



## Is de Energie- en Grondstoffenfabriek wel duurzaam? Een levenscyclusanalyse van grondstoffen uit rioolwater

*Arjen van Nieuwenhuijzen (Witteveen+Bos), Marina Sanders (voorheen Witteveen+Bos), Cindy Visser (KNN Advies), Ingrid Odegard en Geert Bergsma (CE Delft)*

**Rioolwater bevat potentieel veel grondstoffen. Hoog in de grondstoffen top-5 staan fosfaat en organische bestanddelen (biogas, polyhydroxyalkanoaat, alginaat en cellulose). Bij de analyse van routes om deze terug te winnen is het van belang om niet alleen te kijken naar de technische en financiële haalbaarheid, maar ook naar het duurzaamheidsperspectief. In opdracht van STOWA, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RvO) en de Energie- en Grondstoffenfabriek hebben KNN Advies, CE Delft en Witteveen+Bos daarom voor deze stoffen een levenscyclusanalyse uitgevoerd. Uit de levenscyclusanalyse blijkt dat alle routes een milieuvoordeel hebben ten opzichte van de reguliere manier van rioolwater zuiveren.**

Energie en waardevolle grondstoffen winnen uit rioolwater is een belangrijk punt waarmee de waterschappen voorop willen lopen in de transitie naar een circulaire en biobased economie. Nu al produceren de waterschappen een kwart van hun jaarlijkse energiebehoefte uit het afvalwater dat zij in hun rioolwaterzuiveringsinstallaties zuiveren. Het streven is dat dit percentage in 2020 verhoogd is tot 40% en dat dit percentage daarna nog zal blijven groeien.

### **Energie- en grondstoffenfabriek**

In toenemende mate zijn de waterschappen ook in staat waardevolle grondstoffen uit afvalwater en eigen maaisel terug te winnen. Het gaat daarbij onder meer om fosfaat, cellulose, bioplastics en vetzuren, stikstof, CO<sub>2</sub>, alginaat en biocomposieten. De waterschappen werken hiertoe samen in de netwerkorganisatie 'Energie- en Grondstoffenfabriek' (EFGF), waarbij onderzoek en ontwikkeling worden gestimuleerd en gecoördineerd door de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). De innovatieve technieken die daarbij in samenwerking met kennisinstellingen en het bedrijfsleven worden ontwikkeld, geven Nederlandse bedrijven extra kansen voor de export. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RvO) ondersteunt daarom de EFGF.

De Energie- en Grondstoffenfabriek (EFGF) heeft tot doel de duurzaamheidsambities in de watersector te concretiseren. In 2014 hebben de waterschappen bovendien de Green Deal Grondstoffen gesloten met het Rijk, om (onderzoek naar) winning van grondstoffen uit rioolwater te stimuleren [1]. In het kader hiervan zijn al verschillende STOWA-onderzoeken gedaan, waaronder:

- Fosfaat teruggewinning in communale afvalwaterzuiveringsinstallaties [2];
- Verkenning mogelijkheden grondstof rwzi [3];
- Bioplastic uit slib, Verkenning naar PHA-productie uit zuiveringsslib [4].

Al deze studies hebben tot doel om diverse 'vervaardingsroutes' (routes waarlangs afvalstoffen weer economische waarde krijgen), waarbij terugwinroutes op rwzi-niveau (lokaal) en centraal niveau



(bijvoorbeeld bij eindverwerking van slib, of met rwzi als logistiek centrum) mogelijk zijn. De status van de initiatieven varieert anno 2016 van een globaal projectidee en businesscases tot ontwerp, realisatie en praktijktoepassingen [5].

### **Levenscyclusanalyses (LCA) grondstoffenterugwinning noodzakelijk**

Om onderzoek en pilots in de EFG te kunnen doorontwikkelen naar volledig geaccepteerde praktijktoepassingen is het van belang om de opwerkings- en productieroutes goed te analyseren. Welke routes zijn het meest gunstig in technisch-economisch perspectief (technische en financiële haalbaarheid)? En vanuit duurzaamheidsperspectief? Een uniforme levenscyclusanalyse (LCA) voor de verschillende routes is daarvoor essentieel. Ook maakt een LCA inzichtelijk waar een keten verder geoptimaliseerd kan worden, en is het mogelijk om milieuvordelen die downstream in de productketen kunnen worden behaald middels LCA in kaart te brengen. Hieronder vallen ook de productieroutes die vervallen door het gebruik van grondstoffen uit de rwzi, zoals mijnbouw (in geval van fosfor), productie van fossiele brandstoffen of andere (eindige of te verbouwen) grondstoffen. Omdat het terugwinnen van verschillende grondstoffen verschillende effecten heeft op een groot deel van de rwzi en slibverwerkingsketen is het belangrijk de effecten van de verschillende productieroutes apart te analyseren.

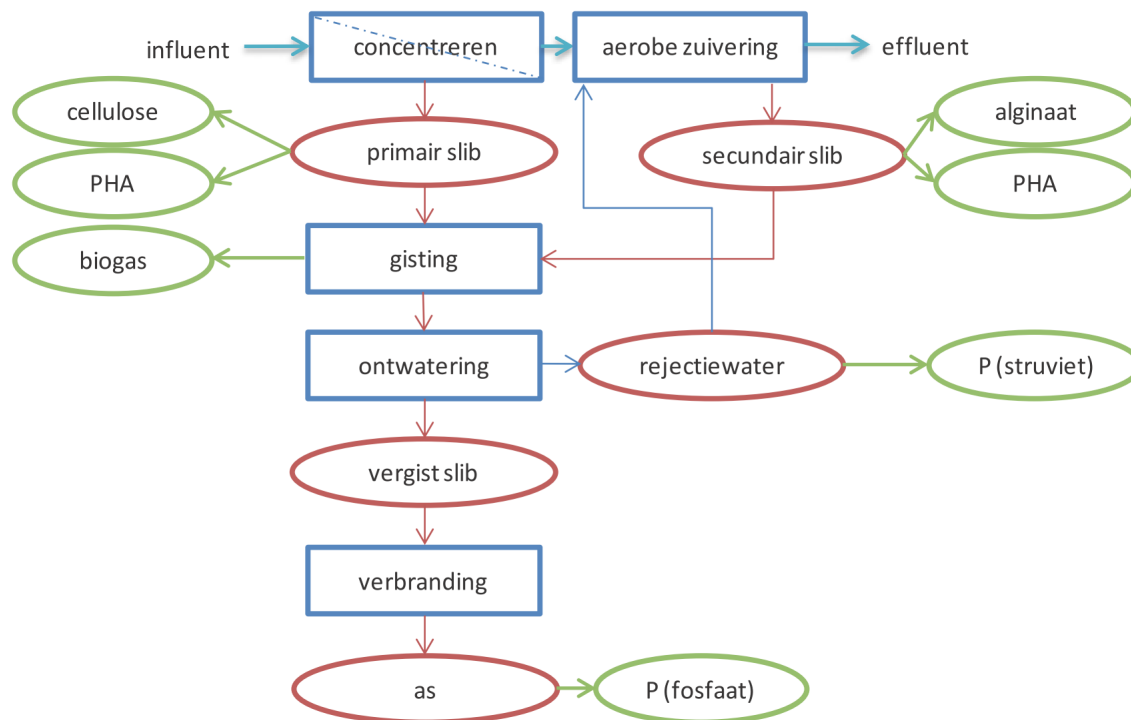
Alle activiteiten voor het verwerken van rioolwater, zoals bijvoorbeeld gebruik van elektriciteit en hulpstoffen, transport en verwerking van afvalstoffen en reststoffen, worden milieukundig gewaardeerd, meestal 'van wieg tot graf'. In de LCA in deze studie zijn alle additionele ingrepen opgenomen om het rioolwater te verwerken, met een bepaald eindproduct als resultaat. Hierbij gaat het om het verschil ten opzichte van de nu gangbare bedrijfsvoering op de rwzi. Grote systeemveranderingen zoals het ombouwen van een bestaande rwzi voor de productie van bepaalde grondstoffen zijn niet meegenomen in de LCA. Ook de financiële kosten en baten zijn buiten beschouwing gelaten.

### **Te analyseren producten/routes**

De grondstoffen uit de rwzi die in deze studie worden bekeken, zijn (zie afbeelding 1):

- NEO-Alginaat (alginate-like exopolysaccharide; ALE = korrelslib-alginaat; NEO = Nereda<sup>®</sup> extracted organic): een lijmstof die wordt geproduceerd door bacteriën en die verantwoordelijk is voor de vorming van het aerobe korrelslib. De hoeveelheid alginaat en de kwaliteit ervan lijkt beduidend hoger in aerob korrelslib dan in actief slib, vandaar de focus op winning van korrelslib-alginaat uit aerob korrelslib;
- PHA (polyhydroxyalkanoaat): een biopolymeer dat wordt geproduceerd door bacteriën als energie- en koolstofopslag. De focus ligt op winning van PHA uit primair en/of secundair slib;
- biogas: dit kan uit primair en secundair slib gewonnen worden middels gisting van het slib;
- cellulose: voornamelijk toiletpapier dat in het water zit; dit kan het beste als zeefgoed of uit primair slib gewonnen worden;
- fosfor: kan uit het nutriëntrijke rejectiewater gewonnen worden als struviet (magnesium-ammoniumfosfaat), of uit de verbrandingsas wanneer de concentratie in de as hoog genoeg is.

Overige terugwinroutes, van bijvoorbeeld stikstof, eiwitten en metalen, zijn in deze fase nog niet geanalyseerd omdat de *technology readiness level* nog onvoldoende vastgesteld is.



**Afbeelding 1. Schematisch overzicht van potentiële grondstofterugwinning uit de rwzi [5]**

Biogas wordt tegenwoordig al veel teruggewonnen en is daarmee geen nieuw product. Biogas is daarom in deze LCA opgenomen in de referentie. Door de productie van PHA, cellulose en alginaat zal de biogasproductie omlaag gaan. De LCA-resultaten geven inzicht in de milieuvor- en nadelen van het vervangen van biogas door andere producten.

De LCA is uitgevoerd met de analysemethode ReCiPe [5, 6]. In deze methode ligt de nadruk op de 'single score', waarin alle milieu-impactcategorieën gewogen zijn en resulteren in één eindscore. De single score wordt uitgedrukt in kilopunten (kPt). 1 kPt is de milieubelasting door één gemiddelde Europeaan. De gehanteerde methode is een door internationale experts aanbevolen aanpak voor het uitvoeren van verdere LCA's in de afvalwaterwereld.

De technologieën die in de EFGF ontwikkeld worden, zijn een aanvulling op de reguliere rwzi-processen. Daarom kijken we enkel naar de milieu-impact van het *verschil* in bedrijfsvoering op de rwzi: de additionele ingrepen (zie afbeelding 2). Het effect kan positief zijn (bijvoorbeeld een lager energiegebruik) of negatief (extra gebruik van hulpstoffen).



**Afbeelding 2: Verschil in bedrijfsvoering rwzi en rwzi + EFGF bepaalt milieu-impact van producten uit EFGF [5].**

### Functionele (reken)eenheid

De gehanteerde functionele eenheid is de verwerking van 100.000 i.e. influent van gemiddelde samenstelling in de EFGF (1 i.e. = 1 inwonerequivalent: vuilvracht in het afvalwater van 1 dag van 1 persoon, zuurstofverbruik 150 g/dag). De functionele eenheid sluit aan bij de functie van rwzi's, het verwerken van rioolwater.

De theoretische functionele eenheid is zo gekozen omdat dit de gemiddelde grootte is van een rwzi in Nederland. De totale zuiveringscapaciteit in Nederland is ongeveer 29 miljoen i.e. Driekwart van de rwzi's is kleiner dan 100.000 i.e., wat neerkomt op 30% van de totale capaciteit. Daarmee zit 70% van de capaciteit in rwzi's groter dan 100.000 i.e. [7]. 100.000 i.e. is ongeveer de scheiding tussen grote rwzi's, veelal met voorbezinktanks, en kleinere rwzi's zonder voorbezinktanks. Daarnaast is een schaal van 100.000 i.e. groot genoeg om bij het opzetten van de balansen voldoende significantie te krijgen. De waarden van deze schaalgrootte zijn eenvoudig te vertalen naar andere schaalgroottes. De concentraties en de vrachten per inwoner blijven namelijk gelijk, ongeacht de schaalgrootte; dus bij een schaalgrootte van 200.000 i.e. zullen de totale vrachten twee keer zo hoog zijn als bij 100.000 i.e.

De technologieën waarmee producten worden teruggewonnen zijn niet op elke rwzi toepasbaar vanwege verschillen in grootte en configuratie van rwzi's. Daarom zijn er drie referentie-rwzi's gedefinieerd, met elk verschillende procesparameters en mogelijkheden. Dit betekent ook dat de routes onderling niet vergeleken kunnen worden. Door deze referentiecasses te gebruiken is er een vergelijking mogelijk met het merendeel van de rwzi's in Nederland. Voor deze LCA wordt voor de slibverwerking uitgegaan van verbranding, aangezien het marktaandeel van monoverbranders >50% is. Tevens kan hierdoor de milieu-impact van fosfaat teruggewinning vanuit vlieg-as geanalyseerd worden. In de LCA is uitgegaan van drie verschillende configuraties voor de referentiecasses:

1. een voorbezinktank gevolgd door een actief-slibproces (rwzi's groter dan 100.000 i.e.);
2. alleen een actief-slibproces (rwzi's kleiner dan 100.000 i.e.);
3. een aerob korrelslibproces (Nereda®) voor NEO-alginaat.

### Resultaten LCA

Tabel 1 presenteert een samenvatting van de levenscyclusanalyse per grondstof. Het milieuvoordeel of -nadeel wordt uitgedrukt in de range van totale endpoints (in kPt/jaar). De LCA-uitkomsten voor fosfor en biomassa worden hierna nader toegelicht.

**Tabel 1. Overzicht van de belangrijkste LCA-resultaten voor de EFGF-vervaardingsroutes bij een rwzi-grootte van 100.000 i.e. per jaar**

Product	Milieuvoordeel of –nadeel? <sup>a</sup>	TRL <sup>b</sup>	Aandachtspunten
Fosfaat (struviet) afscheiden bij rwzi	Voordeel: 14-25 kPt/jaar	7-9	<ul style="list-style-type: none"> <li>niet mogelijk op een rwzi &lt; 100.000 i.e.</li> <li>doet P-concentratie in slib dalen, beperkt mogelijkheden voor fosfaaterugwinning uit slib</li> <li>efficiëntie P-terugwinning: 23-47% t.o.v. P in influent</li> <li>milieuvoordeel hoger bij toepassing WASSTRIP of vergelijkbaar proces</li> </ul>
Fosfaat (vlieg) afscheiden na slibverbranding	Voordeel: 4,5 kPt/jaar	7-8	<ul style="list-style-type: none"> <li>niet bij elke slibverwerker mogelijk (alleen bij monoverbranders)</li> <li>efficiëntie P-terugwinning: 82% t.o.v. P in influent</li> <li>voordeel mogelijk groter bij verbreden systeemgrenzen naar kunstmestproduct</li> </ul>
Polyhydroxy-alkanoaat (PHA)	Voordeel gemiddelde case: <ul style="list-style-type: none"> <li>PHA-productiecase 1: 22 kPt/jaar (bandbreedte van voordeel van 80 kPt/jaar tot nadeel van 23 kPt/jaar);</li> <li>PHA-productiecase 2: 35 kPt/jaar (bandbreedte van voordeel van 89 kPt/jaar tot nadeel van 9 kPt/jaar).</li> </ul>	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>juist ontwerp PHA-productiefabriek noodzakelijk om milieuvoordeel te benutten</li> <li>VFA-opbrengst heeft grootste invloed op nettoresultaat</li> <li>PHA-opbrengst is hoger wanneer ook primair slib voorhanden is</li> <li>biogasopbrengst (huidige situatie rwzi) wordt verlaagd</li> </ul>
Cellulose	Voordeel: <ul style="list-style-type: none"> <li>separaat vergisten: 46 kPt/jaar</li> <li>energiepellets: 36 kPt/jaar</li> <li>cellulosevezels: 34-45 kPt/jaar</li> </ul>	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>meer testen met zeefgoed winnen en opwerken nodig</li> <li>biogasopbrengst (huidige situatie rwzi) wordt verlaagd bij materiaalroute</li> </ul>
Alginate-like exopolysaccharide (ALE; Nereda <sup>®</sup> alginaat)	Voordeel gemiddelde case: 52 kPt/jaar (bandbreedte van voordeel van 115 kPt/jaar tot nadeel van 11 kPt/jaar)	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>juist ontwerp extractie-installatie noodzakelijk om milieuvoordeel te benutten</li> <li>alginaatopbrengst heeft grootste invloed op nettoresultaat</li> <li>biogasopbrengst (huidige situatie rwzi) wordt verlaagd</li> </ul>

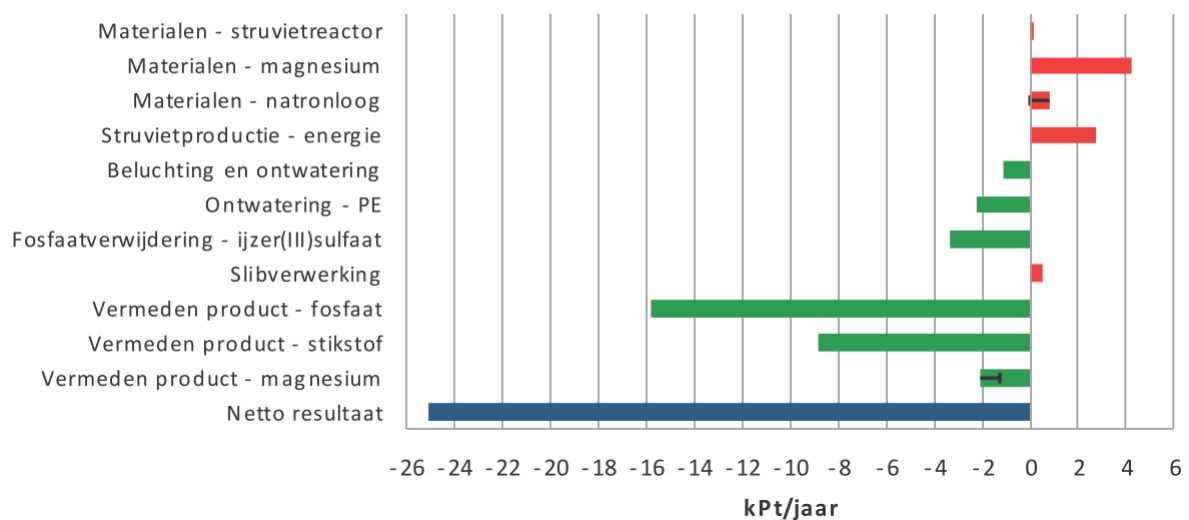
<sup>a</sup> 1 kPt is de milieubelasting door een gemiddelde Europeaan.

<sup>b</sup> De Technology Readiness Level (TRL) van een techniek bepaalt de ontwikkelingsstatus van een techniek op een schaal van 1-9 (waarbij 1 het innovatieve idee is en 9 een commercieel gereed product). De TRL hier weergegeven is de gemiddelde TRL volgens 18 experts.

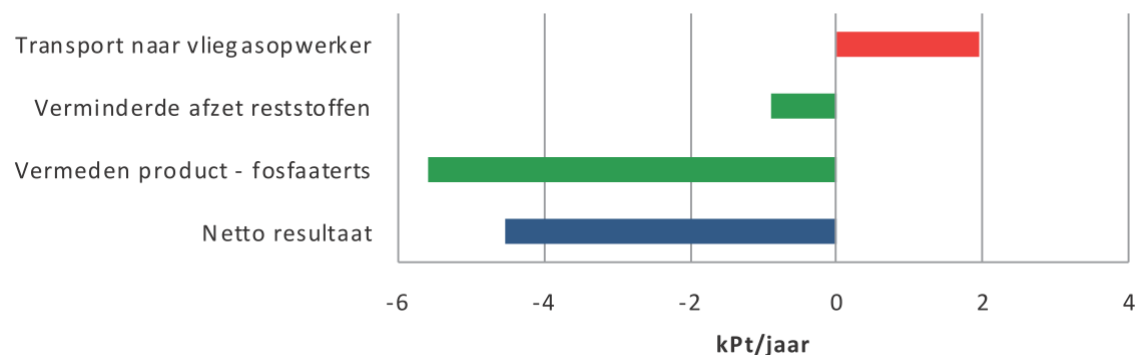
### a. Duurzaamheid van fosfaatterugwinning

Er zijn in deze studie twee routes voor de terugwinning van fosfaat uit rioolwater bekeken:

1. Terugwinning op de rwzi (decentrale terugwinning), waarbij hoogwaardig struviet op de rwzi geproduceerd wordt. Dit kan gebruikt worden als meststof, en vervangt daarmee kunstmest.
2. Terugwinning door de slibverwerker (centrale terugwinning), waarbij de vlieg-as van de slibverwerker (monoverbranding) dient als grondstof voor productie van fosfaatproducten via as-uitloging. In deze studie is het proces bekeken tot afzet van de vlieg-as aan de eindverwerker, waarbij de vlieg-as fosfaaterts vervangt. Dit kan verder opgewerkt worden tot kunstmest of diervoeder.



**Afbeelding 3. Single score voor decentrale fosfaatterugwinning (struvietwinning op de rwzi met reactor en WASSTRIP; referentie: geen struvietwinning)**



**Afbeelding 4. Single score voor centrale fosfaatterugwinning (vlieg-as vervangt opgewerkt fosfaaterts uit mijnbouw)**

De routes hebben een verschillende P-terugwinefficiëntie; in de route via de slibverwerker wordt meer fosfaat teruggewonnen dan in de rwzi-route (82% vs. 23-47% van het P in het influent). Voor een zo duurzaam mogelijke terugwinning van fosfaat, waarbij we rekening houden met milieukundig voordeel en circulariteit, is het noodzakelijk beide routes zo optimaal mogelijk in te zetten. Dat betekent terugwinning via struviet waar dat kan, waarbij het slib van die rwzi's zoveel mogelijk bij andere

slibverwerkers dan monoverbranders terechtkomt. Dit in combinatie met terugwinning uit slib via monoverbranders, waarin de concentratie fosfaat in slib hoog genoeg blijft om terugwinning mogelijk te maken. Een dergelijk optimaal scenario voor maximale fosfaatafscheiding en milieuwinst kan als duurzame roadmap worden ontwikkeld op basis van deze studie.

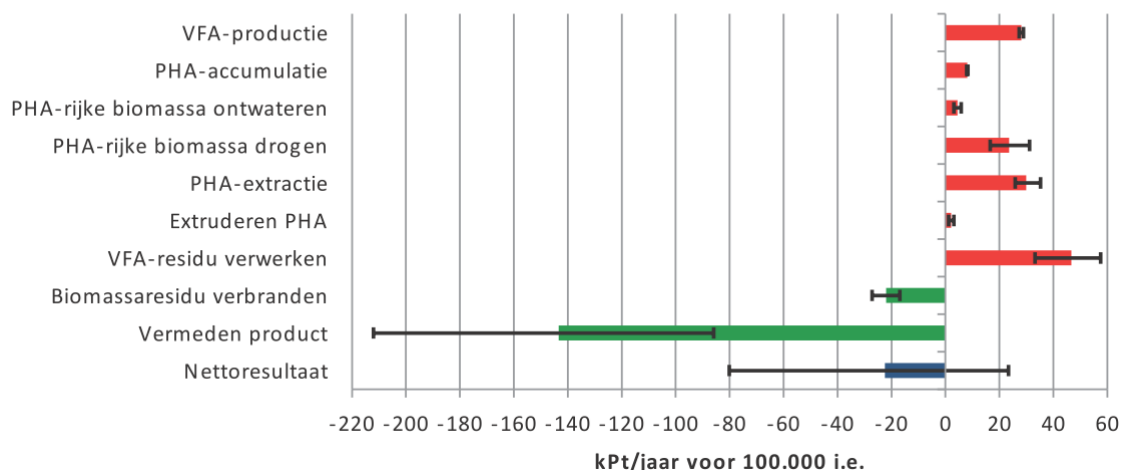
### **b. Duurzaamheid van benutting van organische stof**

Er zijn in deze studie drie verwaardingsroutes voor organische stof uit rioolwater onderzocht:

1. productie van PHA,
2. terugwinning van cellulose
3. terugwinning van korrelslib-alginaat (ALE).

#### **1. PHA**

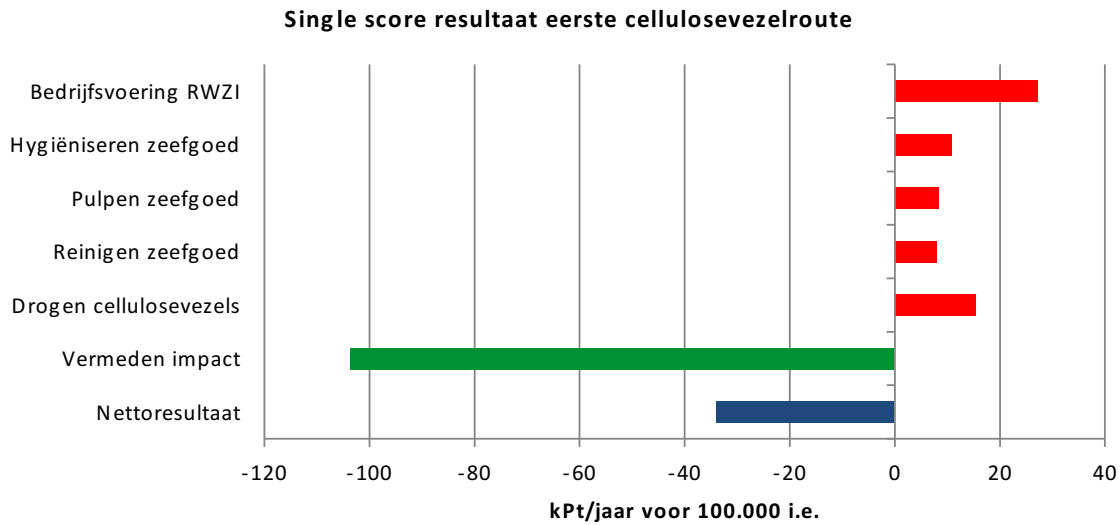
PHA wordt geproduceerd uit slib via *mixed culture* met vluchtige vetzuren (VFA) als voedingsbron. De VFA's moeten eerst nog zelf uit slib geproduceerd worden voordat PHA-productie plaats kan vinden. Door de eigenschappen van PHA (waaronder biologische afbreekbaarheid) kan dit gebruikt worden als bioplastic, maar dan wel in nieuwe markten/toepassingen. PHA vervangt dan ook geen ander soort plastic, maar wel PHA geproduceerd via monocultuur.



**Afbeelding 5. Single score van PHA-productiecase 1 (verschil met situatie zonder PHA-productie), inclusief onzekerheidsrange**

#### **2. Cellulose**

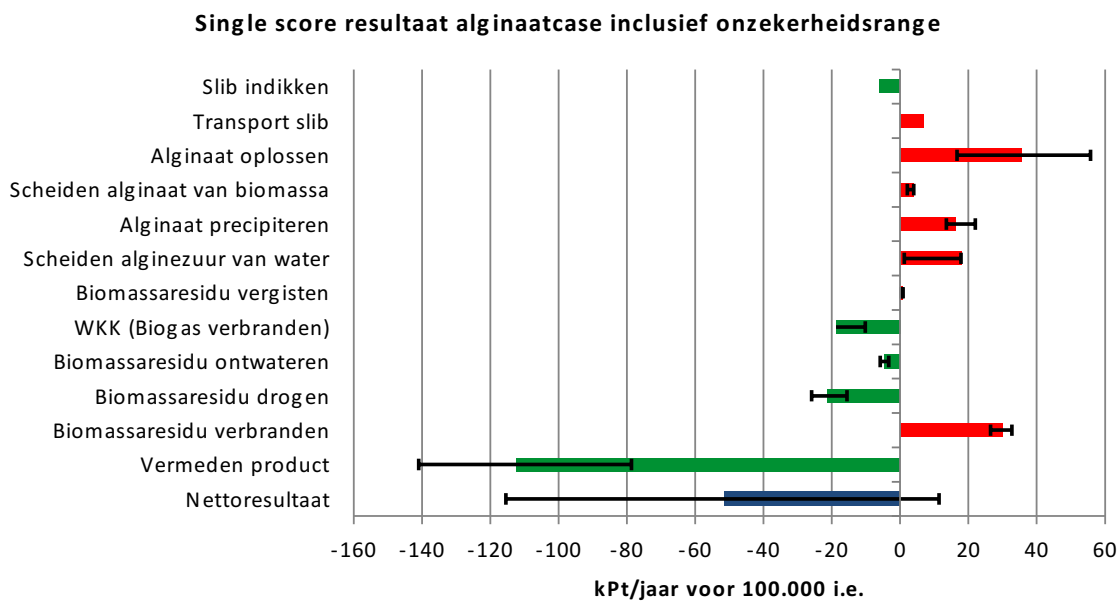
Cellulose wordt op de rwzi teruggewonnen als zeefgoed. Dit zeefgoed kan daarna opgewerkt worden tot energie (via separaat vergisten of door verbranden als pellets) of materiaal (cellulosevezels). Voor het opwerken tot cellulosevezels kan gebruik worden gemaakt van een aantal processtappen van de papierrecyclingsketen. Cellulosevezels kunnen gebruikt worden als afdruiptremmers of isolatiemateriaal, en vervangen daarmee oudpapier.



**Afbeelding 6. Single score van een van de cellulosevezelroutes (verschil met situatie zonder zeefgoedwinning)**

### 3. NEO-Alginaat

ALE wordt geproduceerd uit korrelslib. In deze studie is het ALE gewonnen in de vorm van alginezuur. ALE kan gebruikt worden als algiinaat, en kan daarmee algiinaat uit zeewier vervangen. Zeewieralgiinaat wordt momenteel voornamelijk toegepast in textiel, voedingsmiddelen, bouw en papierindustrie. Toepassing van ALE uit communale korrelslib wordt vanwege de herkomst niet overwogen in de voedingsmiddelensector.



**Afbeelding 7. Single score van de algiinaatproductie (verschil met situatie zonder ALE-terugwinning), inclusief onzekerheidsrange**





#### **4. Organische stof – totaal**

Alle drie de verwaardingsroutes hebben milieuvoordeel. Door de onzekerheid in enkele parameters bij de productie van PHA en ALE zit er een bandbreedte op de milieu-impact van de routes en verdwijnt het milieuvoordeel als het allemaal tegenzit of wordt het milieuvoordeel groter als impacts meevallen. Of het hier berekende milieuvoordeel daadwerkelijk behaald wordt is afhankelijk van het ontwerp van de productieroute.

In het geval van PHA-productie heeft de VFA-opbrengst de grootste invloed op de netto milieuscore, gevolgd door butanolterugwinning en VFA-consumptie. In het geval van ALE-productie heeft de alginaatopbrengst de grootste invloed, gevolgd door chemicaliëngebruik. Het is belangrijk om de hier nu genoemde parameters prioriteit te geven bij optimalisatiestudies. Voor cellulose geldt dat de energieroutes (separaat vergisten en energiepellets) net zoveel milieuvoordeel bieden als de cellulosevezelroutes.

Voor rwzi's zijn lokale doelstellingen en de configuratie ter plaatse belangrijk bij het bepalen welke van de drie verwaardingsroutes voor organische stof het beste geïmplementeerd kan worden.

De drie verwaardingsroutes PHA-productie, cellulosewinning en ALE-productie passen alle drie in de doelstellingen van de biobased economy: van tweede generatie biomassa (slib) kunnen weer biomaterialen (PHA, cellulose, Nereda® alginaat) gemaakt worden.

#### **Conclusie**

Met de LCA in deze studie is de milieu-impact van verschillende routes voor het winnen van grondstoffen uit rioolwater onderzocht. De routes zijn: fosfaatterugwinning op de rwzi via struviet en uit de vliegias van slibmonoverbranding, en terugwinning van organische stof via de productie van PHA, cellulose, en alginaat. Uit deze studie blijkt dat alle onderzochte routes een milieuvoordeel opleveren ten opzichte van de huidige situatie: productie van biogas. Voor PHA- en alginaatproductie is er echter een potentieel risico op een milieunadeel wanneer de processen niet optimaal ontworpen of bedreven worden.

Anno 2016 wordt er door waterschappen veel aandacht besteedt aan biogasproductie. Uit deze studie blijkt dat alle andere verwaardingsroutes voor organisch materiaal – PHA-productie, cellulose-winning, en ALE-productie – leiden naar biopolymeerproducten die een milieuvoordeel kunnen geven ten opzichte van het produceren van biogas. Biopolymeren (PHA, cellulose en ALE) staan immers hoger in de waardepyramide dan energie (biogas).

Dus, om antwoord te geven op de vraag in de titel: ja, de EFGF is duurzamer dan een conventionele rwzi. Volledig duurzaam willen we de routes nog niet noemen, want er is zeker nog verbetering mogelijk. Tot slot moet ook opgemerkt worden dat in deze studie niet gekeken is naar de kosten van de verschillende technieken. Deze dienen bij een volledige duurzaamheidsanalyse nog afgewogen te worden tegen het te behalen milieuvoordeel.



## Literatuur

1. GD174 (2014). GD174 -Green Deal Grondstoffen Unie van Waterschappen – Rijk. Green Deals. URL <http://www.greendeals.nl/themas/grondstoffen/>
2. STOWA (2011). Fosfaatterugwinning in communale afvalwaterzuiveringsinstallaties, STOWA-rapport 2011-24, Amersfoort.
3. STOWA (2013). Verkenning mogelijkheden grondstof rwzi, STOWA-rapport 2013-31, Amersfoort.
4. STOWA (2014). Bioplastic uit slib verkenning naar PHA-productie uit zuiveringslib, 2014-10, Amersfoort.
5. STOWA (2016). Levenscyclusanalyse grondstoffen uit rioolwater. STOWA, RvO, Grondstoffenfabriek, STOWA rapport 2016- 22, Amersfoort.
6. Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R., (2009). ReCiPe 2008. Life Cycle Impact Assess. Method Which Comprises Harmon. Categ. Indic. Midpoint Endpoint Level version 1.08.
7. <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=7477&D1=0,12,43,55&D2=0&D3=I&HDR=G1,T&STB=G2&VW=T>, geraadpleegd op 9 september 2015.