren zijn in staat om 1 PHA-fermentatietank elke 6 uur te kunnen voorzien van voldoende biomassa. In het PHA-fermentatie proces is een tussenbezinker geplaatst om het volume van de fermentatietank te beperken. Dit is nodig vanwege de relatief lage concentratie VFA in de waterige stroom (7,5 g/l). Continue aanvoer van de VFA-stroom resulteert in een continue afloop van de PHA-fermentatietank. Deze stroom bevat tevens biomassa wat middels een tussenbezinktank wordt gescheiden van de waterfractie en teruggevoerd naar de PHA-fermentor (bezinksnelheid 0,5 m/h). De biomassaconcentratie in de slibcultuur en in de PHA-fermentatie komt met deze concentratie vetzuren uit op maximaal 2,8 g/l.

**MIXED CULTURE**

PHA-fermentatie heeft een cyclus van 24 uur en is als volgt opgebouwd:

- 1 uur reactor voeden;
- 20 uur fermentatietijd;
- 3 uur aflaten van de biomassa.

Omdat het wenselijk is dat de PHA-fermentatie continu in bedrijf is, is gekozen voor het implementeren van 1 buffertank, zodat het secundair slib dat continu vrijkomt van de rwzi wordt gebufferd tijdens de PHA-fermentatie cyclus.

In het ontwerp van het PHA-fermentatieproces is een tussenbezinker meegenomen om het volume van de fermentatietank te beperken vanwege de lage concentratie VFA in de waterige stroom. Voor het ontwerp is uitgegaan van een bezinksnelheid van 0,5 m/h. De biomassaconcentratie tijdens de PHA-fermentatie wordt bepaald door indikkingsgraad van de primaire slibindikker, in deze studie is uitgegaan van 8 g/l. Bij deze concentratie wordt geen limitatie in de zuurstofoverdracht verwacht. In een definitief ontwerp zal de zuurstofopnamesnelheid afgestemd moeten worden op de zuurstofoverdrachtscoëfficiënt (reactortype specifiek).

### PHA-OPWERKING

De buffer voorafgaand aan de PHA-opwerking is ontworpen op 2 dagen buffercapaciteit. De totale opwerkingscyclus is als volgt opgebouwd:

- NaCl behandeling:
  - 30 minuten voeden reactor (inclusief toevoegen van leidingwater om tot een biomassa concentratie van 50 g/l te komen);
  - 3 uur reactietijd;
  - 30 minuten aflaten reactor met doorloop in de NaOH-behandeling;
- NaOH behandeling:
  - 1 uur reactietijd;
  - 1 uur aflaten reactor en centrifugeren met doorloop in de wasstap;
- wasstap:
  - 1 uur, inclusief reactor vullen met waswater (1 verdunning);
  - 30 minuten aflaten en centrifugeren met doorloop in de ethanol behandeling;
- ethanol behandeling:
  - 1 uur, reactietijd inclusief reactor vullen met ethanol (96%<sub>v/v</sub> oplossing, 15 minuten);
  - 30 minuten centrifugeren en transport naar droger;
- droger (spin flash dryer):
  - geen tijd gedefinieerd.

Op deze manier kan om de 4 uur een nieuwe PHA-opwerkingsbatch worden gestart. De opslag voor chemicaliën is ontworpen op een capaciteit van 30 dagen.

### BIOGAS PRODUCTIE

Voor zowel de mixed als de rich culture blijft slib beschikbaar voor (na)vergisting. De hoeveelheid geproduceerde biogas wordt berekend aan de hand van het Chen & Hashimoto model [33]. Door VFA-productie uit primair slib neemt de afbraak van organisch materiaal af. Dit is in de berekening gecompenseerd door de asrest te verhogen.

De slibverwerking door vergisting is ontworpen met de volgende parameters:

- slib-slib warmtewisselaar wint warmte uit het digestaat terug met een rendement van 90%;
- 25 dagen verblijftijd in slibgistingtank;
- 3 uur verblijftijd in de gashouder;
- WKK met thermisch en elektrisch rendement van 40 %.

Als blijkt dat de warmte uit het warmwatercircuit en uit het rookgas (via een rookgaskoeler) van de WKK niet voldoende is, wordt een deel van het biogas middels een biogasketel omgezet in thermische energie (rendement 95 %).

## BIJLAGE 4

## INFLUENTSAMENSTELLING

---

Parameters model zuivering*		
CZVtotaal	530	mg/l
BZV	220	mg/l
TSS	200	mg/l
TKN	45	mg/l
Total P	8	mg/l
Water inname rwzi per i.e.	180	liter/dag

---

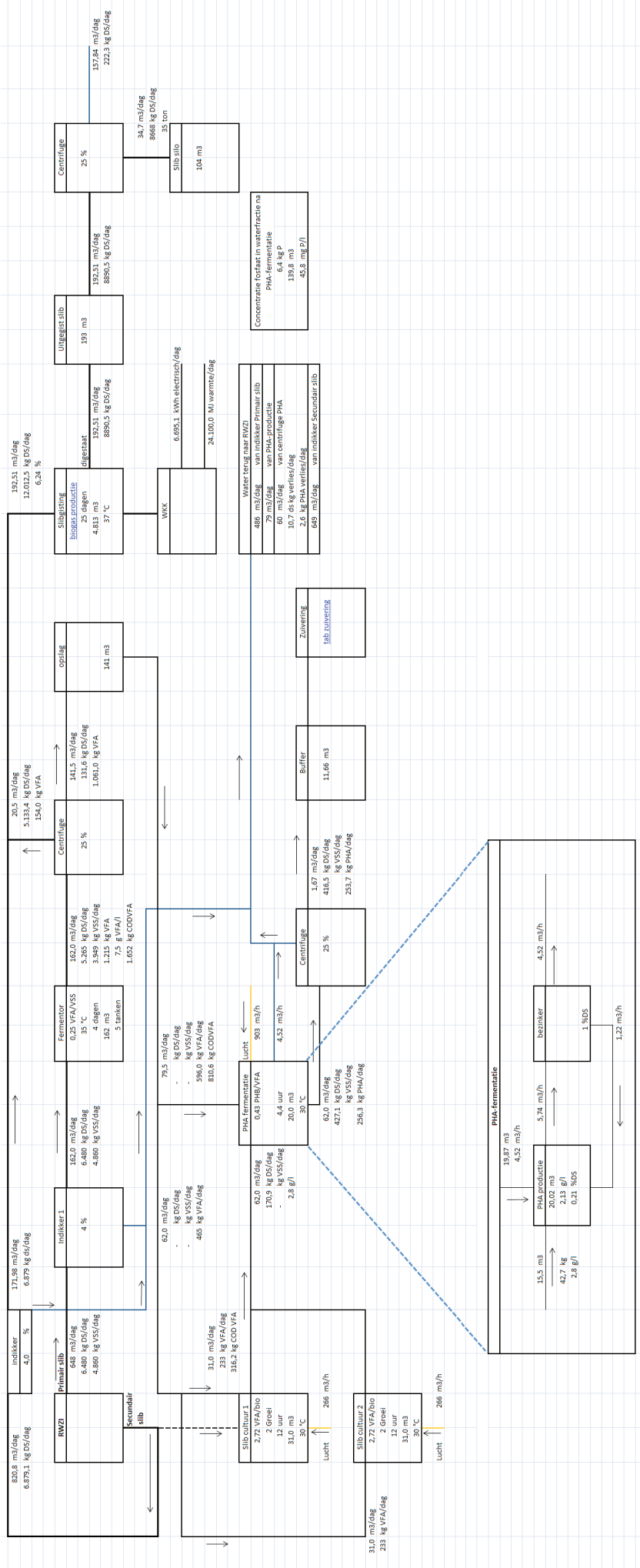
\* In deze studie is een rwzi van 300.000 i.e. als uitgangspunt genomen, hiertoe zijn bovenstaande waarden vermenigvuldigd met 300.000 om de vrachten en debieten in te kunnen schatten.

**BIJLAGE 5**

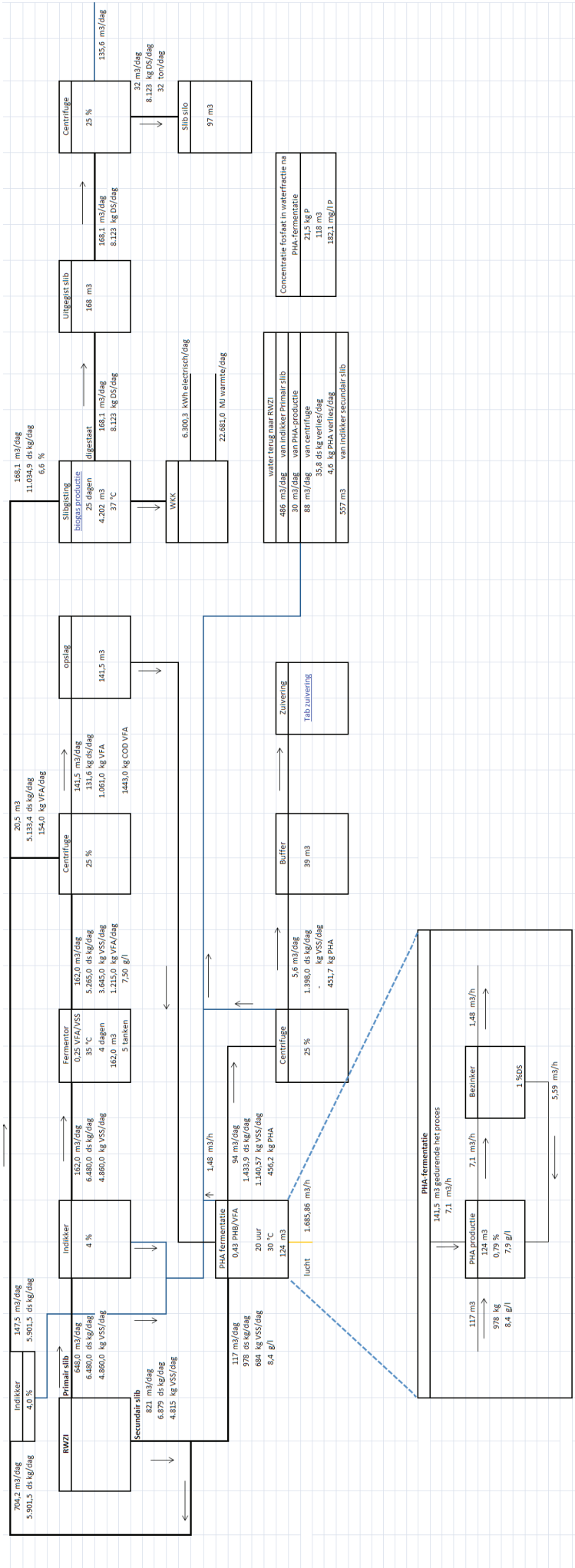
# MASSABALANS



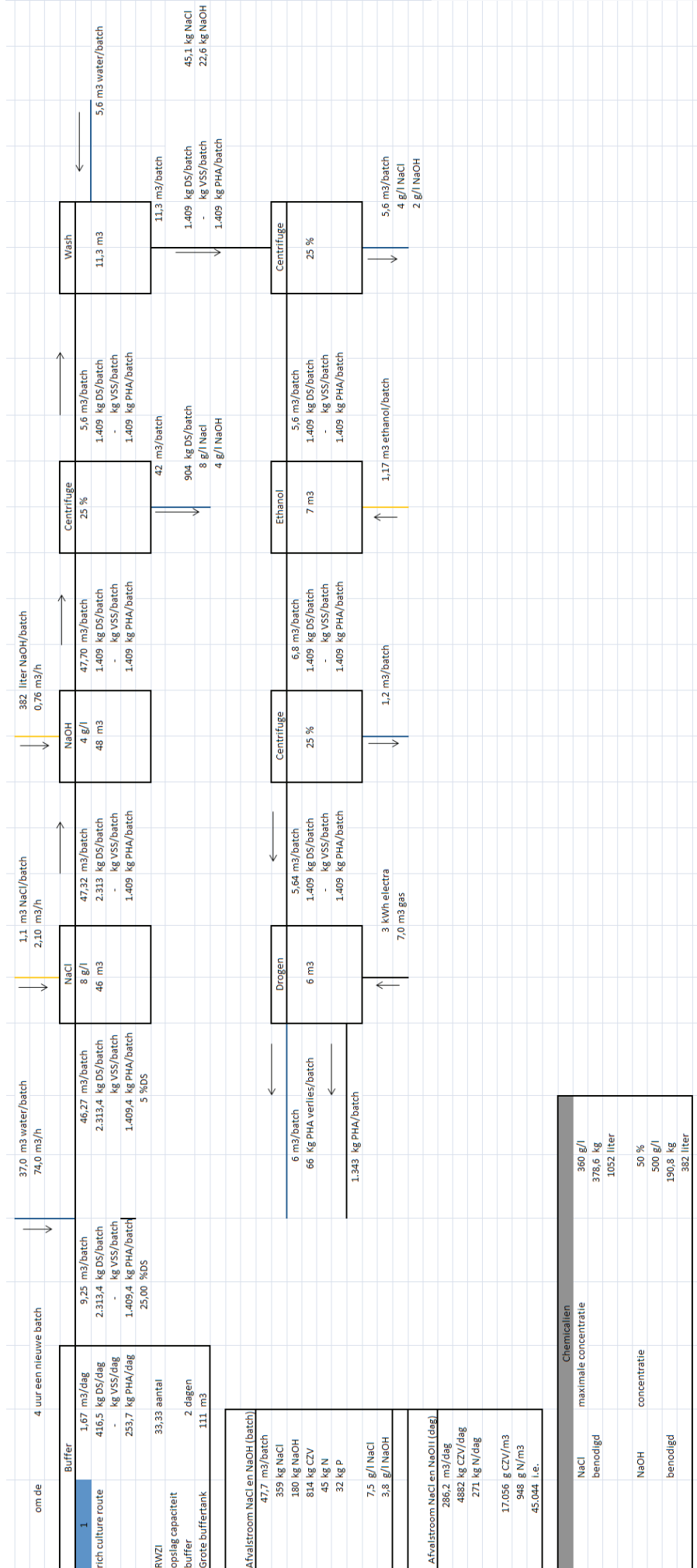
PHA productieproces / Massabalans Rich Culture



PHA productieproces / Massabalans Mixed Culture

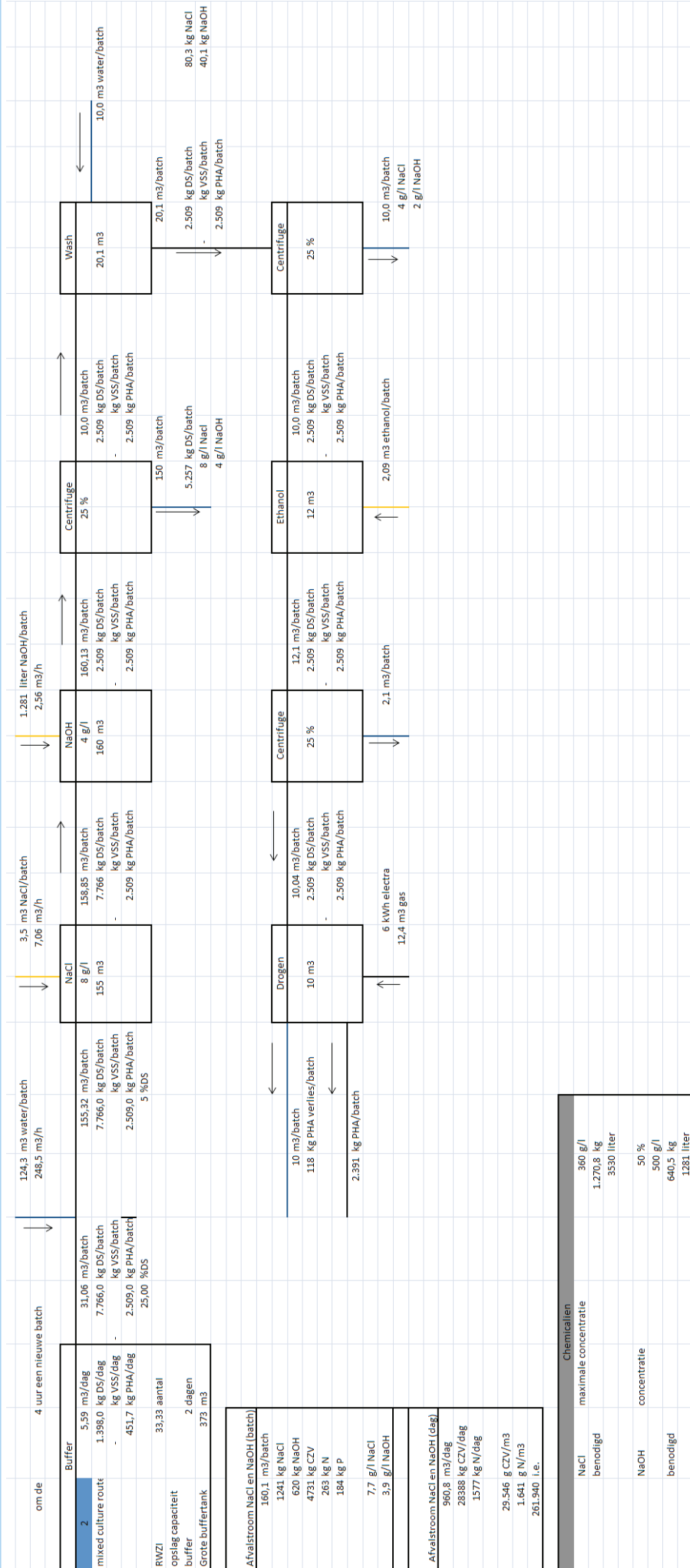


PHA productieproces / Opwerking



Chemicalien	
NaCl	360 g/l
berodigd	376,6 kg
	1052 liter
NaOH	50 %
concentraate	500 g/l
berodigd	190,8 kg
	382 liter

PHA productieproces / Opwerking



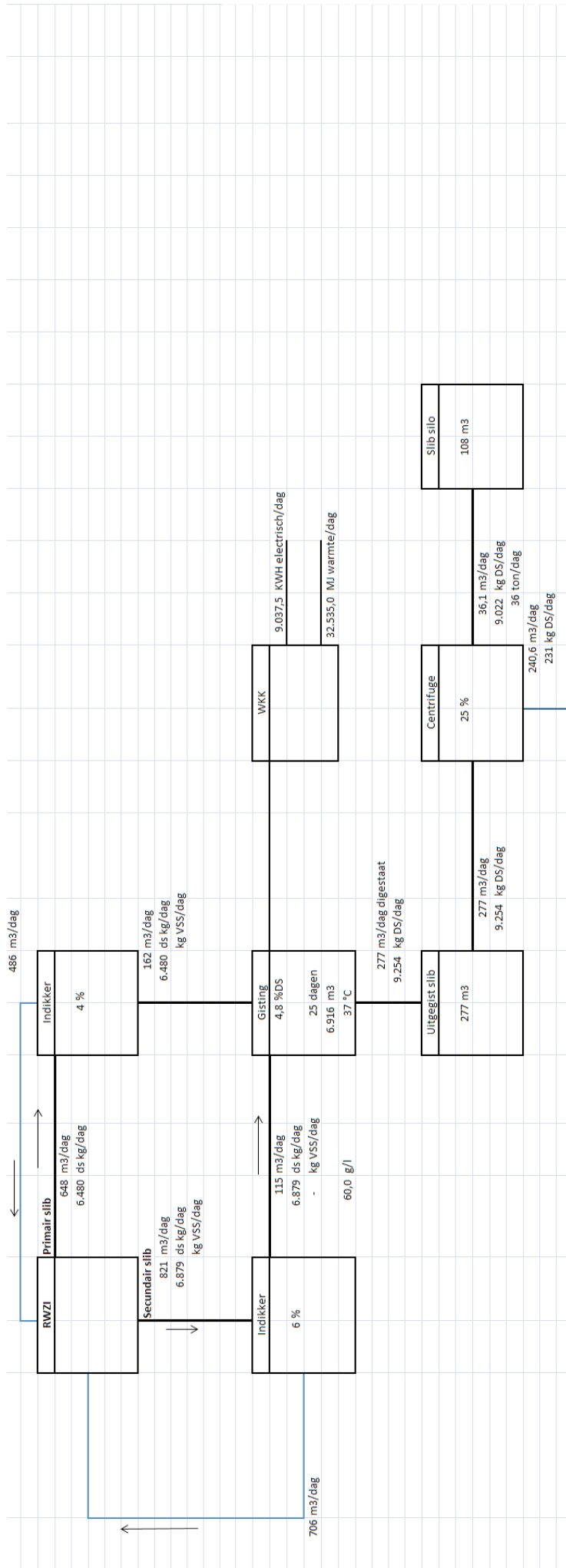
Afvastroom NaCl en NaOH (batch)	
160.1 m3/batch	
1241 kg NaCl	
620 kg NaOH	
4731 kg CZV	
263 kg N	
184 kg P	
7.7 g/l NaCl	
3.9 g/l NaOH	

Afvastroom NaCl en NaOH (dag)	
960.8 m3/dag	
28388 kg CZV/dag	
1577 kg N/dag	
28.546 g CZV/m3	
1.641 g N/m3	
261.940 i.e.	

Chemicalien	
NaCl	360 g/l
benodigd	1.270.8 kg
	3530 liter
NaOH	50 %
benodigd	500 g/l
	640.5 kg
	1281 liter

PHA productieproces / Referentie proces



**BIJLAGE 6**

# WARMTEBALANS

In deze bijlage is de warmtebalans weergegeven voor zowel de rich culture route als ook voor de mixed culture route. Omdat de mixed culture route gebruik maakt van grotere volumina, is meer warmte nodig vergeleken met de rich culture route. Deze extra warmte wordt opgewekt door middel van een biogasketel, dit gaat ten koste van de elektriciteitsproductie. Het PHA-opwerkingsproces gebruikt geen warmte nodig en is om die reden niet opgenomen in een warmtebalans.

Rich Culture route								
Warmte nodig								
Processtap	Flow (m <sup>3</sup> /dag)	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Flow (kg/dag)	Temperatuur verschil (°C)	Warmte verlies (MJ/dag)	Warmte benodigd (MJ/dag)	Warmte over na proces (MJ/dag)	Temperatuur (°C)
RWZI - VFA-fermentor	162	7	162.000	20				35
VFA-fermentor					132,3	13.694,9		35
RWZI - slibgisting	193	8	192.512	22				37
Slibgisting					1269	18.998		37
Centrifuge 1 (na VFA-fermentor)	162	7	162.000		1.369		12.325	33,0
Opslag	141	6	141.467		121		12.205	32,8
Opslag - PHA-productie	79	3	79.467	0,0				
PHA-productie					33			32,8
Opslag-slibcultuur	62	3	62.000	0,0				
Slibcultuur 1	62	3	62.000		44			32,6
Slibcultuur 2	62	3	62.000		44			32,6
Centrifuge 2 (na PHA-productie)	62	3	62.000		457			30,8
<b>Totaal warmte benodigd</b>							<b>32.692,7</b>	

Warmte vrij						
Proces stap	Flow (m <sup>3</sup> /dag)	Flow (m <sup>3</sup> /h)	Flow (kg/dag)	Temperatuur verschil (°C)	Warmte verlies (MJ/dag)	Totaal warmte vrij (MJ/dag)
WKK						24.100
WKK intercooler						3615
Rookgasketel					964	8.676
WKK warmwatercircuit					1.085	9.761
Digestaat	193	8	192.512	22	1.773	15.956
Slibcultuur						
PHA/opslag						
Centrifuge	60	3	60.334	15,8	400	3.602
Totaal warmte vrij						41.609
Warmte bruikbaar						34.392
Verschil benodigd en bruikbaar						1.699,7

Mixed Culture route met WKK en biogasketel								
<i>Warmte nodig</i>								
Processtap	Flow (m <sup>3</sup> /dag)	flow (m <sup>3</sup> /h)	Flow (kg/dag)	Temperatuur verschil (°C)	Warmte verties (MJ/dag)	Warmte totaal benodigd (MJ/dag)	Warmte over (MJ/dag)	Temperatuur waterstroom (°C)
RWZI - VFA-fermentor	162	7	162.000	20				
VFA-fermentor					132	13.695		35
RWZI - slibgisting	168	7	168.071	22				
Slibgisting					1.159	16.637		37
Centrifuge 1 (na VFA-fermentor)	162	7	162.000		1.664		14.973	32,5
Opslag					121			
Opslag - PHA-productie	141	6	141.467	-2,5				
Indikker SS - PHA-productie	117	5	116.649	15				
PHA-productie					111	7.435		30
Centrifuge 2 (na PHA-productie)	94	4	94.040		743		6.691	28,1
Totaal warmte benodigd						37.767		
<i>Warmte vrij</i>								
Proces stap	Flow (m <sup>3</sup> /dag)	flow (m <sup>3</sup> /h)	Flow (kg/dag)	Temperatuur verschil (°C)	Warmte verties (MJ/dag)	Totaal warmte vrij (MJ/dag)		
WKK						19.126		
WKK intercooler						2.869		
Rookgasketel					765	6.885		
WKK warmwatercircuit					861	7.746		
Digestaat	168	7	168.071	22	1.548	13.930		
Biogasketel						9.205		
Centrifuge	94	4	94.040	13,1	516	4.645		
Totaal warmte vrij						45.281		
Warmte bruikbaar						37.767		
Verskil benodigd en bruikbaar						-		



**BIJLAGE 7**

# ADDITIONELE INFORMATIE KOSTENRAMING

In deze bijlage zijn de achterliggende gegevens van de kostenraming met betrekking tot pompen, civiele ruimten en elektra en automatisering nader uitgewerkt.

**POMPEN**

De kosten voor pomp ( $\pm 50\%$ ) zijn geraamd voor elke afzonderlijke pomp. Het betreft werktuigbouwkundige kosten inclusief afsluiter, terugslagklep en 10 meter leiding. Er is rekening gehouden met een opvoerhoogte van 10 meter. Transportschroeven zijn berekend op circa 3 meter.

**CIVIELE RUITEN**

Naast de werktuigbouwkundige en civiel bouwkosten voor de installaties, zijn kosten berekend voor civiele ruimten. Het gaat hierbij om de gebouwen voor volgende, binnen te plaatsten, installaties:

- centrifuges;
- bandindikers;
- PE installaties;
- WKK (+ biogasketel);
- slib/slib warmtewisselaar;
- slibcultuur (indien van toepassing);
- PHA-fermentatietank.

Voor deze studie is aangenomen dat de gehele centrale PHA-opwerking in 1 gebouw geplaatst wordt. Een overzicht van ingeschatte benodigde oppervlakten, dat is de geschatte lengte en breedte van de unit plus 2 meter, is weergegeven in tabel 7.3 en 7.4. Deze 2 additionele meters zijn meegenomen om te kunnen voorzien in loopruimte en ruimte voor pompen en besturing. De standaard gebouwhoogte is aangenomen als zijnde 5 meter. De civiele kosten bedragen EUR 500/m<sup>3</sup>.

TABEL 7.1 CIVIELE RUIMTE PHA-PRODUCTIE RICH CULTURE ROUTE

Equipment	grondoppervlakte		inhoud (m <sup>3</sup> )	aantal	totaal (m <sup>3</sup> )
	(m <sup>2</sup> )*	hoogte**			
Centrifuge	48	5	240	6	1440
PE-installatie	36	5	180	4	720
WKK	48	5	240	1	240
Warmtewisselaar	35	5	175	1	175
Bandindikker	48	5	240	2	480
Slibcultuur	29	5,2	149	2	299
PHA-fermentor	24	5	120	1	120
totaal					3474

\* de oppervlakte van de tank is aangenomen als zijnde een vierkant, afmetingen zijn inclusief twee additionele meters voor plaatsing van pompen en het creëren van loopruimte.

\*\* de hoogte is standaard 5 meter, wanneer een reactor hoger is dan 4 meter wordt 1 meter toegevoegd aan de werkelijke reactorhoogte.

TABEL 7.2 CIVIELE RUIMTE PHA-PRODUCTIE MIXED CULTURE ROUTE

Equipment	grondoppervlakte		inhoud (m <sup>3</sup> )	aantal	totaal (m <sup>3</sup> )
	(m <sup>2</sup> )*	hoogte**			
Centrifuge	48	5	240	6	1440
PE-installatie	36	5	180	4	720
WKK	48	5	240	1	240
Warmtewisselaar	35	5	175	1	175
Bandindikker	48	5	240	2	480
Biogasketel	12	5	61,25	1	61
PHA-productie	39	6,3	244	1	244
Totaal					3360

\* de oppervlakte van de tank is aangenomen als zijnde een vierkant, afmetingen zijn inclusief twee additionele meters voor plaatsing van pompen en het creëren van loopruimte.

\*\* de hoogte is standaard 5 meter, wanneer een reactor hoger is dan 4 meter wordt 1 meter toegevoegd aan de werkelijke reactorhoogte.

TABEL 7.3

## CIVIELE RUIMTE PHA-OPWERKING RICH CULTURE ROUTE

Equipment	grondoppervlakte		inhoud (m <sup>3</sup> )	aantal	totaal (m <sup>3</sup> )
	(m <sup>2</sup> )*	hoogte (m)**			
Centrifuge	48	5,0	240	6	1.440
Buffer PHA	51	7,4	378	1	378
Reactor 1	34	5,8	198	1	198
Reactor 2	35	5,8	202	1	202
Reactor 3	16	5,0	81	1	81
Was tank	19	5,0	97	1	97
NaOH tank	37	6,2	230	1	230
NaCl tank	60	8,2	497	1	497
Ethanol tank	64	8,5	543	1	543
Afvalwater buffer (ethanol)	32	5,6	182	1	182
Droger	90	6	540	1	540
Totaal					4.388

\* de oppervlakte van de tank is aangenomen als zijnde een vierkant, afmetingen zijn inclusief twee additionele meters voor plaatsing van pompen en het creëren van loopruimte.

\*\* de hoogte is standaard 5 meter, wanneer een reactor hoger is dan 4 meter wordt 1 meter toegevoegd aan de werkelijke reactorhoogte.

TABEL 7.4

## CIVIELE RUIMTE PHA-OPWERKING MIXED CULTURE ROUTE

Equipment	grondoppervlakte		inhoud (m <sup>3</sup> )	aantal	totaal (m <sup>3</sup> )
	(m <sup>2</sup> )*	hoogte**			
Centrifuge	48	5,0	240	8	1.920
Buffer PHA	94	10,6	998	1	998
Reactor 1	60	8,2	491	1	491
Reactor 2	61	8,3	503	1	503
Reactor 3	20	5,0	99	1	99
Was tank	24	5,0	120	1	120
NaOH tank	67	8,7	582	1	582
NaCl tank	113	11,8	1.340	1	1.340
Ethanol tank	86	10,1	865	1	865
Afvalwater buffer	42	6,6	276	1	276
Droger	150	6	900	1	900
Totaal					8.095

\* de oppervlakte van de tank is aangenomen als zijnde een vierkant, afmetingen zijn inclusief twee additionele meters voor plaatsing van pompen en het creëren van loopruimte.

\*\* de hoogte is standaard 5 meter, wanneer een reactor hoger is dan 4 meter wordt 1 meter toegevoegd aan de werkelijke reactorhoogte.

**ELEKTRA EN AUTOMATISERING**

Voor elektra en automatisering is een extra kostenpost gerekend ter grootte van 20% van de bouwkosten van alle installaties (zonder de kosten voor de civiele ruimten).

## BIJLAGE 8

# UITGANGSPUNTEN KOSTENRAMING

## ECONOMISCHE HAALBAARHEID

In deze bijlage worden de uitgangspunten weergegeven die zijn gebruikt voor de kostenraming met betrekking tot de economische haalbaarheid. Voor de kostenraming van PHA-productie is uitgegaan van een fictieve rwzi ter grootte van 300.000 i.e. Voor de kosten van PHA-productie op een fictieve rwzi van 500.000 i.e. is onderstaande schaalfactor toegepast:

$$\text{Prijs 500.000 i. e.} = \frac{\text{prijs 300.000 i. e.}}{\left(\frac{300.000}{500.000}\right)^{0,8}}$$

**BOUWKOSTEN**

In tabel 8.1 zijn de werktuigbouwkundige en civiele kosten weergegeven die zijn geraamd naar aanleiding van het ontwerp als toegelicht in de paragrafen 4.3-4.4 en bijlage III.

TABEL 8.1

BOUWKOSTEN [44,40]

techniek	eenheid	bouwkosten
Bandindikker	EUR/m <sup>3</sup> /h	840
PE installatie	EUR	65.000
Bezinktank	EUR/m <sup>2</sup>	950
Buffertank	EUR/m <sup>3</sup>	300
Fermentoren	EUR/m <sup>3</sup>	650
Geroerde reactoren	EUR m <sup>3</sup>	450
Centrifuge (10-20 m <sup>3</sup> /h)	EUR	130.000
Centrifuge (20-40 m <sup>3</sup> /h)	EUR	160.000
Centrifuge (30-60 m <sup>3</sup> /h)	EUR	200.000
Slibgistingstank	EUR /m <sup>3</sup>	375
Slib/slib warmtewisselaar	EUR /m <sup>3</sup> /h	13.000
Gashouder	EUR /m <sup>3</sup>	155
WKK (van 200 tot 400 kWe)	EUR /kWe	2.000
Biogasketel	EUR /kWe	570
Gasfakkel	EUR /m <sup>3</sup> /h	170
Droger	EUR /Lwaterverdamping	900

Naast de bouwkosten uit tabel 8.1, zijn de volgende kosten berekend:

- werktuigbouwkundige kosten voor elke afzonderlijke pomp ( $\pm 50\%$ );
- civiele kosten voor ruimten met betrekking tot binnen te plaatsen installatieonderdelen (zie hiervoor bijlage 7);
- kosten gerelateerd aan elektra en automatisering.

Gedetailleerde informatie is weergegeven in bijlage 9.

Omdat niet alle bouwkosten zijn meegenomen in de kostenraming, wordt over de bouwkosten een onvolledigheidsfactor gezet van 30%. De onvolledigheid in de kosten betreft bijvoorbeeld extra leidingwerk, montage, instrumentatie en dergelijke.

De totale investeringskosten zijn bepaald door de bouwkosten te vermenigvuldigen met de investeringsfactor. In tabel is de opbouw van de investeringsfactor weergegeven.

TABEL 8.2 INVESTERINGSFACTOR

parameter	waarde
algemene kosten	5%
engineering	15%
inrichtingskosten	2%
financiering	2%
verzekering	2%
onvoorzien	25%
omzetbelasting	21%
totaal	72% à factor 1,72

### OPERATIONELE KOSTEN

Naast bouwkosten zijn ook de operationele kosten berekend, eenheidsprijzen zijn weergegeven in tabel. Omdat PHA-opwerking centraal wordt uitgevoerd, is gerekend met een gemiddelde transportafstand van 120 km voor alle locaties.

TABEL 8.3 OPERATIONELE KOSTEN [44, 45, 46]

parameter	eenheid	waarde
Personeelskosten	EUR/fte/jaar	65.000
Afvoerkosten slib	EUR/ton	85
Onderhoudskosten	% <sub>Bouwkosten</sub> /jaar	2
Utilities		
Water	EUR/m <sup>3</sup>	1,30
Elektriciteit (inkoop/levering)	EUR/kWh	0,10
Aardgas (inkoop)	EUR/m <sup>3</sup>	0,50
Chemicaliën		
NaOH (50 %)	EUR/m <sup>3</sup>	310
Pekelwater (22 % NaCl)	EUR/m <sup>3</sup>	40
Ethanol 96 % (24 ton levering)	EUR/m <sup>3</sup>	679
PE	EUR/kg actief PE	5,5
FeCl <sub>3</sub>	EUR/m <sup>3</sup> <sub>40%</sub>	155
Overig		
Transportkosten	EUR/ton/km	0,70
Zuiveringskosten	EUR/i.e./jaar	35*

\* Deze kosten zijn gebaseerd op een gemiddeld tarief van EUR 45,- per v.e. [0]. Dit zijn kosten inclusief overheadkosten, voor deze studie is aangenomen dat de overheadkosten circa 20 % bedragen.

De jaarlijkse kapitaallasten zijn bepaald aan de hand van de annuïteitenmethode. Onderstaande formule wordt gehanteerd om de kapitaalfactor te berekenen, een overzicht van de benodigde parameters is weergegeven in tabel. De kapitaalfactor maal de investeringskosten resulteert in de jaarlijkse kapitaallasten.

$$k = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}}$$

Waarin: k = kapitaalfactor (%/jaar)  
 i = rente (%)  
 n = looptijd (jaren)

TABEL 8.4 PARAMETERS ANNUÏTEITENMETHODE

parameter	eenheid	waarde
rente	%	5
afschrijvingstermijn	jaren	15

**BIJALAGE 9**

# DETAIL OVERZICHT OPBOUW JAARLIJKSEKOSTEN

## Rich culture route

<b>VFA fermentatie 300.000 i.e.</b>			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
Indikker (2)	51.300	PE	132.119
VFA fermentor (5)	364.500	Onderhoud	35.574
Centrifuge (2)	260.000	Kaptitaallasten	294.749
PE-installatie	65.000	Electriciteit	16.046
VFA buffer (1)	50.928	Jaarlijkse kosten 300.000	478.488
Pompen (2 per pomp)	73.476	Jaarlijkse kosten 500.000	720.029
Electra en procesautomatisering	173.041	Jaarlijkse kosten 10.000.000	15.329.991
Civiele ruimten			
Centrifuge (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
Onvolledig	410.473		
Totaal	1.778.718		
Investering	3.059.395		

<b>Biomassaproductie 300.000 i.e.</b>			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
Slibcultuur 1	24.180	Onderhoud	7.409
Slibcultuur 2	24.180	Kaptitaallasten	61.384
Blowers (4)	32.324	Electriciteit	23.123
Pompen (2 per pomp)	32.370	Jaarlijkse kosten 300.000	91.915
Electra en procesautomatisering	22.611	Jaarlijkse kosten 500.000	138.314
Civiele ruimten Slibcultuur	149.282	Jaarlijkse kosten 10.000.000	2.944.825
Onvolledig	85.484		
Totaal	370.430		
Investering	637.140		

<b>PHA-fermentatie 300.000 i.e.</b>			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
PHA-productie	15.612	PE	4.287
Bezinker	10.906	Onderhoud	24.024
Blowers (2)	30.045	Kaptitaallasten	199.049
Centrifuge (2)	260.000	Electriciteit	33.399
PE-installatie	65.000	Additionele P-verwijdering en slibproductie	7.580
PHA-buffer	4.198	Jaarlijkse kosten 300.000	268.339
Pompen (2 per pomp)	59.155	Jaarlijkse kosten 500.000	403.796
Electra en procesautomatisering	88.983	Jaarlijkse kosten 10.000.000	8.597.145



Civiele ruimten	-
Centrifuge (2)	240.000
PE-installatie	90.000
PHA-productie	60.098
Onvolledig	277.199
Totaal	1.201.196
Investing	2.066.057

**Slibgisting 300.000 i.e.**

Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
Indikker (2)	63.214	PE	292.145
PE-installatie	65.000	Onderhoud	137.486
Slibgisting	2.165.756	Kaptitaallasten	1.139.130
Buffer uitgegist slib	69.304	Electriciteit	-181.160
Centrifuge (2)	260.000	Afvoerkosten slib	1.075.726
PE-installatie	65.000	Jaartijkse kosten 300.000	2.463.327
Slibsilos	37.447	Jaartijkse kosten 500.000	3.706.816
Gashouder	74.000	Jaartijkse kosten 10.000.000	78.921.070
Gasfakkel	27.028		
WKK	669.500		
Warmtewisselaar	104.277		
Pompen (2 per pomp)	83.155		
Electra en procesautomatisering	736.736		
Civiele ruimten	-		
Bandindikker (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
Centrifuge (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
WKK	120.000		
WW	87.500		
Onvolledig	1.586.375		
Totaal	6.874.291		
Investing	11.823.780		

**Overkoepelende kosten**

Operationele kosten		
personeel	65.000	300.000 i.e.
	97.812	500.000 i.e.

**Overkoepelende baten**

Teruglevering electriciteit		
	-108.591	300.000 i.e.
	-163.408	500.000 i.e.

## Mixed culture route

<b>VFA fermentatie 300.000 i.e.</b>			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
Indikker (2)	51.300	PE	132.119
VFA fermentor (5)	364.500	Onderhoud	35.574
Centrifuge (2)	260.000	Kapitaallasten	294.750
PE-installatie	65.000	Electriciteit	15.618
VFA buffer (1)	50.928	Jaarlijkse kosten 300.000	478.061
Pompen (2 per pomp)	73.480	Jaarlijkse kosten 500.000	719.386
Electra en procesautomatisering	173.042	Jaarlijkse kosten 10.000.000	15.316.304
Civiele ruimten			
Centrifuge (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
Onvolledig	410.475		
Totaal	1.778.724		
Investering	3.059.405		

<b>Biomassaproductie 300.000 i.e.</b>			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
Electra en procesautomatisering	-	Onderhoud	-
Civiel	-	Kapitaallasten	-
Onvolledig	-	Electriciteit	-
Totaal	-	Jaarlijkse kosten 300.000	-
Investering	-	Jaarlijkse kosten 500.000	-
		Jaarlijkse kosten 10.000.000	-

<b>PHA-fermentatie 300.000 i.e.</b>			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
Opslag secundair slib	41.994		
PHA-productie	48.252	PE	14.392
Bezinker	13.439	Onderhoud	30.037
Blowers (2)	43.904	Kapitaallasten	248.871
Centrifuge (2)	260.000	Electriciteit	69.928
PE-installatie	65.000	Additionele P-verwijdering en slibproductie	25.445
PHA-buffer	14.092	Jaarlijkse kosten 300.000	388.673
Pompen (2 per pomp)	99.438	Jaarlijkse kosten 500.000	584.875
Electra en procesautomatisering	117.224	Jaarlijkse kosten 10.000.000	12.452.451
Civiele ruimten	-		
Centrifuge (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
PHA-productie	121.931		
Onvolledig	346.582		
Totaal	1.501.856		
Investering	2.583.193		

<b>Slibgisting 300.000 i.e.</b>			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
Indikker (2)	54.230	PE	263.070
PE-installatie	65.000	Onderhoud	124.565
Slibgisting	1.890.796	Kapitaallasten	1.032.079
Buffer uitgestigt slib	60.505	Electriciteit	-130.890
Centrifuge (2)	260.000	Afvoerkosten slib	1.008.053
PE-installatie	65.000	Jaarlijkse kosten 300.000	2.296.878
Slibsilo	35.091	Jaarlijkse kosten 500.000	3.456.343
Gashouder	69.000	Jaarlijkse kosten 10.000.000	73.588.298
Gasfakkel	25.435		
WKK	531.300		
Warmtewisselaar	91.038		
Biogasketel	12.007		
Pompen (2 per pomp)	84.642		
Electra en procesautomatisering	648.809		
Civiele ruimten	-		
Bandindikker (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
Centrifuge (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
WKK	120.000		
WW	87.500		
Biogasketel	30.625		
Onvolledig	1.437.293		
Totaal	6.228.272		
Investing	10.712.627		

**Overkoepelende kosten**

Operationele kosten			
personeel	65.000	300.000 i.e.	
	97.812	500.000 i.e.	

**Overkoepelende baten**

Teruglevering electriciteit			
	-45.345	300.000 i.e.	
	-68.235	500.000 i.e.	

## Referentieproces

Slibgisting 300.000 i.e.			
	EUR		EUR
Bouwkosten		Operationele kosten	
Indikker (2)	51.300	PE	301.258
Indikker (2)	63.214	Personeel	65.000
PE-installatie	65.000	Onderhoud	169.570
Slibgisting	3.112.336	Kaptitaallasten	1.404.965
Buffer uitgegist slib	99.595	Afvoerkosten slib	1.119.669
Centrifuge (2)	260.000	Jaarlijkse kosten 300.000	3.060.463
PE-installatie	65.000	Jaarlijkse kosten 500.000	4.605.386
Slibsilo	38.976	Jaarlijkse kosten 10.000.000	98.052.344
Gashouder	98.952		
Gasfakkel	36.484		
WKK	542.280		
Warmtewisselaar	149.853		
Pompen (2 per pomp)	129.044		
Electra en procesautomatisering	942.407		
Civiele ruimten	-		
Bandindikker (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
Centrifuge (2)	240.000		
PE-installatie	90.000		
WKK	120.000		
WW	87.500		
Onvolledig	1.956.582		
Totaal	8.478.523		
Investing	14.583.059		

## Opwerking rich culture route

<b>PHA productie 300.000 i.e.</b>					
<b>Bouwkosten</b>		<b>EUR</b>	<b>Operationele kosten</b>		<b>EUR</b>
	PHA-Buffer	39.976		NaCl	92.115
	NaCl-reactor	24.985		NaOH	259.075
	NaOH-reactor	25.759		Ethanol	1.747.517
	Centrifuge (2)	320.000		Elektriciteit	24.708
	Was-tank	6.089		Water	107.407
	Centrifuge (2)	260.000		Aardgas	15.309
	Ethanol-reactor	3.679		Personeel	65.000
	Centrifuge (2)	260.000		Onderhoud	143.581
	Droger	1.200.005		Kaptitaallasten	1.189.635
	Afvalwater buffer	14.799		Transportkosten	51.074
	Pompen (2 per pomp)	383.723		Verwerkingskosten afvalwater	1.576.540
	NaCl opslag	94.639		Jaarlijkse kosten 300.000	5.271.961
	NaOH opslag	34.345		Jaarlijkse kosten 500.000	7.933.251
	Ethanol opslag	105.705		Jaarlijkse kosten 10.000.000	168.905.225
	Electra en procesautomatisering	554.740			
	Civiele ruimten	-			
	PHA-Buffer	189.190			
	NaCl-reactor	98.822			
	NaOH-reactor	100.999			
	Centrifuge (6)	720.000			
	Was-tank	48.346			
	Ethanol-reactor	40.539			
	Droger	270.000			
	Afvalwater buffer	90.859			
	NaCl-opslag	248.615			
	NaOH-opslag	115.211			
	Ethanol-opslag	271.340			
	<b>Onvolledig</b>	<b>1.656.708</b>			
	<b>Totaal</b>	<b>7.179.070</b>			
	<b>Investing</b>	<b>12.348.000</b>			

## Opwerking mixed culture route

Slibgisting 300.000 i.e.			
Bouwkosten	EUR	Operationele kosten	EUR
PHA-Buffer	134.196	NaCl	309.227
NaCl-reactor	83.875	NaOH	869.702
NaOH-reactor	86.471	Ethanol	3.110.935
Centrifuge (2)	960.000	Elektriciteit	71.542
Was-tank	10.839	Water	360.559
Centrifuge (2)	320.000	Aardgas	27.254
Ethanol-reactor	6.549	Personeel	65.000
Centrifuge (2)	260.000	Onderhoud	263.819
Droger	1.903.525	Kapitaallasten	2.185.852
Afvalwater buffer	26.345	Transportkosten	171.453
Pompen (2 per pomp)	669.959	Verwerkingskosten afvalwater	9.167.889
NaCl opslag	317.699	Jaarlijkse kosten 300.000	16.603.233
NaOH opslag	115.294	Jaarlijkse kosten 500.000	24.984.558
Ethanol opslag	188.176	Jaarlijkse kosten 10.000.000	531.941.125
Electra en procesautomatisering	1.016.585		
Civiele ruimten	-		
PHA-Buffer	499.038		
NaCl-reactor	245.620		
NaOH-reactor	251.591		
Centrifuge (6)	960.000		
Was-tank	60.166		
Ethanol-reactor	49.650		
Droger	450.000		
Afvalwater buffer	138.032		
NaCl-opslag	669.899		
NaOH-opslag	290.765		
Ethanol-opslag	432.596		
Onvolledig	3.044.061		
Totaal	13.190.930		
Investering	22.688.400		