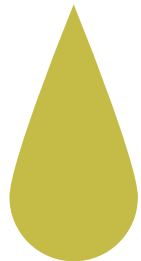


INTERREG VA-Project
Groen Goud
Afsluitend bericht



Uitgevers: Johannes Reef/Frederik Wanink

DNL-contact, Steinfurt, augustus 2019

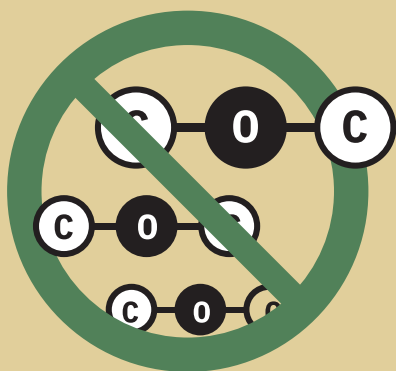
FH Münster, Saxion Hogeschool, Alba Baving GmbH, Foreco,

BTG Biomass Technology Group B.V., Lohmann GmbH,

Döpik Umwelttechnik GmbH, WESSLING Holding GmbH & Co. KG

GROEN GOUD POTENTIES

Biomassa: 4 miljoen t/jaar



CO₂-reductie:
500.000 t CO₂-equivalenten
emissies

Economie en werkgelegenheid:
Besparingen van 17 miljoen €/jaar
en 400 extra banen



Duurzame energie:
10 miljoen GJ/jaar, komt overeen
met 150.000 huishoudens

COLOFON:

INTERREG VA-project Groen Goud, leadpartner DNL-contact

www.groen-goud.eu

Uitgever:

Johannes Reef / Frederik Wanink, DNL-contact, Steinfurt

Copyright ©: DNL-contact

Vormgeving:

Dirk Sandbaumhüter

Vertaling:

DNL-contact

Contact:

DNL-contact,
Dr. Johannes Reef,
Bahnhofstraße 35,
48565 Steinfurt,
Tel.: +49 (0)2551 7047110
info@dnl-contact.de

Dit project werd in het kader van het INTERREG-programma financieel ondersteund door de Europese Unie en de INTERREG-partners.

www.deutschland-nederland.eu



Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat



PROJECTPARTNERS

Leadpartner

DNL-contact GmbH & Co KG

Bahnhofstraße 35
48565 Steinfurt
Tel. +49 (0) 2551 70 47 110
Fax +49 (0) 2551 70 47 118
info@dnl-contact.de
www.dnl-contact.de



hogescholen:

FH Münster

Fachbereich Energie · Gebäude · Umwelt
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt
+49 (0)2551/962725
www.fh-muenster.de/egu



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Saxion Hogeschool

Academie Life Science, Engineering & Design
M. H. Tromplaan 28
7513 AB Enschede
+31 (0)88 0191422
www.saxion.nl



MKB:

Alba Baving GmbH

Dieselstraße 14
48485 Neuenkirchen
+49 (0)5973 9499-0
www.alba-baving.de



Foreco

Postbus 73
7720 AB Dalfsen
+31 (0)529 - 43 15 48
www.foreco.nl



FORECO
innovatief in hout

BTG Biomass Technology Group B.V.

Josink Esweg 34
7545 PN Enschede
+31 (0)53 486 1186
www.btgworld.com



Lohmann GmbH

Gutenbergstraße 7
48282 Emsdetten
+49 (0)2572 93050
www.lohmann-entsorgung.de



LOHMANN

Döpik Umwelttechnik GmbH

Südlohner Weg 23
48703 Stadtlohn
+49 (0)2563 93633-0
www.doepik.de



WESSLING Holding GmbH & Co. KG

Oststraße 7
48341 Altenberge
+49 (0)2505 89-0
www.wessling.de



WESSLING
Quality of Life

INHOUD

Het project Groen Goud	
Samenvatting	6
 Werkpakket Projectmanagement	 11
 Werkpakket 1	
Inventarisatie en voorbereiding grondstoffen	12
 Werkpakket 2	
Pyrolyse en fractionering	18
 Werkpakket 3	
Opwaardering van de pyrolyse-olie	27
Fracties pyrolyse-olie voor houtmodificatie	32
 Werkpakket 4	
Opwaardering van de anorganische fractie	37
 Werkpakket 5	
LCA productie en toepassing van pyrolyse-olie	41
 Slotwoord	 49

HET PROJECT GROEN GOUD

Leadpartner:

- DNL-contact GmbH & Co KG, Steinfurt

Projectpartners:

Hogescholen:

- FH Münster
- Saxion Hogeschool Enschede

MKB:

- BTG Biomass Technology Group B.V., Enschede
- Döpik Umwelttechnik GmbH, Stadtlohn
- WESSLING Holding GmbH & Co. KG, Altenberge
- Alba Baving GmbH, Neuenkirchen
- Foreco, Dalfsen
- Lohmann GmbH, Emsdetten

Projectbudget:

- 2,2 mln. euro

Projectduur:

- 01-04-2015 t/m 31-08-2019

Gefinancierd door:

- EFRE / EFRO INTERREG VA
- Ministerie van Economische Zaken
- Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
- Provincie Overijssel

Samenvating

Het beperken van de CO₂-uitstoot en het beschermen van het klimaat stellen zowel Duitsland als Nederland voor grote uitdagingen. Het gebruik van duurzame biomassa-residuen voor het opwekken van duurzame energie of als grondstof voor nieuwe, hoogwaardige producten kan hierbij helpen. Veel van de biomassa-residuen – aan beide zijden van de grens – zijn echter niet geschikt voor hoogwaardige toepassingen. Pyrolyse – een techniek om biomassa om te zetten in een vloeistof – is hiervoor een oplossing. Daarbij gaat het om de thermische afbraak van chemische verbindingen bij hoge temperaturen onder afwezigheid van zuurstof, met als gevolg dat uit de biomassa olie wordt geproduceerd. In principe is dit hetzelfde proces dat aardolie gedurende honderden jaren diep in de aarde heeft ondergaan, alleen kunstmatig. De eerste zelfstandige stand-alone-pyrolyse-fabriek in Europa werd eind 2014 in Hengelo in gebruik genomen.

In het Groen Goud project zijn laagwaardige biomassa-stromen systematisch gekarakteriseerd, en is bepaald in hoeverre zij geschikt zijn voor pyrolyse. Verder is de fractionering (een scheidingstechniek) van pyrolyse-olie een stap verder gebracht, en zijn een aantal hoogwaardige toepassingen geïdentificeerd, zoals houtverduurzaming, verf en resins. De eerste houtproducten met pyrolyse componenten zijn onlangs op de markt geplaatst. Via een levenscyclusanalyse (LCA) is vastgesteld hoe duurzaam het gebruik van pyrolyse-olie in houtproducten kan zijn. Dit is gepubliceerd in een wetenschappelijk tijdschrift.

Doel

Het INTERREG VA-project Groen Goud brengt een Duits-Nederlands consortium van twee hogescholen en verschillende kleine en middelgrote ondernemingen (MKB) uit beide landen samen om gezamenlijk Onderzoek te doen naar innovaties voor de productie van pyrolyse-olie uit laagwaardige biomassa-stromen dat vervolgens kan worden gebruikt als grondstof voor de ontwikkeling van kwalitatief hoogwaardige producten en chemicaliën. Specifieke doelen zijn:

1. De ontwikkeling van pyrolyse als toepassing voor laagwaardige biomassastromen.
2. Het gebruik van pyrolyse-olie voor energiedoeleinden en de bewerking van de olie tot hoogwaardige chemicaliën.

Aanpak, werkpakketten en resultaten

Om deze doelstellingen te bereiken, werden vijf inhoudelijke werkpakketten (WP) uitgevoerd. In deze werkpakketten werkten de projectpartners intensief samen, waarbij de projectpartner met de grootste expertise op het betreffende gebied de leiding op zich nam. Inhoudelijk bouwden de werkpakketten op elkaar voort.

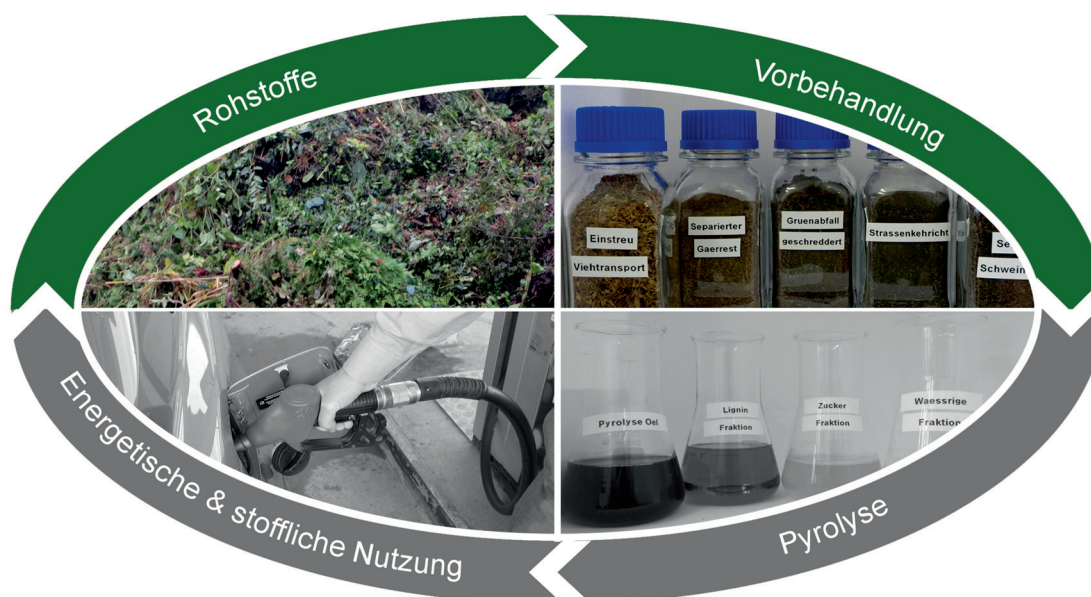
Inventarisatie en pyrolysetests

In WP 1 is onder leiding van FH Münster een inventarisatie van biogene residuen uitgevoerd. Op basis hiervan is een selectie gemaakt van tien reststromen, die vervolgens in WP 2 onder leiding van BTG (Biomass Technology Group) in het pyrolyse- en fractioneringsproces zijn getest. Daarnaast werd er nog een selectieproces toegepast waaruit drie reststoffen zijn voortgekomen die op grote schaal zijn getest in de mini pyrolyse plant en in de pilot plant van BTG. Deze experimenten toonden aan dat de fermentatieresiduen van een „NawaRo“-installatie (*Nachwachsende*

Rohstoffe, biogasinstallatie die werkt op bepaalde herwinbare materialen) het meest geschikt waren voor het pyrolyseproces. De verwerking verliep het soepelst en de olieproductie was het effectiefst. Deze pyrolyse-olie kan gebruikt worden als brandstof. De olie was echter fase-gescheiden, zodat verdere fractionering technisch niet mogelijk was. In het geval van maïssilage, een alternatieve biomassastroom, kon de olie wel worden gefractioneerd en getest in de ontwikkeling van hoogwaardige producten.

Opwaardering

De verwerking van de pyrolyse-olie was het doel van WP 3: onder leiding van de Saxion Hogeschool werd onderzocht of en hoe de verschillende fracties kunnen worden gebruikt voor hoogwaardige toepassingen. De focus lag op het gebruik van de zure waterfractie en de pyrolytische suikerfractie. De toepassing van een innovatief vrieskristallisatieproces, waarbij het water wordt bevroren en als ijs uit de vloeistof kan worden verwijderd, is voor beide fracties succesvol gebleken. Dit proces maakt het mogelijk om de zure waterfractie en de pyrolytische suikerfractie efficiënt om te zetten in een geschikte brandstof en gezuiverd water (ijs). Op grond van de waterige eigenschappen van deze pyrolysefracties werden ook microbiologische verwerkingstechnieken getest, aangezien veel micro-organismen zeer goed



groeien in waterige omgevingen. Een langdurige test waarbij de zure waterige fractie werd vergist tot biogas toonde aan dat de bacteriën na zes maanden nog steeds in staat zijn om biogas te produceren. Het is aangetoond dat de bacteriën kunnen overleven in een verdunde zure, waterige fractie, hoewel deze voor micro-organismen giftige stoffen kan bevatten. Dit betekent dat het in de toekomst mogelijk zal zijn om een nieuwe vergister te ontwerpen waarin de zure waterige fractie continu wordt omgezet in duurzaam biogas en relatief schoon afvalwater. Naast de methaanproductie hebben pyrolytische suikers en de zure waterfractie zich ook bewezen als waardevolle electronendonoren voor diverse microbiologische processen, bijvoorbeeld in rioolwaterzuiveringsinstallaties. Het is aangetoond dat sulfaat kan worden omgezet in sulfide en selenaat in selenium. De vervanging van de momenteel gebruikte electronendonoren zoals glycerol of ethanol kan leiden tot effectieve kostenbesparingen.

Producten voor de houtindustrie

Daarnaast werden veelbelovende experimenten uitgevoerd voor het verduurzamen van hout door Foreco in samenwerking met BTG met formuleringen geproduceerd uit pyrolyse-olie. Er werden 21 mengsels (formuleringen) geproduceerd die momenteel in een pilot installatie worden getest (impregnering). Voordat deze producten commercieel kunnen worden ingezet zullen, ook na afloop van de subsidiefase nog aanvullende ontwikkelingsstappen moeten worden uitgevoerd. Een patentaanvraag wordt momenteel overwogen. Bij BTG is daarnaast lignine getest in het gebruik van verven en composieten.

Opwaardering van de anorganische fractie

Parallel daaraan werd in werkpakket 4, eveneens onder leiding van Saxion, de opwaardering van de anorganische fractie onderzocht. Wanneer voor de pyrolyse gebruik wordt gemaakt van laagwaardige biomassastromen, zoals gedroogd digestaat, dan neemt de anorganische fractie in grootte toe tot 40-50 %. Met dit hoge percentage lijkt het verstandig om ook de anorganische fractie om te zetten in een nuttig product. De anorganische fractie bestaat voornamelijk uit as. Dit wordt

momenteel door de wetgeving als afval beschouwd omdat het zware metalen bevat. Hoewel calcium en magnesium in de as nuttig zijn om de pH-waarde van de bodem te stabiliseren, maken zware metalen het momenteel onmogelijk om de as rechtstreeks als meststof te gebruiken. Uit filtratie-experimenten is echter gebleken dat het mogelijk is om de zware metalen uit de as te verwijderen. Dit biedt perspectieven om de as, die tot nu toe als afval wordt beschouwd, om te zetten in een product voor bodemverbetering.

Life Cycle Analyse

In werkpakket 5 zijn de milieueffecten van de productie en toepassing van pyrolyse-olie onderzocht in het kader van een Life Cycle Analyse (LCA) onder leiding van BTG. Met name het gebruik van digestaat uit een NawaRo-installatie als alternatieve grondstof in verhouding tot het gebruik van bosbouwresiduen werd onderzocht. Hoewel is aangetoond dat de milieueffecten van het gebruik van bosbouwresiduen geringer zijn, betekent dit niet dat zij altijd het betere alternatief zijn. Het digestaat is immers een afvalstof van lagere kwaliteit. Daarnaast werd het gebruik



Figuur 1: Testfase in het lab

van pyrolysefracties voor het verduurzamen van hout onderzocht. In deze toepassing kunnen de pyrolytische suikers die worden verkregen door het scheiden van de pyrolyse-olie-fracties, creosoot vervangen. Het uit steenkoolteer geproduceerde creosoot wordt momenteel nog veelvuldig gebruikt om hout te verduurzamen. Het gebruik van pyrolytische suiker in het verduurzamen van hout geeft aanzienlijk betere resultaten dan creosoot m.b.t. gezondheidsschade voor de mens en de toename van de grondstof schaarste, wat twee cruciale parameters zijn voor de beoordeling van de milieueffecten.

Uit de kosten-batenanalyse, die tegelijkertijd werd uitgevoerd, bleek dat de gehele waardeketen van het pyrolyseren van de maïssilage tot het fractioneren van de olie en het gebruik van de suikerfractie als houtverduurzamingsmiddel economisch haalbaar is.

Duits-Nederlandse samenwerking

De intensieve Duits-Nederlandse samenwerking droeg in belangrijke mate bij aan het bereiken van de doelstellingen, aangezien de projectpartners elkaar optimaal aanvulden. Aan de FH Münster werd de inventarisatie van verschillende biogene restmateriaalstromen uitgevoerd en de voorbehandeling daarvan op semi-technische schaal ontwikkeld. Dit traject werd uitgevoerd in samenwerking met de Entsorgungsgesellschaft Steinfurt te Saerbeck, die verschillende soorten digestaat van biogasinstallaties leverde. Verdere reststromen werden geleverd door het straatreinigingsbedrijf Alba Baving GmbH en het afvalverwerkingsbedrijf Lohmann GmbH. Door de nauwe samenwerking tussen de MKB's, de hogescholen en de Biomass Tech-

nology Group B.V. is de testfase met een aantal verschillende biomassa residustromen probleemloos verlopen.

In een tweede stap werden bij BTG in verschillende reactoren geselecteerde reststromen gepyrolyseerd. In deze experimentele fase was er een bijzonder intensieve persoonlijke samenwerking tussen BTG en de FH Münster. Dit kwam onder andere tot uitdrukking door dat de wetenschappelijke medewerker van de FH Münster en de latere leider van het eerste werkpakket, Tobias Weide, BTG in het kader van zijn master-thesis met de pyrolyse-tests op de locatie in Enschede heeft ondersteund. Vervolgens werden de resultaten van het werk - de verschillende soorten pyrolyse-olie - onderzocht door de tweede hogeschool die bij het project betrokken was, de Saxion Hogeschool Enschede. Deze analyse werd uitgevoerd in nauwe samenwerking met WESSLING Holding GmbH & Co KG, een wereldwijd actief analyse- en testbedrijf uit Altenberge. Ook hier vulden de Duitse en Nederlandse knowhow elkaar aan in de interactie tussen de hogeschool en het MKB. De verwerking van pyrolytische suiker tot een houtverduurzamingsmiddel werd mogelijk gemaakt door de samenwerking tussen BTG en Foreco - een ander voorbeeld van de buitengewone productiviteit die kan voortvloeien uit de samenwerking tussen het bedrijfsleven en de kennisinstellingen.

Tijdens de regelmatige projectvergaderingen en workshops vond er een voortdurende uitwisseling plaats tussen alle projectpartners, die niet alleen ten goede kwam aan het gehele project, maar ook aan de afzonderlijke projectpartners met betrekking tot hun grensoverschrijdende activiteiten.

Conclusie

Meer dan 30 biogene reststoffen werden grondig onderzocht, waarvan er tien op de shortlist voor het pyrolyseproces werden geplaatst. Op basis van verdere selectie- en testprocedures werden drie van deze stromen uitgebreid getest in verschillende pyrolyseprocessen van verschillende schaal (schroefreactor, mini pyrolyse plant en een pilot plant). De uitgevoerde experimenten hebben aangetoond dat fermentatieresiduen van een NawaRo-installatie het meest geschikt zijn voor het pyrolyseproces, aangezien de verwerking het soepelst verliep en de olieproductie het effectiefst was. De op deze manier geproduceerde pyrolyse-olie kan worden gebruikt voor energietoepassingen. Daarnaast werd het pyrolyseproces ook uitgevoerd met maïssilage. Het voordeel van de daaruit verkregen pyrolyse-olie was dat deze gefractioneerd kon worden. Verschillende verwerkingstechnieken, zoals vrieskristallisatie, hebben aangetoond dat het in de toekomst mogelijk zal zijn om een vergister te ontwikkelen waarin de zure waterige fractie continu wordt omgezet in duurzaam biogas en relatief schoon afvalwater. Verder onderzoek heeft aangetoond dat pyrolytische suikers en de zure waterfractie kunnen worden

gebruikt als waardevolle elektronendonoren voor verschillende microbiologische processen, bijvoorbeeld in rioolwaterzuiveringsinstallaties.

Pyrolytische lignine kon in het project worden gebruikt als grondstof voor verf en resins/composieten en de pyrolytische suikers in houtverduurzamingsmiddelen. Er zijn 21 mengsels geproduceerd, die in een impregneerinstallatie worden getest en naar verwachting zullen worden doorontwikkeld tot hoogwaardige chemicaliën/producten. Het project heeft ook waardevolle inzichten opgeleverd in de verwerking van de anorganische fractie. Met behulp van filtratie-experimenten is het gelukt om de zware metalen uit de as te verwijderen. Het is dus eventueel mogelijk om de as, die tot nu toe als afval wordt beschouwd, te verwerken tot een product voor bodemverbetering. De Life-Cycle- en economische analyse hebben uiteindelijk bewezen dat de in het project onderzochte ontwikkelingsstappen haalbaar zijn. Het „Groen Goud“ project heeft daarmee een uitstekende basis gelegd voor verdere ontwikkeling en toepassing van laagwaardige biomassaströmen in de pyrolyse, alsook voor het gebruik van pyrolyse-olie voor energiedoelstellingen en de opwaardering van de olie tot hoogwaardige chemicaliën.



Figuur 2: Tuinhuis geschilderd met de nieuw ontwikkelde verf.

**dr. Johannes Reef**Projectleider
DNL-contact**ing. Frederik Wanink**Projectleider
DNL-contact

Werkpakket Projectmanagement

De projectleiding was de taak van DNL-contact Steinfurt. DNL-contact was verantwoordelijk voor de coördinatie van alle projectactiviteiten, de externe communicatie met de subsidieverstrekken en het programmamanagement van INTERREG.

Alle activiteiten, bijeenkomsten en workshops werden gecoördineerd door DNL-contact. Dit is nuttig en effectief gebleken, vooral bij grensoverschrijdende processen. Zo waren er altijd tolken beschikbaar en werden alle projectdocumenten tweetalig voorbereid of vertaald in het Duits en het Nederlands. DNL-contact assisteerde ook bij het overbruggen van culturele verschillen in werkprocessen.

Bij de samenstelling van het projectconsortium en de indiening van de projectaanvraag heeft DNL-contact eveneens een cruciale rol gespeeld. Hierbij werd gebruik gemaakt van het bestaande netwerk naar het bedrijfsleven en kennisinstellingen in de EUREGIO. De administratieve afhandeling van het project verliep probleemloos. Alle goedgekeurde projectgelden werden gebruikt in overeenstemming met de projectaanvraag. DNL-contact was als leadpartner juridisch verantwoordelijk voor het project.



Figuur 1: Afsluitende workshop op 9 april 2019 in Enschede.



dr. Elmar Brüggling

Hoofd van het
onderzoeksteam
FH Münster



Tobias Weide, M.Sc.

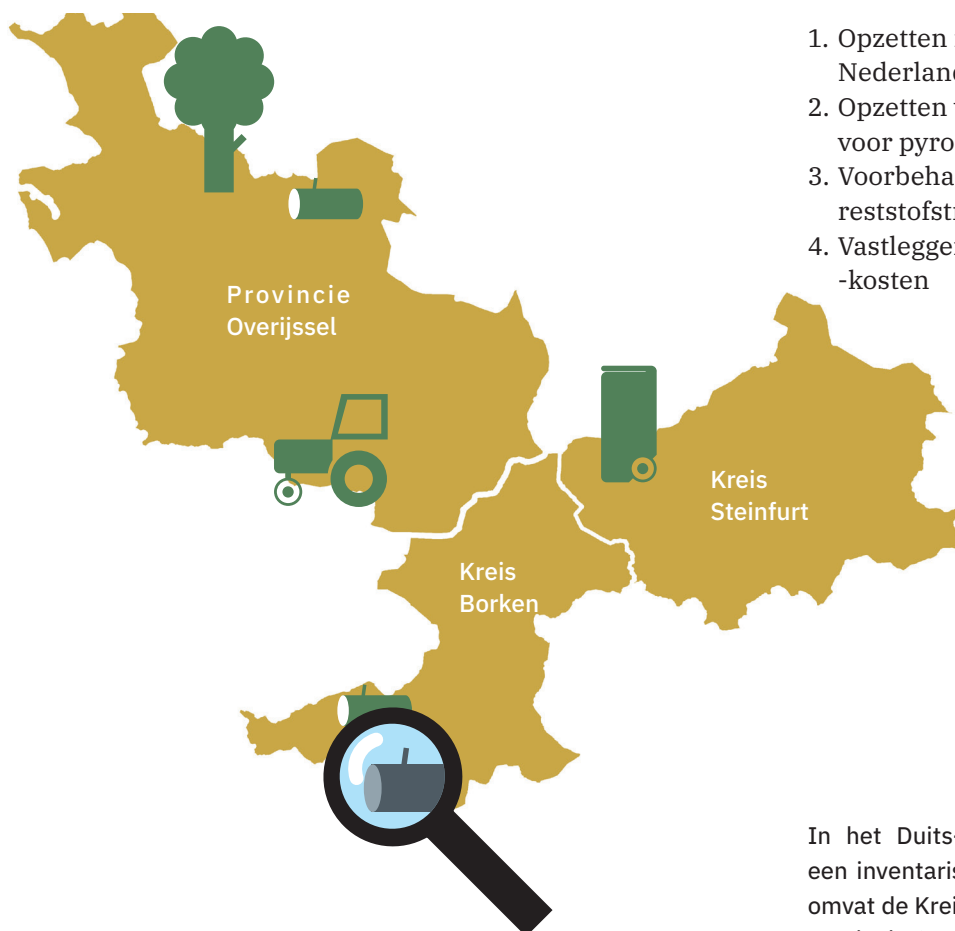
Hoofd van de werkgroep
Abwasser- und Umwelttechnik
FH Münster

WP 1: Biogene reststoffen voor de productie van pyrolyse-olie in de Duits-Nederlandse grensregio

Groenafval, straatveegsel en dierlijke mest zijn biologische reststoffen met een hoog energetisch potentieel, maar hoe kan dit potentieel worden benut? Welke reststoffen zijn in het Duits-Nederlandse grensgebied beschikbaar en in welke omvang? Hoe kunnen deze reststoffen energiebesparend worden voorbehandeld voor gebruik in pyrolyse? Deze vragen waren het onderwerp van het onderzoek van werkpakket 1 onder leiding van de FH Münster.

Onderzoeksdoelen en werkwijze:

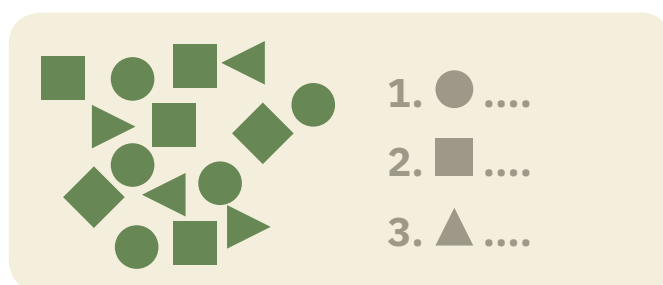
1. Opzetten reststofdatabase in het Duits-Nederlandse grensgebied
2. Opzetten voorbehandelingsconfiguraties voor pyrolyse experimenten
3. Voorbehandelen en leveren geschikte reststofstromen
4. Vastleggen voorbehandelingsenergie en -kosten



In het Duits-Nederlandse grensgebied heeft een inventarisatie plaatsgevonden. Het gebied omvat de Kreis Steinfurt, de Kreis Borken en de provincie Overijssel.

Inventarisatie

- Substraatregistratie in de Duits-Nederlandse grensregio
- Aanleggen van een database met kenmerkregisters
- 30 biogene reststoffen werden geregistreerd



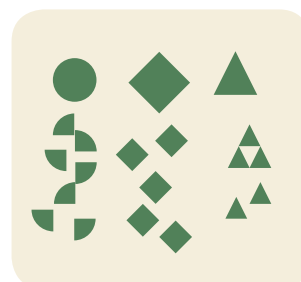
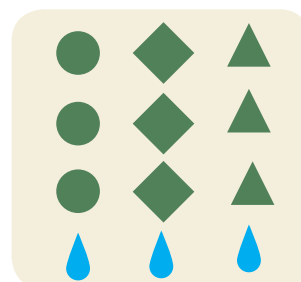
Voorbehandeling

- Voorbehandeling van 10 reststoffen
- Inachtneming van de relevante grenswaarden voor pyrolyse
- Bepalen van zinvolle voorbehandelingsconfiguraties
- Drogen
- Scheiden
- Vermalen

1. Voorbehandelingsconfiguratie:
→ Drogen

2. Voorbehandelingsconfiguratie:
→ Scheiden en drogen

3. Voorbehandelingsconfiguratie:
→ Drogen en vermalen



Beoordeling

- 30 profielen met karakteristieke gegevens aangemaakt
- Voorbehandelingskosten en -energieën vastgesteld
- 3.000.000 t/a reststoffen geregistreerd



Biogene reststofstromen zijn bijproducten, reststoffen of afvalstoffen die in verschillende economische- en productiesectoren naast de eigenlijke producten ontstaan, en gerecycled of verwijderd moeten worden. Daarbij zijn onderstaande economische sectoren te onderscheiden:

- reststoffen uit de bosbouw, hout- en papierindustrie,
- reststoffen uit de landbouw,
- reststoffen uit biotoop- en landschapsbeheer,
- reststoffen uit de industrie en afvalbeheer.

Tijdens de selectie is er op gelet om substraten met een laag mineraalgehalte te kiezen. In het kader van de substraatverzameling zijn 30 biogene reststoffen (inclusief procesdeelstromen) verzameld. Voor een economische ordening zijn de substraatkosten/-opbrengsten, de beschikbaarheid en de locatie doorslaggevend. Bovendien zijn de substraten energetisch en materieel gekarakteriseerd om hun geschiktheid voor het pyrolyseproces te bepalen. De te beoordelen parameters waren hierbij: droge reststof (DR), organische droge reststof (oDR), verbrandingswaarde (Hs) en korrelgrootteverdeling. Op basis van deze beslissingscriteria zijn de onderstaande acht substraten geselecteerd en voorbehandeld voor pyrolyse testen (zie tabel 1).

In samenwerking met projectpartner Lohmann GmbH, een afvalverwerkingsbedrijf, zijn de substraten groenafval, straatveegsel en zaagsel uit veetransporten geselecteerd als te onderzoeken substraten. Daarnaast zijn ook bioafval, digestaat uit bioafval en compost van de Entsorgungs GmbH Steinfurt (EGST) onderzocht. Ook zijn landbouwsubstraten zoals varkensmest (vaste fase) en digestaat van maïssilage onderzocht. De projectpartners Alba Städte- und Industriereinigung Baving GmbH en Hogeschool Saxion stelden ook substraten ter beschikking.



Figuur 1: Geïntervieweerde substraten groenafval, straatveegsel en zaagsel.

Omdat de substraten in de eerste plaats bedoeld waren voor het snelle pyrolyseproces, moesten de substraten aan specifieke grenswaarden voldoen: een droge reststof van DR>94 % en een korrelgrootte met een diameter <5 mm waren vereist. Wanneer deze grenswaarden niet werden bereikt, was een voorbehandeling (scheiding van vaste en vloeibare stoffen, drogen, versnipperen) nodig. Voor het versnipperen en vermalen zijn een zogenoemde 'prallreactor', een soort versnipperaar op praktijkschaal (500 kg/h) en een snijmolen op semi praktijkschaal (30 kg/h) gebruikt. Het drogen is uitgevoerd met behulp van droogstoven (op laboratorium-niveau) en een digestaatdroger (op industrieel niveau). Voor de scheiding van vaste en vloeibare stoffen werd een fijnfilterinstallatie op praktijkschaal (1 m³/h) gebruikt. Voor de voorbehandeling zijn drie verschillende configuraties gecombineerd:

1. drogen (indien de reststoffen reeds de vereiste korrelgrootte hadden),
2. scheiden en drogen (indien de reststoffen bijzonder vloeibaar waren),
3. drogen en vermalen (indien beide voorbehandelingsstappen nodig waren).

Het digestaat van maïssilage hoefde niet te worden voorbehandeld, omdat het substraat al in de biogasinstallatie was gedroogd en vermalen. De substraatkosten waren echter

ook hoger en bedroegen 35 €/t. De substraten zaagsel uit veetransporten en compost moesten alleen gedroogd worden, de korreldiameter was al binnen de gestelde grenzen. De substraten groenafval, digestaat van bioafval, straatveegsel en bioafval moesten zowel gedroogd als vermalen worden. De substraatspecifieke kosten en voorbehandelingsenergie waren vooral afhankelijk van de drooginspanning, omdat dit de meest energie-intensieve processtap was. Daarom werd bijvoorbeeld de varkensmest gescheiden en vervolgens gedroogd. De fijnfilterscheiding was bijzonder geschikt voor substraten met een hoog watergehalte. Door het water te scheiden, kon energie bespaard worden bij het drogen.

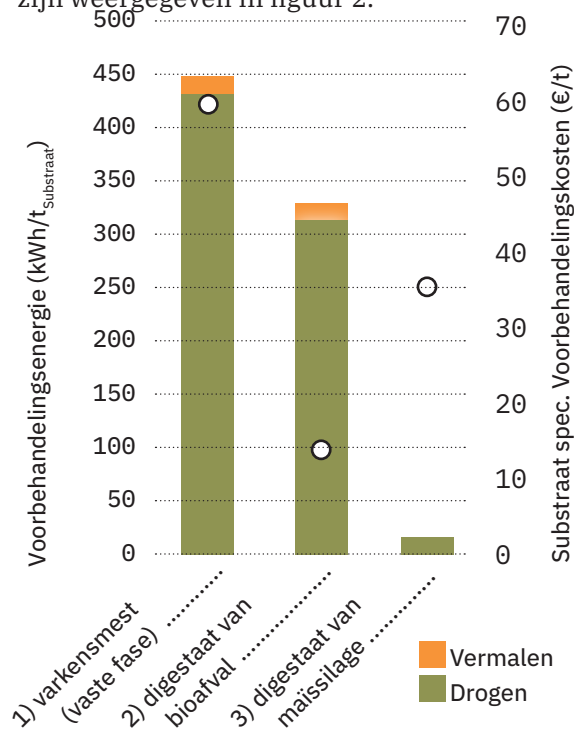
De genoemde substraten werden uiteindelijk gepyrolyseerd in een snelle pyrolyse installatie op laboratoriumschaal (0,3 kg/u). De resultaten van deze reeks testen toonden aan dat de substraten varkensmest (vaste fase), digestaat van maïs en digestaat van bioafval geschikt waren voor pyrolyse. Daarom werden er meer testen uitgevoerd met deze substraten in een pyrolyse installatie op semipraktijkschaal (3 kg/u).

Om deze testseries economisch te kunnen beoordelen, werden energie- en kostenramingen uitgevoerd voor de voorbehandeling van deze substraten en de bijbehorende

Nr.	Substraat	Beschikbaarheid	Kosten (+) opbrengst(-)	DR	oDR	Hs	Korrelgrootte
(-)	(-)	(t/a)	(€/t)	(%)	(%)	(MJ/kg)	(mm)
1	Digestaat maïssilage	10.000	35	97,5	79,5	15,5	1,3
2	Straatveegsel	8.400	25	46,6	35,5	11,3	>5
3	Groenafval	12.000	25	76,3	93,4	7,6	>5
4	Zaagsel veetransport	3.000	-10	26,6	96,6	14,9	1,4
5	Digestaat bioafval	34.000	-10	38,2	30,0	10,4	>5
6	Bioafval	40.000	-30	35,0	50,0	12,0	>5
7	Varkensmest (vaste fase)	4.000	25	20,0	82,3	14,9	0,5
8	Compost	18.000	0	65,3	33,2	6,4	0,9

Tabel 1: Parameteroverzicht van de substraten voor pyrolyse experimenten
(DR = droge reststoffen, oDR = organische droge reststoffen, Hs = calorische waarde)

voorbehandelingsconfiguraties. Om er voor te zorgen dat het testverloop van de pyrolyse probleemloos verliep, werden de genoemde substraten extra fijngemaakt. De resultaten zijn weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Substraatspecifieke voorbehandelings-energieën en -kosten van de 3 meest veelbelovende substraten: varkensmest (vaste fase), digestaat van bioafval en digestaat van maïssilage.

Wat betreft de voorbehandelingsenergie, bleek dat de energie om te drogen veruit het grootste deel van de energie uitmaakt. Na afscheiding had de vaste varkensmest een watergehalte van 80 %. De scheiding vergde een capaciteit van 1,2 kWh/t en was energie-intensief. Het drogen kostte uiteindelijk aanzienlijk meer energie (2.182 kWh/t). Het verfijnen van het substraat met behulp van de pralereactor verbruikte 11,0 kWh/t. Met kostenspecifieke resultaten van 10 €/t leidde dit tot voorbehandelingskosten (bedrijfskosten, zonder aanschafkosten) van 23,06 €/t.

Het digestaat van bioafval was niet geschikt

om te scheiden. De benodigde energie om te drogen bedroeg 821 kWh/t. Het versnipperen verbruikte op zijn beurt 11,5 kWh/t. Met een substraatspecifieke opbrengst van 10 €/t werden uiteindelijk voorbehandelingskosten van 2,73 €/t gerealiseerd.

De voorbehandeling van het reeds gedroogde digestaat van maïssilage werd met de verfijning tot 12,9 kWh/t beperkt. Met vergelijkbare hoge substraatkosten van 35 €/t, lagen de substraatspecifieke kosten uiteindelijk op 35,99 €/t.

Een wijdverbreid substraat dat voor pyrolyse wordt gebruikt is hout, dat hier ter vergelijking wordt gepresenteerd met een prijs van 135 €/t. Zo kunnen substraatkosten duidelijk worden bespaard door het gebruik van biogene reststromen. De mate waarin het gebruik van reststoffen van invloed is op de kwaliteit van de pyrolyseproducten is in het verdere verloop van het project vastgesteld.

Conclusie

Samengevat zijn in de beschreven werkzaamheden in totaal 30 biogene residuen vastgelegd en gekarakteriseerd. Elk substraat dat in deze reststofdatabase is vastgelegd, is beschreven in de vorm van een profiel, zie figuur 3. Het grote aantal voor pyrolyse geschikte reststoffen vertegenwoordigt het grote potentieel voor een grootschalige technische implementatie in het grensgebied. Er zijn afvalstromen met een totaal volume van 3 miljoen t/jaar geregistreerd. Uiteindelijk zijn acht substraten geselecteerd voor een reeks experimenten en met succes gepyrolyseerd. Later zijn er nog de substraten kokos en vlas bij gekomen. Verder zijn op grotere schaal experimenten uitgevoerd met drie van de voorbehandelde substraten en zijn de kosten van de drie voorbehandelingsconfiguraties bepaald. Daarbij is onder andere gebleken dat de energie om te drogen het grootste deel van deze kosten voor haar rekening neemt. Het doel van verder onderzoek is dan ook om deze kosten te verlagen. Een oplossing is de overvloedige warmte-energie van het pyrolyseproces te gebruiken om te drogen.



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

A-1-Einstreu Viehtransport

Allgemeine Informationen

Eigenschaften	Aussagen/Werte	Einheit
Firma	Lohmann GmbH	[-]
Verfügbarkeit	3.000	[t/a]
Abfallschlüsselnummer	03 01 04	[-]

Vorbehandlungsaufwand

Eigenschaften	Aussagen/Werte	Einheit
Vorbehandlungsschritte	Trocknen, Charakterisieren	[-]
Trockenrückstand	26,6	[Gew.-%]
benötigte Trocknungswärme	485	[kWh]
Ranking	 7	[1-10]

Substrateigenschaften

Eigenschaften	Aussagen/Werte	Einheit
Org. Trockenrückstand	96,5	[Gew.-%]
Preis	-10	[€/t]
Brennwert	14,9	[kJ]
Ranking	 6	[1-10]

Gesamtbewertung	 7	[1-10]
-----------------	--	--------

Substrat vor der Vorbehandlung



Substrat nach der Vorbehandlung



Substratbewertung

Vielversprechendes Substrat, da sehr hoher oTR-Gehalt mit hohem Ligninanteil. Kostengünstig und keine weitere Zerkleinerung nötig. Handhabung und Trocknung aufgrund von entstehenden Emissionen (Urin, weitere Verunreinigungen) jedoch anspruchsvoll.

Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter
Dr.-Ing. Elmar Brüggling
Tobias Weide, M.Sc.

wetter@fh-muenster.de
bruegging@fh-muenster.de
tobias.weide@fh-muenster.de

+49 2551 9 62 725
+49 2551 9 62 420
+49 2551 9 62 021

Figur 3: Profil uit de reststofdatabase. Substraat: zaagsel/strooisel van veetransport.

**Ir. Pd ENG Patrick Reumerman**

Hoofd van het onderzoeksteam
en van het werkpakket
BTG

**dr. Ir. Hans Heeres**

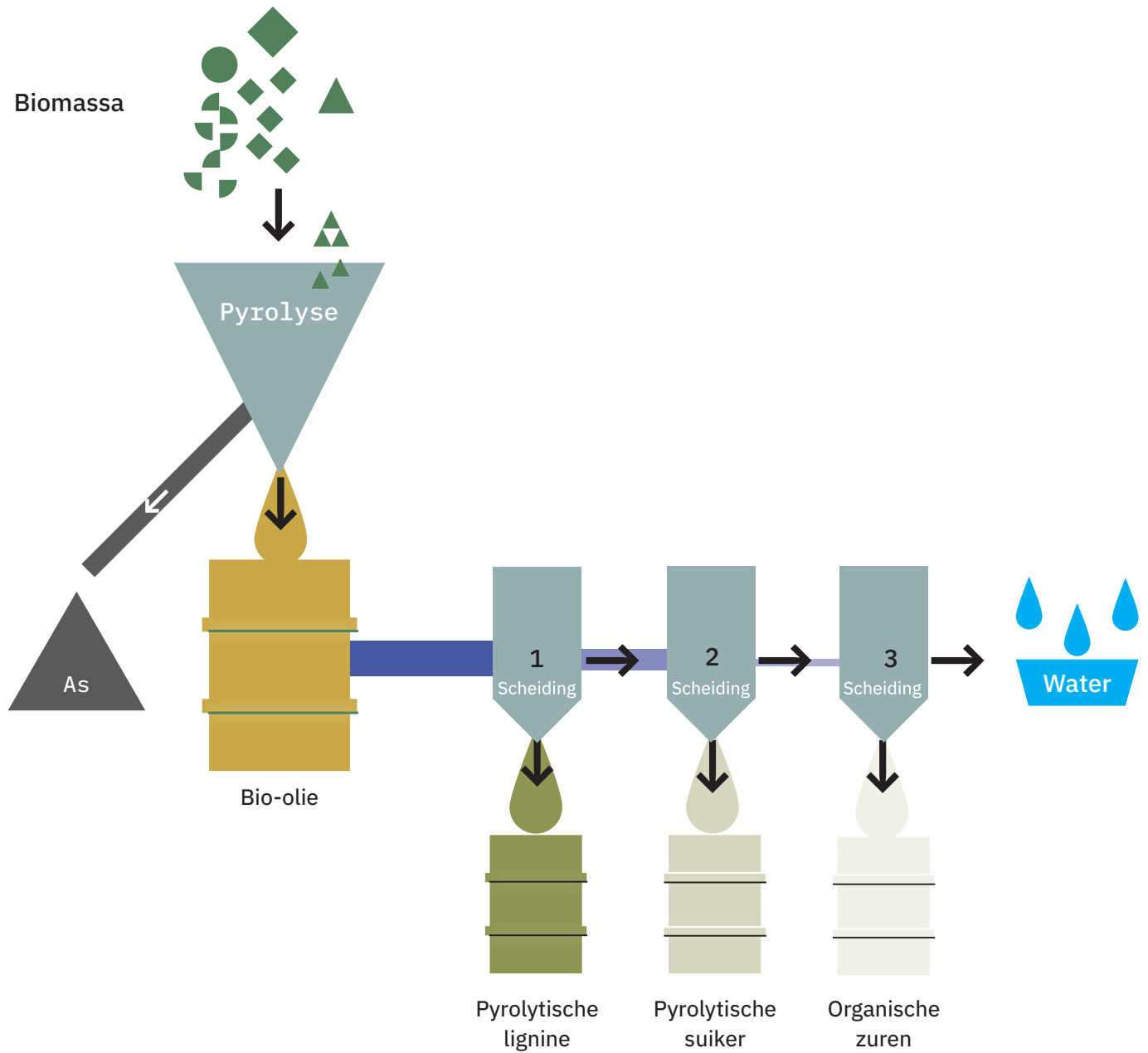
Projectleider
pyrolysetests
BTG

WP 2: Pyrolyse en fractionering

In werkpakket 2 is gekeken naar de pyrolyse en fractionering van 10 geselecteerde laagwaardige biomassastromen. Veelal zijn dit type stromen in grote hoeveelheden (honderdduizenden tonnen) beschikbaar in de regio en zijn de prijzen vaak laag of zelfs negatief (partijen willen ervan af). Het is daarom interessant om te onderzoeken of dit soort laagwaardige voedingen kunnen worden ingezet in het bovengenoemde proces om zo grondstoffen te produceren voor hoogwaardige toepassingen. Werkpakket 2 is uitgevoerd onder leiding van BTG.

Wanneer biomassa snel wordt verhit (450-600 °C), in de afwezigheid van zuurstof, dan wordt het gekraakt (gepyrolyseerd). Als de geproduceerde damp vervolgens wordt gecondenseerd ontstaat er pyrolyse-olie, ook wel bio-olie genoemd. Bij snelle pyrolyse is de verblijftijd van het biomassa deeltje in de reactor zeer kort, wat resulteert in een hoge opbrengst aan pyrolyse-olie. Tot wel 70% van de biomassa (schoon hout) kan hierdoor worden omgezet in pyrolyse-olie. Bijproducten die hierbij worden gevormd zijn niet condenseerbare gassen (15 %) en kool (15 %). Op commerciële schaal worden deze bijproducten verbrand om zo te voldoen aan de energiebehoefte van het proces (drogen biomassa, opwarmen reactor). De overmaat aan thermische energie kan worden gebruikt voor de productie van groene stroom en stoom. Pyrolyse-olie bestaat uit gekraakte componenten afkomstig van in de biomassa aanwezige cellulose, hemicellulose en lignine. Vanuit de cellulose en hemicellulose wor-

den voornamelijk suikers, organische zuren en water gevormd. Vanuit de lignine wordt de pyrolytische lignine gevormd. Een huidige toepassing voor het gebruik van pyrolyse-olie is als een boilerfuel ter vervanging van aardgas. Projectpartner BTG is echter voortdurend op zoek naar nieuwe innovatieve hoogwaardigere toepassingen. Pyrolyse-olie kan bijvoorbeeld door middel van fractionering worden opgesplitst in een ligninefractie (25-30 %), een suikerfractie (30-40 %) en een fractie die voornamelijk organische zuren (10-20 %) bevat. Deze afzonderlijke stromen kunnen vervolgens worden gebruikt als grondstof voor bijv. groene chemicaliën en producten. De combinatie van pyrolyse en fractionering is daardoor een goede techniek voor het ontsluiten van vooral lastige biomassa's, dit doordat de vaste voeding eerst in een mineraal vrije vloeistof wordt omgezet die vervolgens relatief makkelijk kan worden gescheiden in verwerkbare fracties.



Figuur 1: Biomassa pyrolyse gevolgd door bio-olie scheiding (fractionering)

De pyrolyse installaties

BTG heeft de beschikking over 3 verschillende snelle pyrolyse installaties; een schroef pyrolyse reactor (SP), een mini pyrolyse plant (MPP) en een pilot plant (PP). Het verschil tussen deze installaties zit voornamelijk in de biomassa verwerkingscapaciteit. De SP is een schroefreactor terwijl de MPP en de PP gebruik maken van heet circulerend zand als warmtedrager om de biomassa te pyrolyseren. De SP is de kleinste installatie en wordt vooral gebruikt voor initiële pyrolyse screening experimenten, het heeft een biomassa verwerkingscapaciteit van ongeveer 0,2-1,0 kg/h en het geproduceerde kool wordt bij deze installatie niet verbrand. De MPP wordt gebruikt wanneer grotere hoeveelheden biomassa moeten worden gepyrolyseerd, de MPP heeft een capaciteit van 1-5 kg/h en is representatief voor de PP. Voor de omzetting van nog grotere hoeveelheden biomassa (tonnen) kan de PP worden ingezet die een biomassa verwerkingscapaciteit heeft van 100-150 kg/h.

Daarnaast is bij BTG een bestaande fractioneringsunit voor de continue extractie van pyrolyse-olie geheel gemodificeerd (zie figuur 2). Er zijn o.a. metalen

dubbelwandige opslagvaten geplaatst die het mogelijk maken om de ingaande stromen voor te verwarmen via een warmtebad en dompelaar. In de oude setup was dit niet mogelijk en kon alleen de scheider/menger worden verwarmd, hierdoor konden bepaalde resultaten niet goed worden verklaard en was het vaak lastig om een stabiele toestand te verkrijgen. Met de huidige aanpassingen kan bijvoorbeeld alles op één en dezelfde temperatuur worden ingesteld, waardoor er sneller een stabiele toestand kan worden behaald en de fractionering beter kan worden gecontroleerd en geoptimaliseerd. Ook is het frame vernieuwd en is er een tappunt geplaatst, waardoor pyrolyse-olie snel vanuit een vat of IBC m.b.v. een geplaatste pomp in het voorraadvat kan worden gepompt. Hierdoor hoeft het niet meer handmatig te worden aangevuld (overgieten). Verder is de schakelkast aangepast, zijn kabels vervangen t.b.v. besturing en voor de data acquisitie zijn er verscheidene thermokoppels, tracings en drukmeters geplaatst en is er isolatie aangebracht, etc. Op die manier is met de standaard olie een reeks succesvolle langdurige testen (elk 4-6 h) uitgevoerd en zijn grote hoeveelheden aan fracties geproduceerd.



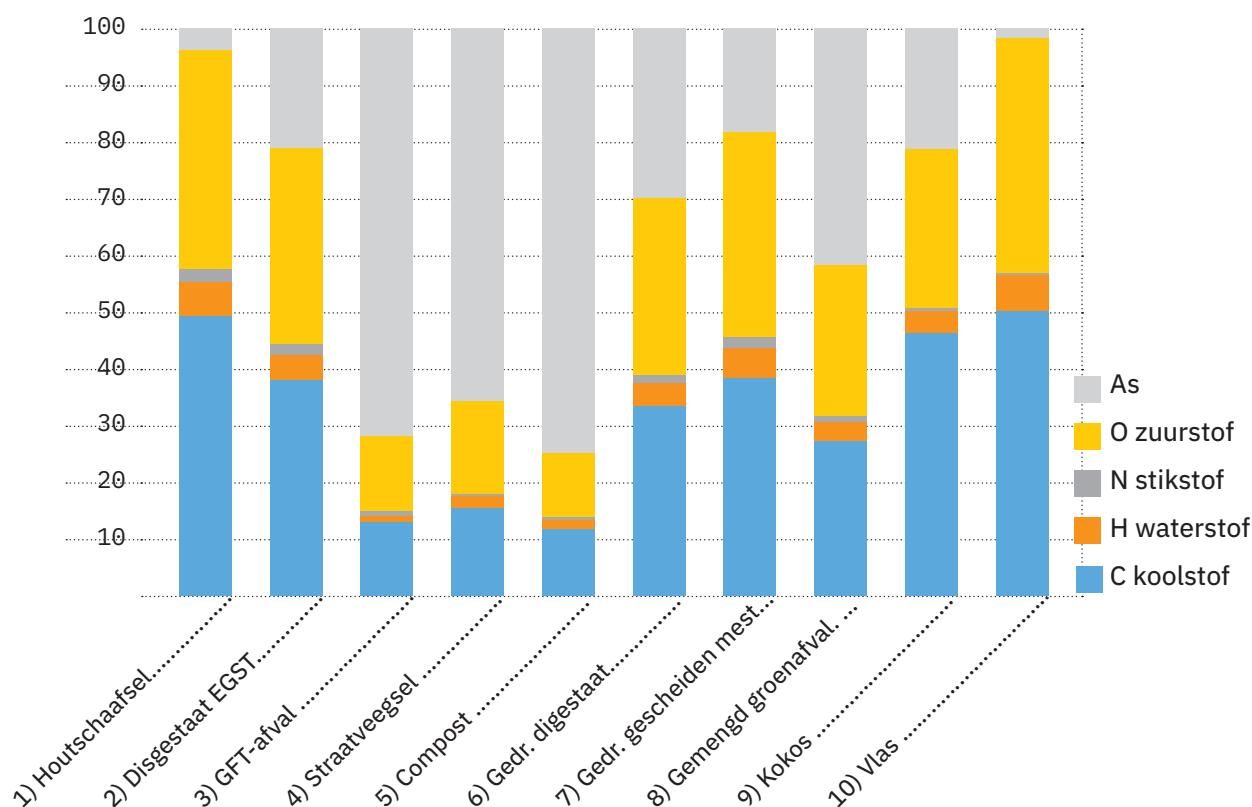
Figuur 2 en 3: Foto's van de gemodificeerde fractioneringsunit

Vanuit het projectconsortium zijn tien verschillende laagwaardige biomassastromen geselecteerd om te testen in pyrolyse. Dit zijn de acht geselecteerde stromen uit werkpakket 1 en twee verdere reststromen: kokos en vlas. Allereerst zijn van de verschillende stromen standaard analyses uitgevoerd die nodig zijn voor het opstellen van energie- en massabalansen. Deze standaard analyses omvatten: een element-analyse (CHN), een vochtanalyse en een as-gehalte bepaling. De samenstelling van de tien stromen op droge basis wordt weergegeven in figuur 4. Zuurstof (O) is bepaald door het verschil in CHN-analyse ($100 - \%C - \%H - \%N$). Vanuit deze data is een voorspelling gedaan welke voedingen een redelijke olie opbrengst zouden kun-

nen geven in de pyrolyse. As in biomassa is hoofdzakelijk anorganisch en zal daardoor niet bijdragen aan de olie productie. Ook kan de as een negatief katalytisch effect hebben tijdens de pyrolyse, waardoor juist meer gas of kool wordt geproduceerd in plaats van de gewenste olie. Een voorbeeld hiervan zijn de hoog gemeten as-waarden in biomassa 3-5 (in figuur 4). Deze waarden liggen ver boven de 60% (schoon hout ~ 0,4-1,0%). Met deze stromen is geen hoge opbrengst aan bio-olie te verkrijgen.

Kijkend naar de resultaten zou de hoogste opbrengst aan bio-olie worden verwacht met het houtschaafsel en het vlas. De 10 biomassastromen zijn initieel gedroogd en vervolgens gepyrolyseerd in de schroefpyrolyse re-

Biomassa-eigenschappen

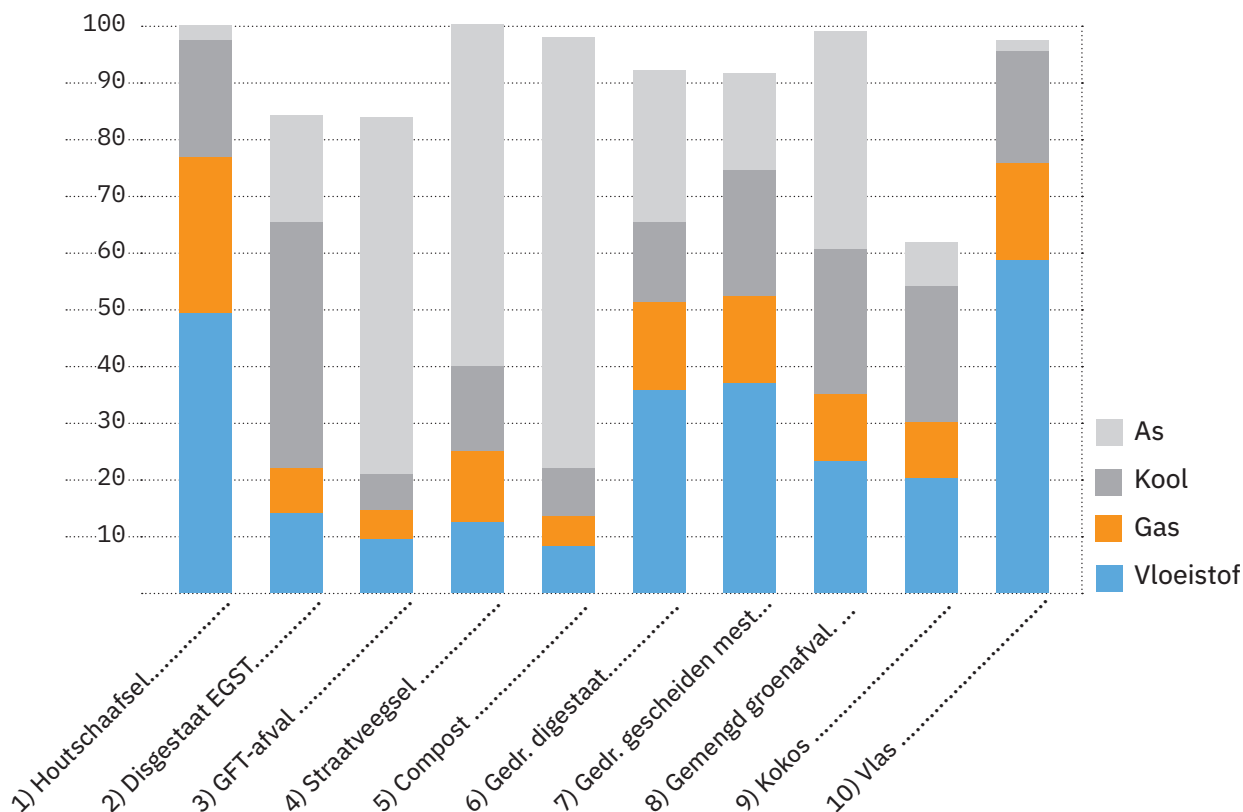


Figuur 4: Samenstelling van de geselecteerde laagwaardige biomassastromen

actor bij 500° C, 0.32 kg/h en met een totale run duur van ongeveer 2 uur. Figuur 5 laat de productverdeling zien van de pyrolyse per voeding. Het belangrijkste hier is dat er een zo hoog mogelijke opbrengst aan vloeistof (pyrolyse-olie) wordt verkregen. De kool en het gas worden immers verbrand in het pyrolyseproces (op commerciële schaal) en kunnen daardoor niet worden teruggewonnen als een productstroom (figuur 5).

De hoogste opbrengsten aan vloeistof zijn verkregen met het vlas en het houtschaafsel. Zoals eerder genoemd, zijn deze twee voedingen redelijk schoon en bevatten weinig as. Ook zijn deze voedingen niet eerst gebruikt in een vergister of als veevoer. Twee andere voedingen die een redelijke opbrengst aan bio-olie gaven zijn de gedroogde digestaat en de gedroogde en gescheiden mest.

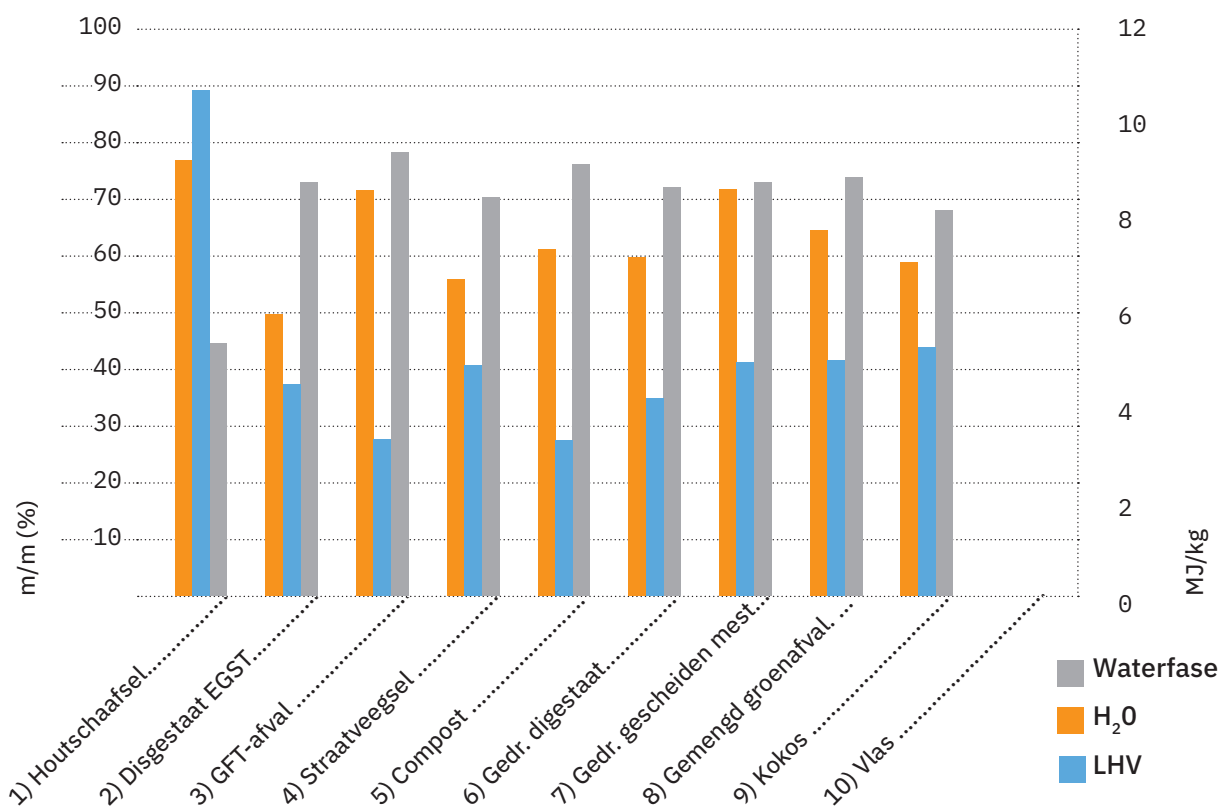
Met biomassa 3-5 uit figuur 5 (GFT-afval, straatveegsel, compost) werden de laagste hoeveelheden aan bio-olie (vloeistof productie) geproduceerd, alhoewel de totale hoeveelheid aan pyrolyse producten (kool + gas + vloeistof) geproduceerd uit biomassa 4 (straatveegsel) iets hoger lag dan verwacht. Deze hogere waarde is te verklaren door de zeer sterke inhomogeniteit van deze voeding, met andere woorden, iedere keer als er een monster wordt genomen van deze voeding is de samenstelling anders. Over het algemeen zijn alle geproduceerde bio-oliën fase gescheiden verkregen. Dit betekent dat een (apolair) organisch deel wordt geproduceerd (oliefase) en een waterfase (bevat nog wel polaire organische componenten). Alleen bij het gebruik van vlas als voeding werd een 'homogene' olie geproduceerd.



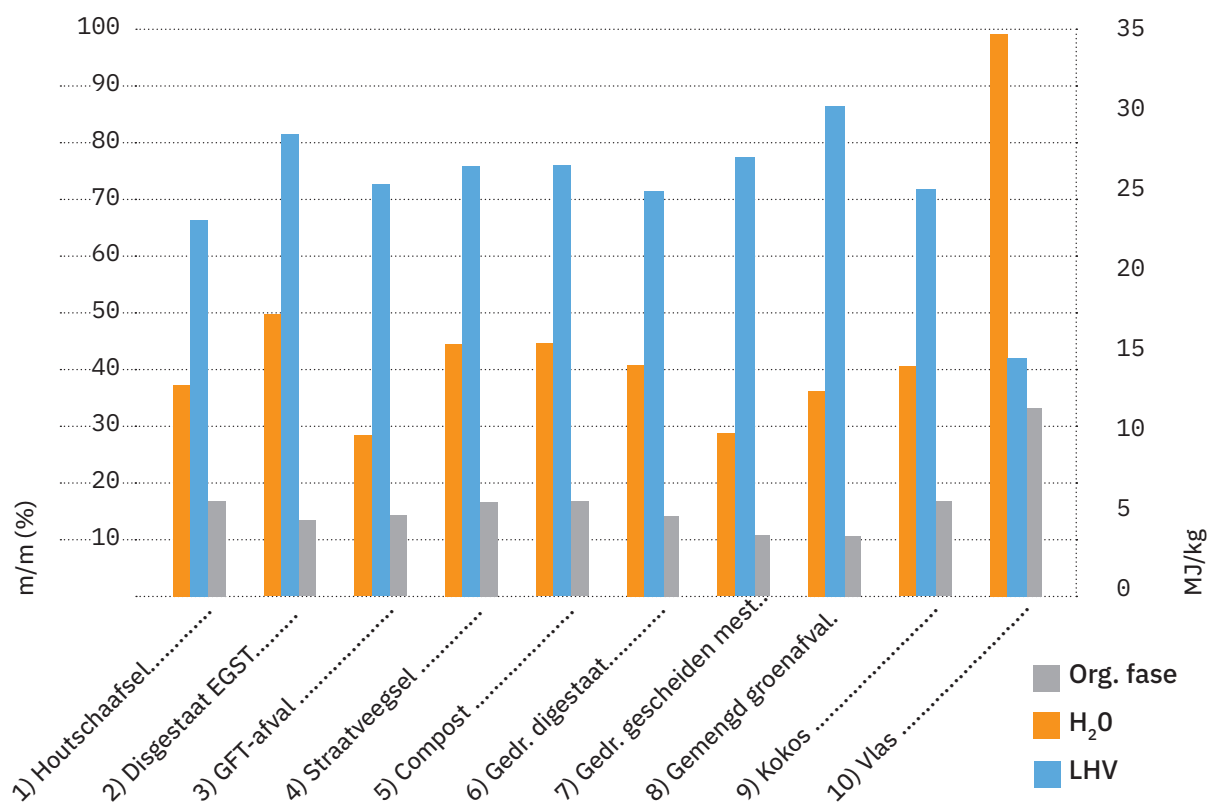
Figuur 5: Opbrengst producten in schroefpyrolyse screening

In figuur 6 en 7 worden de eigenschappen van de twee verschillende fasen weergegeven. In deze figuren wordt onder meer aangegeven hoe groot de fractie aan organische of waterfase is in de geproduceerde pyrolyse

vloeistof. Samen zijn de organische fase en waterfase dus 100%. Verder kan uit de figuren het watergehalte in de fracties en de Lower Heating Value (LHV) per fractie worden afgelezen.



Figuur 6: Opbrengst en eigenschappen waterfase



Figuur 7: Opbrengst en eigenschappen organische fase

Uiteindelijk is besloten om de volgende drie biomassa's verder te gaan testen in de MPP unit:

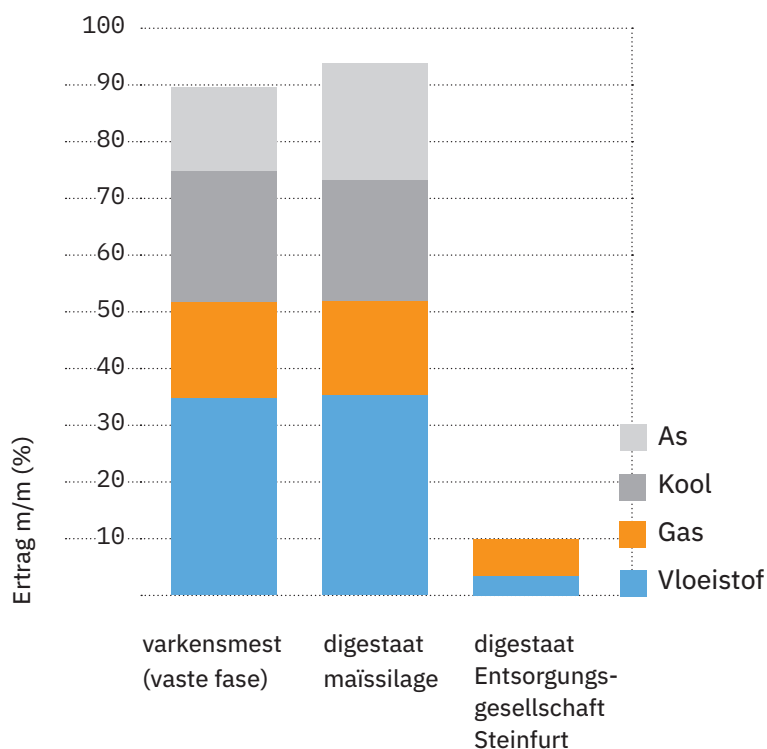
1. Digestaat EGST (afkomstig van de Entsorgungsgesellschaft Steinfurt in Saerbeck),
2. Gedroogde digestaat uit maïssilage,
3. Gedroogde en gescheiden mest.

Deze selectie is tot stand gekomen door te kijken naar o.a. (1) de beschikbaarheid van de voeding in de regio, (2) de noodzakelijke voorbewerking, (3) de bulkprijs, (4) het gemak van verwerking (in pyrolyse) en (5) de opbrengst aan pyrolyse vloeistof. De twee best presterende biomassastromen, het houtschaafsel en vlas zijn niet geselecteerd voor de vervolgtesten in de MPP omdat de beschikbaarheid van deze stromen in de regio te laag bleek voor pyrolyse op commerciële schaal en omdat de pyrolyse van hout en houtachtige stoffen reeds getest is.

In figuur 8 zijn de pyrolyse product opbrengsten (MPP) weergegeven per voeding. Elk experiment is hier in tweevoud uitgevoerd. De waarden die worden weergegeven

zijn dus de gemiddelde opbrengsten van de duplo experimenten. Het verwerken van het EGST-digestaat in de MPP bleek zeer lastig. Dit werd met name veroorzaakt door het hoge gehalte aan anorganisch materiaal en de inhomogeniteit van het materiaal. Tijdens het verwerken van deze voeding zijn asgehaltenes gemeten van 50-80 m/m %, dit hoge gehalte zorgde voor een snelle ophoping/verstopping van anorganisch materiaal in de MPP reactor.

De andere twee voedingen waren makkelijker te verwerken, al gaf de mest (gedroogde gescheiden mest) wat stofdoorslag tijdens het experiment waardoor het systeem vastliep. Met de mest werd een vloeistofopbrengst van 35 m/m %, een gasopbrengst van 17 m/m %, een koolopbrengst van 23 m/m % en een asopbrengst van 15 m/m % verkregen met een uiteindelijke balans van 90 %. Met het digestaat uit maïssilage werd een vloeistofopbrengst van 35 m/m %, een gasopbrengst van 17 m/m %, een koolopbrengst van 21 m/m % en een asopbrengst van 21 m/m % verkregen met een uiteindelijke balans van 94 % (zie figuur 8). Met beide genoemde voedingen is evenveel pyrolyse vloeistof geproduceerd,

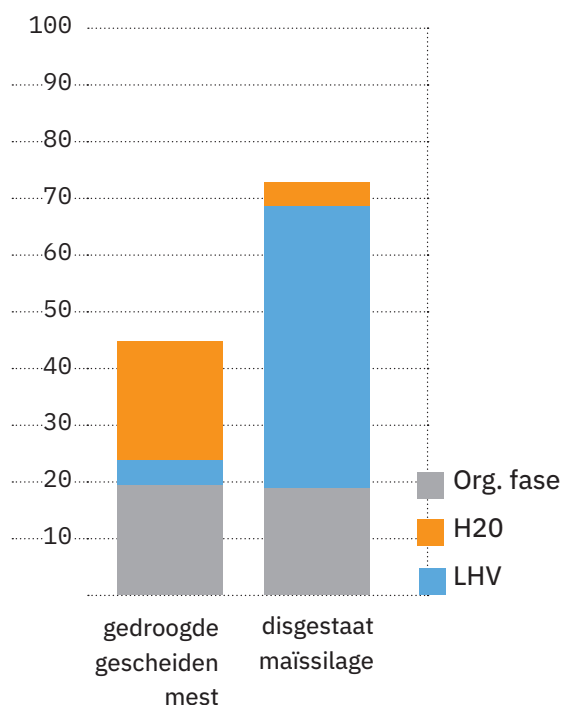


Figuur 8: Opbrengst pyrolyse producten per voeding in de MPP

deze vloeistoffen zijn evenwel fase gescheiden verkregen. Van belang hierbij is dus hoeveel er daadwerkelijk aan organische fase is geproduceerd. Van de pyrolyse vloeistof verkregen met de mest is dit 45 m/m % en met het digestaat uit maïssilage is dit 73 m/m %, zoals wordt weergegeven in figuur 9.

Conclusie

Concluderend kan worden gezegd dat van de drie voedingen het digestaat (uit maïssilage) het makkelijkst te verwerken was in de MPP en dat met deze voeding de hoogste opbrengst aan olie (organische fase) is verkregen alhoewel hier bij moet worden vermeld dat ook deze voeding een hoog gehalte aan as bevatte. Doordat met digestaat de beste resultaten zijn verkregen in de MPP, is ervoor gekozen om ook deze voeding te testen in de PP. Voor de PP test zijn er door de FH Münster zes big-bags (~ 1000 kg) met gedroogd digestaat (digestaat maïssilage) aan BTG geleverd. Het aangeleverde digestaat had een vochtgehalte van 5.5 m/m % en een as-gehalte van 20.4 m/m %. Ondanks het hoge as-gehalte van de voeding was het toch mogelijk om ~770 kg van dit materiaal te verwerken. Tijdens deze test is de geproduceerde olie continue door een aangekoppelde filmverdampster geleid om zo zoveel mogelijk water te verwijderen en zo een homogene Fast Pyrolysis Bio Oil (FPBO) te produceren. Ondanks het meedraaien van de filmverdampster is er uiteindelijk toch een twee fase FPBO geproduceerd, in totaal



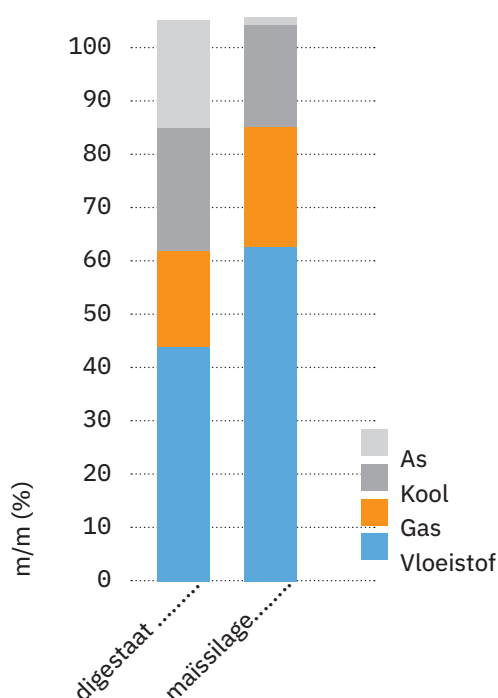
Figuur 9: Opbrengst en eigenschappen organische fase

~440 kg (incl. water). De test is uiteindelijk gestopt door stofdoorslag in de condensor en door fasescheiding van de FPBO in de condensor. Er is gekeken of de geproduceerde FPBO uit het digestaat nogmaals door de filmverdampfer zou kunnen worden geleid om zo alsnog een homogene FPBO te verkrijgen. Maar omdat de fasescheiding zo extreem was en het organische deel te vloeibaar, bleek dit niet haalbaar. Ter vergelijking is er naast het verwerken van het digestaat nog een extra test uitgevoerd in de PP met een niet vergiste maïssilage. Maïssilage wordt nu op grote schaal vergist om methaan te produceren. Hierbij wordt eigenlijk alleen het zetmeel (suikers) omgezet door de micro-organismen. In pyrolyse worden alle componenten omgezet tot een olie, hierdoor wordt er dus geen laagwaardig biomassa residu gevormd (digestaat) met een hoog mineraal gehalte. De opbrengsten aan pyrolyse producten van deze twee voedingen zijn weergegeven in figuur 10. Met de maïssilage is een opbrengst van ~67 m/m % aan olie verkregen terwijl dit voor het digestaat ongeveer 44 m/m % aan

fase gescheiden olie was. Ook het grote verschil in as productie valt hier duidelijk op.

Er is een selectie gemaakt kijkende naar o.a. beschikbaarheid, prijs, pyrolyse opbrengsten etc. Er zijn drie stromen geselecteerd, van deze drie, gaf het vergiste maïs de beste resultaten in de pyrolyse. De verwerking was het makkelijkst, en de olieproductie het hoogst. Deze olie kan gebruikt worden voor energietoepassingen. De geproduceerde olie is echter wel fase-gescheiden waardoor verdere fractionering technisch niet mogelijk is. Met maïssilage - een alternatieve biomassa-stroom welke later geselecteerd was – blijkt het wel mogelijk om te fractioneren. De verschillende fracties kunnen voor hoogwaardigere toepassingen gebruikt worden, zoals bijvoorbeeld houtmodificatie. Dit heeft in het verdere verloop van het project tot waardevolle resultaten geleid (zie WP 3).

Daarmee is een belangrijke milestone van het project – inzicht verkrijgen in de toepasbaarheid van biomassa reststromen als alternatief voor schoon hout – succesvol bereikt.



figuur 10: Opbrengst pyrolyse producten per voeding in de PP

**dr. ir. Simon Hageman**Hoofd onderzoeksteam
Saxion**ing. Albert Rosendahl**Onderzoeksteam
Saxion

WP 3: Opwaardering van de pyrolyse-olie

De pyrolyse-olie en de fracties (pyrolytische suikerfracties en zure waterfractie) hebben specifieke eigenschappen en daarmee ook verschillende economische waarden en toepassingsgebieden. Dit is de reden waarom als eerste de verschillende eigenschappen, zoals de verbrandingswarmte van de pyrolyse-olie en de fracties, zijn bepaald. Vervolgens zijn de opwaardering van de verschillende fracties met behulp van fysisch-chemische, biologische en chemo-katalytische methoden onderzocht. Werkpakket 3 is uitgevoerd onder leiding van Saxion in samenwerking met BTG

Directe toepassing van de pyrolyse-olie: Verbranding

De energiewaarden van de verschillende oliesoorten en fracties zijn geanalyseerd met een bomcalorimeter. De bomcalorimeter meet de verbrandingswaarde van de olie door een kleine ontstekingsreactie te veroorzaken en de daarbij vrijgekomen energie op te vangen in een thermisch en druk geïsoleerd vat (figuur 1). De gemeten temperatuurstijging wordt vervolgens omgerekend naar de verbrandingswaarden (figuur 3). Uit figuur 3 is af te leiden dat de oliën op energiewaarde een verschillende bijdrage hebben en daardoor

ook een andere economische waarde op het gebied van verbranding vertonen. De zure waterige fracties die zijn gebruikt in deze meting bevatten zelfs zoveel water dat deze niet verbrandden, waardoor het onmogelijk was om hun energiewaarde te bepalen.

Opwaardering

Na een initiële screening is besloten om de volgende opwaarderingstechnieken voor de oliefracties te gebruiken:

1. Opwaardering door waterverwijdering waardoor een zuiverder olie ontstaat,
2. Biologische opwaardering van de waterige fracties, o.a. de productie van brandstoffen door vergisting,
3. Fracties pyrolyse-olie voor houtmodificatie (dit onderdeel staat apart vermeld in het volgende hoofdstuk).



Figuur 1: De bomcalorimeter bij Saxion gebruikt binnen het Groen Goud-project. In de geïsoleerde gele kast staat het reactorvat. Zuurstof toevoer met drukregelaar is nodig voor het inbrengen van de juiste hoeveelheid zuurstof.

Ad 1) Fysische opwaardering: opwaardering door wateronttrekking

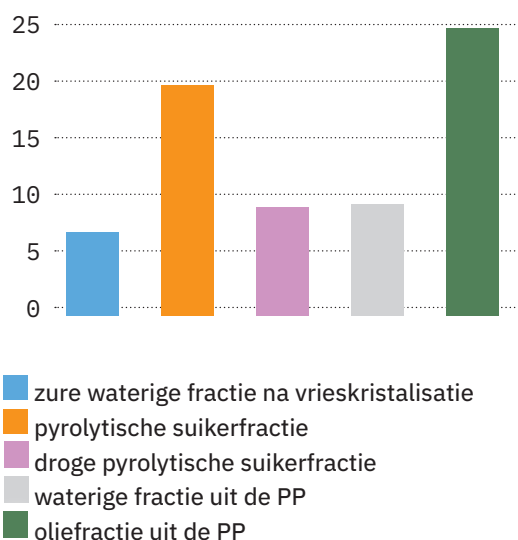
Om de zure waterfractie toch te kunnen verbranden en te analyseren met de bomcalorimeter moet het water onttrokken worden. Er is onderzocht of invriezen van de oliefractie ijskristallen oplevert, waardoor gezuiverde olie achterblijft. Het vaste ijs heeft een lagere dichtheid dan de olie en gaat daardoor drijven (zie figuur 2). De olie blijft in vloeibare fase en op deze manier kan de olie geconcentreerd worden door de ijskristallen te filteren. Hierdoor ontstaat olie en ijs (water). Voorafgaand aan dit experiment was de verbrandingswaarde van de zure waterfractie niet te analyseren, doordat er te veel water in de fractie zat. Na het invriezen van dit monster was de olie voldoende geconcentreerd om toch de verbrandingsenergie te bepalen (figuur 3). Vrieskristallisatie is wellicht een goede manier om pyrolyse-oliën of fracties met een hoog watergehalte te concentreren zodat het kan worden toegepast als grondstof of brandstof. Het verwijderde ijs bestaat grotendeels uit water en is dus vrij zuiver (figuur 4).

De verwijdering van stikstofhoudende stoffen uit de olie met behulp van actieve kool en filtratie bleek niet mogelijk. Dit komt doordat



Figuur 2: Ingevroren waterige pyrolyse-olie met ijskristallen

bij de verwijdering van stikstof ook een deel verbrandingswarmte wordt weggehaald. De reden hiervoor is, dat de stikstofhoudende componenten in de olie ook verbrandingsenergie bevatten. Hierdoor is het lastig om stikstof te verwijderen zonder de energiewaarde te veranderen.



Figuur 3: Gemeten verbrandingswarmte van pyrolyse-olie en fracties. De laatste fracties zijn geproduceerd in de pilot plant en betreffen het pyrolyse product van digestaat van maïssilage (zie WP 2).



Figuur 4: Verschillende fracties olie met in het midden de onbevroren zure waterige fractie.



Figuur 5: Pyrolyse vergistingsreactor gebruikt binnen het onderzoek. De reactor is temperatuur- en pH-gecontroleerd

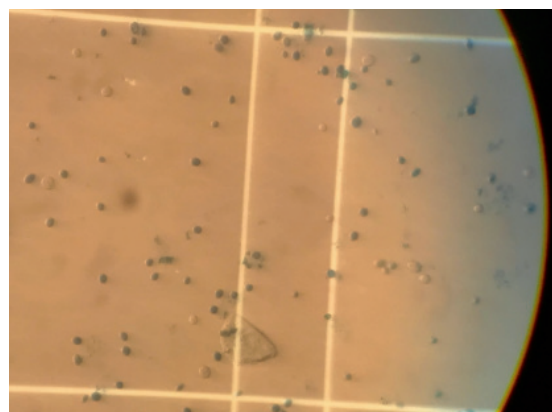
Ad 2) Biologische opwaardering van de waterige fracties

De zure waterfractie bestaat voornamelijk uit een mengsel van allerlei zuren (zie ook tabel 1) en is erg waterig. De pyrolytische suikerfractie is ook waterig. Micro-organismen zijn in staat om allerlei stoffen zoals zuren af te breken en hebben daarvoor een waterig milieu nodig. Daarom is gekeken naar de microbiologische omzettingen van de waterige fracties om (1) een fermentatieproduct te krijgen, om (2) de olie af te breken en om (3) zo ook zuiver water te produceren.

Bij anaerobe vergisting worden allerlei substraten omgezet naar biogas (tabel 1). In het onderzoek bleek het mogelijk om verschillende fracties te vergisten naar methaan (biogas). Zodoende kan uit de waterige fracties een brandstof geproduceerd worden. Voorafgaand aan het vergistingsproces dient de pH geneutraliseerd te worden. Het biogasproductieproces kan alleen plaatsvinden bij een pH tussen de 6 en 8, zonder neutralisatiestap van de olie zal de pH rond de 3 zijn en daardoor veel te laag voor biogasproductie. Het is mogelijk om over een periode van enkele maanden biogas te produceren. Hieruit blijkt dat de micro-organismen, verantwoordelijk voor de biogasproductie, ook bestand zijn tegen mogelijk aanwezige stoffen die voor micro-organismen giftig kunnen zijn. De reactor is temperatuur- en pH-gecontroleerd. De uitgaande biogasstroom is gekoeld

met een condensator en de gasvolume stroom is gemeten. Waterige monsters uit de reactor zijn geanalyseerd op o.a. azijnzuur concentratie.

Behalve methaanproductie is het ook mogelijk om ethanol met gist te produceren in aanwezigheid van de pyrolyse-olie (figuur 6). Echter, de concentratie ethanol was erg laag <1%. Ook is het mogelijk om azijnzuur te produceren uit de waterige fracties. Azijnzuur wordt o.a. gebruikt voor de productie van lijn, vezels en plastics. De productie van azijnzuur is daarom veelbelovend.



Figuur 6: Gistcellen (bolletjes) gekleurd met methyleen blauw voor toxiciteitstest. Bestanddelen in de olie kunnen giftig zijn voor micro-organismen. De ongekleurde cellen geven levende gistcellen aan, de gekleurde cellen leven niet meer.

Stof	Concentratie (mg/L)	Reactievergelijking	Maximale methaan-productie (mg/L olie)
Acetaat	33000	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	8800
Propionaat	1500	$8 \text{ C}_3\text{H}_5\text{O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 13 \text{ CH}_4 + 11 \text{ CO}_2$	534
n-Butanate	110	$8 \text{ C}_4\text{H}_9\text{O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 21 \text{ CH}_4 + 11 \text{ CO}_2$	52
iso-Butanate	450	$4 \text{ C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 13 \text{ CH}_4 + 3 \text{ CO}_2$	405
Valeriaanzuur	240	$4 \text{ C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 13 \text{ CH}_4 + 7 \text{ CO}_2$	120
iso-valeriaanzuur	<100	$4 \text{ C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 13 \text{ CH}_4 + 7 \text{ CO}_2$	<50
caprylzuur	<100	$2 \text{ C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 11 \text{ CH}_4 + 5 \text{ CO}_2$	<60
iso-crapylzuur	340	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{ CH}_4 + 2 \text{ CO}_2$	188

Tabel 1: Zuren in de waterige pyrolyse-olie samen met reactievergelijking naar methaan.

De pyrolytische suikerfractie bevat ook levoglucosaan. Deze stof is inert voor vele micro-organismen en wordt daardoor niet omgezet. Thermische, zure of chemische verbewerking van de pyrolytische suikerfractie kan uiteindelijk de levoglucosaan omzetten in glucose. Glucose is voor de meeste micro-organismen een soort snoep, waardoor er meer mogelijkheden zijn om fermentatieproducten te produceren uit de pyrolytische suikerfractie. De omzetting van levoglucosaan naar glucose kan resulteren in: (1) het verhogen van de acetaat en ethanol productie en concentratie (2) andere fermentatie producten, bijvoorbeeld melkzuur als bouwsteen voor bioplastics en butanol als brandstof en tevens als basis voor de verf en rubberindustrie.

Sulfaat of andere opgeloste stoffen worden op een rioolwaterzuiveringsinstallatie

uit afvalwater verwijderd omdat deze stoffen anders schadelijk zijn. Hiervoor wordt bij de rioolwaterzuiveringsinstallatie gebruik gemaakt van micro-organismen. Voor dit zuiveringsproces hebben micro-organismen een elektronenbron nodig, wat een waterige fractie kan zijn. Het onderzoek heeft aangetoond dat het mogelijk is om bijvoorbeeld opgelost selenaat te reduceren tot vast selenium. Vast selenium slaat neer en op deze manier kan de stof uit het water worden gehaald (figuur 7). Ook was het mogelijk om sulfaat om te zetten naar sulfide. Deze proef bewijst de mogelijkheid dat de zure waterfractie of de pyrolytische suikerfractie gebruikt kan worden als elektronendonor in waterzuiveringsprocessen. Andere bekende elektronendonoren in de waterzuivering zijn glycerol en ethanol, maar deze zijn prijzig. De waterige fracties kunnen goede alternatieven zijn.



Figuur 7: Microbiologische reductieprocessen met behulp van olie als elektronendonor. In de bovenstaande serie zijn verschillende testen uitgevoerd met zwavel en selenium reductie. Gelige kleuring wordt veroorzaakt door toevoegen van olie. Rode neerslag duidt op de reductie van selenium, de vaste stof slaat neer op de bodem (3e en 4e flesje van rechts laten een duidelijke rode kleur zien op de bodem van de flesjes).

Conclusie

Tijdens dit onderzoek is vooral gekeken naar de opwaardering van de zure waterfractie en in mindere mate naar de opwaardering van de pyrolytische suikerfracties. De inzet van vrieskristallisatie, waarbij water bevroert en als ijs kan worden verwijderd uit de vloeistof, blijkt succesvol voor beide fracties. De met vrieskristallisatie geconcentreerde zure waterfractie kan alsnog ontbranden in een bomcalori meter, onbehandelde zure waterfractie ontbrandt niet. De innovatieve vrieskristallisatietechniek is dus kansrijk om de zure waterige fractie en de pyrolytische suikerfractie efficiënt om te zetten naar een bruikbare brandstof en gezuiverd water (ijs).

Door de waterige eigenschappen van deze pyrolyse-fracties is ook naar microbiologische opwerkingstechnieken gekeken, omdat juist veel micro-organismen in een waterig milieu kunnen groeien. Uit een duurproef, waarbij de zure waterige fractie vergist wordt tot biogas, is positief bewezen dat de bacteriën in staat zijn om na een half jaar nog steeds biogas te produceren. De bacteriën kunnen aantoonbaar in een verdunde zure waterige fractie overleven ondanks de aanwezigheid van stoffen die mogelijk voor micro-orga-

nismen giftig zijn. Hierdoor is het mogelijk om in de toekomst een nieuwe vergister te ontwerpen, waarbij de zure waterige stroom continu wordt omgezet in duurzaam biogas en relatief schoon effluent.

Behalve methaanproductie blijkt het ook gunstig om de pyrolytische suikers en de zure waterfractie te gebruiken als waardevolle elektronendonoren voor allerlei microbiologische processen in bijvoorbeeld de waterzuivering: o.a. is aangetoond dat sulfaat kan worden omgezet naar sulfide en selenaat naar selenium. Door de huidige gebruikte elektronendonoren te vervangen door deze waterige fracties is geldbesparing mogelijk. Ook is aangetoond dat reinculturen zoals gisten kunnen overleven in deze pyrolyse fracties. Dit vergroot de mogelijkheid om de beide fracties te gebruiken als praktische voedingstof voor de productie van nuttige, gefermenteerde biobased producten: acetate, butanol en chemische bouwstenen voor de productie van allerlei duurzame materialen. De uitkomsten van dit werkpakket bewijzen dat de combinatie van pyrolyse fracties met microbiologische opwerking een kansrijke en krachtige impact heeft op een energie-neutrale, circulaire en biobased economie in de Euregio.

**Adam Turi**Onderzoeksleider
Foreco**dr. Ir. Hans Heeres**Onderzoeker
BTG

Fracties pyrolyse-olie voor houtmodificatie

Met de pyrolytische lignine uit de standaard pyrolyse-olie zijn bij BTG experimenten uitgevoerd om te kijken of deze fractie wellicht geschikt zou kunnen zijn als grondstof voor bepaalde resins/composieten en verven. Met de pyrolytische suikers uit de standaard pyrolyse-olie zijn door BTG en Foreco formuleringen gemaakt en getest om hout te verduurzamen.

In de productie van resins/composieten uit pyrolytische lignine zijn verschillende groene crosslinkers (geen formaldehyde) en katalysatoren getest. Ook is gekeken naar het gebruik van verschillende vulmaterialen zoals zand, zaagsel, glasvezel. Met de meest veelbelovende mengsels zijn vervolgens proefstukken gemaakt in verschillende persen. In figuur 1 wordt een rechthoekige pers-mal (20

cm bij 15 cm) weergegeven samen met een aantal samples. In de weergegeven pers-mal wordt een mengsel inclusief een vulstof/vezel materiaal samengeperst en uitgehard in een oven tot een rechthoekige plaat (proefstuk).

Bij de ontwikkeling van formuleringen voor het verduurzamen van hout als een soort beits (opbrengen met de kwast) zijn verschillende typen gemodificeerde pyrolytische lignines geproduceerd en getest. Bij deze toepassing is het zeer belangrijk om gebruik te maken van groene oplosmiddelen die biologisch afbreekbaar zijn en waarbij geen of heel weinig Volatile Organic Components (VOC's) vrijkomen. Er is gekeken naar de ontwikkeling van twee typen verf, namelijk een op basis van een organisch oplosmiddel en een water gedragen verf. In totaal zijn voor beide typen verf meer dan 70 formuleringen gemaakt en getest, waarbij tot 60 m/m % (excl. oplosmiddel) aan lignine in de mengsels kan worden verwerkt. Vervolgens is er een selectie gemaakt van de best presterende formuleringen die verder zijn geoptimaliseerd. Hierbij is onder andere gekeken naar het verbeteren van de homogeniteit van de verven, het toepassen van (meer) natuurlijke pigmenten, product droging, uitloging, verkleuring, gedrag op de kwast en de



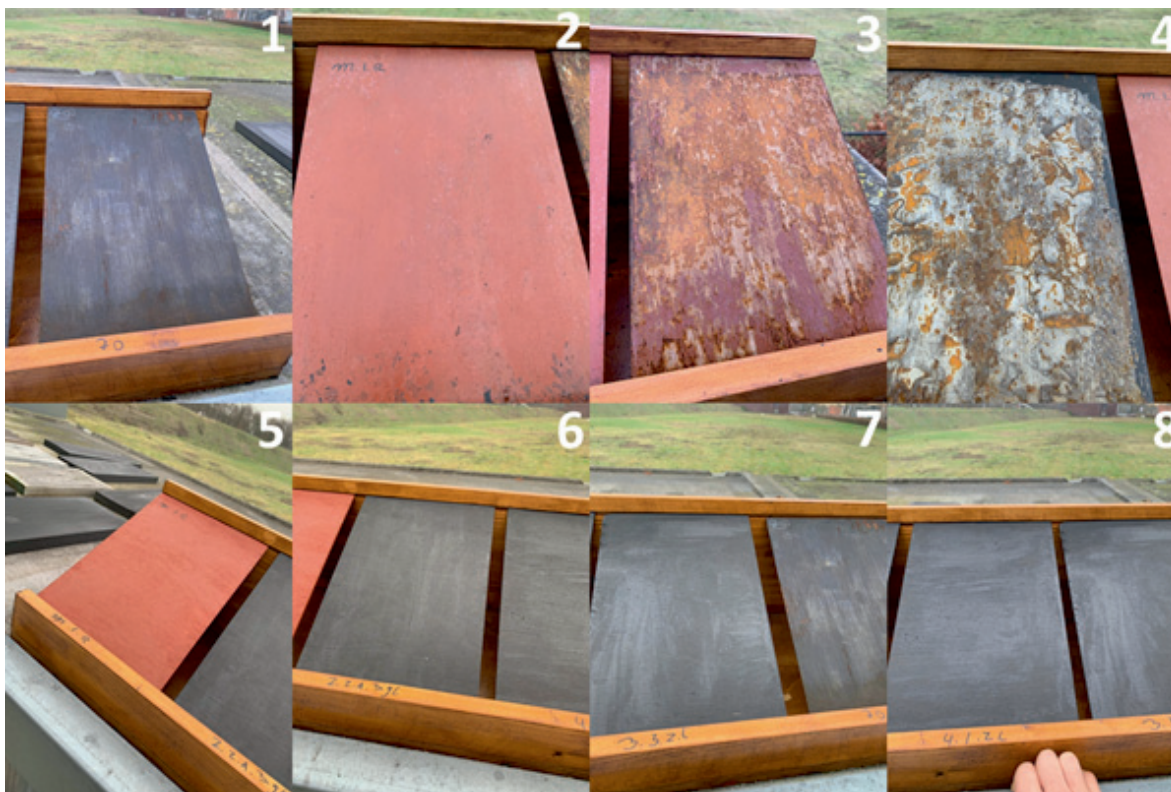
Figuur 1: Samples van composieten en pers

mate van houtbescherming. De meest veelbelovende formuleringen van de twee ontwikkelde typen verf zijn verder getest op houten en metalen platen. Hiervoor zijn o.a. speciale rekken gemaakt (zie figuur 3) die ervoor zorgen dat de houten en metalen platen onder een hoek van 30° blijven staan. Het testen van de geproduceerde verven op metaal zou daarbij kunnen leiden tot een extra toepassing en geeft additionele informatie over bijvoorbeeld hechtingeigenschappen. Proefstukken geverfd met de beste formuleringen zijn na een drogingsperiode (normaal 24 uur) op

een plat dak geplaatst voor een aantal maanden met volle blootstelling aan zon, regen en wind. Figuren 2 en 3 laten ook een aantal eerste resultaten (na een aantal maanden) zien van deze test(en). Voornamelijk de water gedragen verf lijkt niet geschikt (hecht niet voldoende) voor metaal (#3, #4), maar wél voor de houten platen. Intussen zijn een tuinhuis en een hek geverfd met de meest veelbelovende water gedragen verf (zie figuur 4). Hiervoor is meer dan 20 kg verf geproduceerd. De organisch gedragen verf lijkt desalniettemin meer geschikt voor metaal (#2), maar ook op



Figuur 2: De monsters op het platte dak.



Figuur 3: Verwering van de verf na een aantal maanden.



Figuur 4: Tuinhuis geschilderd met de nieuw ontwikkelde verf.

hout gaat dit goed. Ter vergelijking zijn op dezelfde manier platen getest met commerciële (vier keer) verven en beitsen.

De zware fractie, verkregen bij de pyrolyse van het digestaat in de PP is ook getest (zowel in de water- als in de organisch gedragen formuleringen). Deze fractie is eerst behandeld in een filmverdamer om zodoende resten water te verwijderen en de geur te verminderen. Vervolgens zijn met deze droge fractie verschillende mengtesten uitgevoerd. Met deze droge fractie kon (in beide gevallen) geen homogene verf worden geproduceerd net als de pyrolytische lignine verkregen uit standaard olie. Ook stonk het product enorm.

Voor het modifieren van hout zijn voor Foreco verschillende impregneermengsels geproduceerd. De benodigde pyrolyse-olie fracties zijn geproduceerd door standaard pyrolyse-olie continue te fractioneren in de aangepaste unit. In eerste instantie zijn deze mengsels geprepareerd en getest in het laboratorium. Hierbij is o.a. gekeken naar bijvoorbeeld de te gebruiken katalysator, de benodigde temperatuur en tijd om te curen (uitharden), de mate van uitharding (in een oven), uitloging en opschuimen van de verschillende formuleringen. In figuur 5 worden een aantal voorbeelden van uitgeharde mengsels weergegeven en van uitgeharde samples waaraan vervolgens water is toegevoegd. In elk bekglas is steeds een zelfde

hoeveelheid mengsel gebruikt. De mengsels in de bekglazen zijn onder identieke condities uitgehard. Alle uitgeharde samples (bovenste rij) lijken in eerste instantie goed uitgehard, maar wanneer er water wordt toegevoegd en deze samples een tijdje worden weggezet (24 uur laten staan, vervolgens geroerd) beginnen samples 18 en 19 uit te logen (onderste rij). Sample 17 is gemaakt met een



Figuur 5: In de oven uitgeharde formuleringen vóór (bovenste rij) en na toevoeging van water (onderste rij).

fractie uit standaard pyrolyse-olie en een katalysator en loogt niet uit. Samples 18 en 19 zijn gemaakt met het verkregen water uit de PP met digestaat + een katalysator. Dit sterke uitloggen is natuurlijk ongewenst wanneer toegepast in de behandeling van hout. Mengsels 18 en 19 lijken uitgeharden, maar zijn dit niet. De waterige fractie bevat blijkbaar geen reactieve componenten meer (o.a. suikers) die zorgen voor het uitharden en fixeren. Een ander belangrijk punt is dat deze waterfase enorm stinkt, ook na het harden. In overleg met Foreco is daarom besloten geen impregneer test te doen met dit materiaal.

Van de meest veelbelovende formuleringen (21 mengsels) zijn vervolgens grotere hoeveelheden materiaal (in totaal 610 kg) geproduceerd voor Foreco om te testen in de pilot (impregneer) unit.

Bij Foreco zijn de formuleringen vervolgens geïmpregneerd in houtmonsters met behulp van een vacuüm-druk methode. Houtmonsters van een halve meter zijn in een proefketel geïmpregneerd. Deze proefketel was speciaal voor dit project ingekocht. Na het impregneren zijn de monsters gedroogd en bij hoge temperatuur gefixeerd. Tijdens de fixatie polymeriseert de hars en hecht zich aan houtcellen waardoor eigenschappen

zoals krimp, zwelgedrag en duurzaamheid aanzienlijk worden verbeterd. Daarna is de uitloging gemeten en het droogproces indien nodig aangepast om hogere opnames en betere kwaliteit te bereiken.

Zowel naar de kwaliteit als het uiterlijk van de afgewerkte houtmonsters is vervolgens gekeken of dit voldoende is voor commercieel gebruik. Daarna zijn de houtmonsters verwerkt om hun duurzaamheid te testen. Tijdens deze test zijn kleine (5 x 1 x 1,5 cm) stokken in de grond gestoken of in direct schimmelcontact gebracht, waarna hun gewichtsverlies als gevolg van schimmelaantasting gemeten is. Naarmate de duurzaamheid van het hout hoger is, is het gewichtsverlies lager. Foreco heeft hierbij met name belangstelling voor een gemodificeerd, verduurzaamd product dat, in een latere fase, ook commercieel te gebruiken is.

Voor de test werd het snelst groeiende hout gebruikt: Radiata Pine. De eigenschappen van deze houtsoort zijn bekend en dienen als basis voor vergelijkingen. Na de behandelingen van de formuleringen is het hout in duurzaamheid redelijk verbeterd. Het effect van de verschillende katalysatoren is niet significant. Voor een commerciële toepassing is echter nog vervolgonderzoek nodig.



Figuur 6: Duurzaamheid tegen invloeden van buitenaf

Daarnaast zijn er nog andere eigenschapstesten uitgevoerd. Hieruit blijkt dat het nieuwe product verbeterd is qua krimp- en zwelgedrag. Ook scheurvorming is tijdens het proces gemeten. Dit omdat het zeer belangrijk is voor de verdere kwaliteitscontrole.

Naast de pure toepassingen van suiker en oliefracties in hout is de oplossing deels gebruikt in de originele hars van Foreco's bestaande product NobelWood. NobelWood wordt momenteel gemaakt met een bio-hars die gebaseerd is op rietsuikers en andere biomassa-resten. Daarom werd besloten dat er initiële testen uitgevoerd moesten worden omtrent de comptabiliteit, duurzaamheidsbijdrage en kostenbesparing van de bio-olie-oplossingen.

Uit de resultaten wordt opgemaakt dat de duurzaamheid tegen schimmels, krimp en zwelgedrag van het geïmpregneerde hout

onveranderd is in vergelijking met standaard NobelWood houtmonsters (figuur 7). De uitlogingseigenschappen zijn wat afgenomen. Aan de andere kant tonen de beschikbare biomassamogelijkheden, de stabiel innovatieve techniek en de lagere kostprijs indicaties, wel aan dat de toepassing van de suikerfracties zeer interessant is. Dit eist weliswaar nog nader onderzoek in de toekomst, maar is een veelbelovende uitkomst van dit traject. Als eerste stap in het kader van Groen Goud is er een DUBO keur certificaat aangevraagd om de milieubelasting van de nieuwe producten te meten.

Op basis van deze uitkomsten zal Foreco na afloop van de subsidieperiode verder werken om op termijn te komen tot een commercieel product. De mogelijkheden voor een patentaanvraag worden nader bekeken.

	Pyrowood	Suikerfractie + bio-hars
Duurzaamheid	niet voldoende	voldoende
Uitloging	voldoende	voldoende
Krimp- en zwel gedrag	Verbeterd	voldoende
Scheurvorming	voldoende	voldoende
Milieubelasting	Niet gemeten	DUBO gekeurd

Figuur 7: Vergelijking Pyrowood - Suikerfractie + bio-hars

WP 4: Opwaardering van de anorganische fractie

In dit werkpakket zijn de mogelijkheden onderzocht naar de opwaardering van de anorganische fractie d.m.v. biologische, fysische en chemische technieken naar een product met toegevoegde waarde. Anorganische fractie bestaat uit as en zand. De as is afkomstig van de biomassa en het zand is afkomstig van het pyrolyseproces. Werkpakket 4 is net zoals werkpakket 3 doorgevoerd onder leiding van dr. ir. Simon Hageman en ing. Albert Rosendahl van Saxion.

Pyrolyse van hoogwaardige houtachtige biomassa resulteert in een anorganische fractie van 0.4-1.0 wt% of minder. Binnen dit onderzoek wordt onderzocht of laagwaardigere biomassastromen gebruikt kunnen worden voor pyrolyse. Hierdoor zal de hoeveelheid anorganische fractie mogelijk oplopen tot 40-50 % als gebruik wordt gemaakt van bijvoorbeeld gedroogd digestaat. Met een dergelijk hoog percentage is het noodzakelijk om naast pyrolyse-olie ook de anorganische fractie als volwaardig product af te zetten. Een belangrijk aandachtspunt bij de verwerking van de anorganische fractie zijn de zware metalen. Afhankelijk van de bron kunnen deze in meer of mindere mate aanwezig zijn, een negatief effect hebben op het milieu en daardoor de toepassingsmogelijkheden limiteren. Bijvoorbeeld; houtas van verbrandingsprocessen wordt voor de wet niet altijd volwaardig als meststof gekenmerkt.

De verschillende laagwaardige biomassastromen leveren verschillende as-samenstellingen (figuur 1) op. De samenstelling van verbrandings-as is theoretisch geschikt om als bodemverbeteraar/kunstmest te fungeren (net zoals na een bosbrand). De as van de laagwaardige biomassagrondstoffen waar het project zich op richt zal naar alle waarschijnlijkheid significante hoeveelheden natrium, fosfor en kalium bevatten. Vanwege de hoge temperaturen die tijdens de voorbehandeling en pyrolyse gehaald worden, zal de ammoniak niet meer in de as aanwezig zijn. Het is belangrijk om aan te merken dat de aanwezige calcium en magnesium nuttig zijn om de bodem-pH constant te houden. Deze laatste twee elementen zullen ook in de as aanwezig zijn.

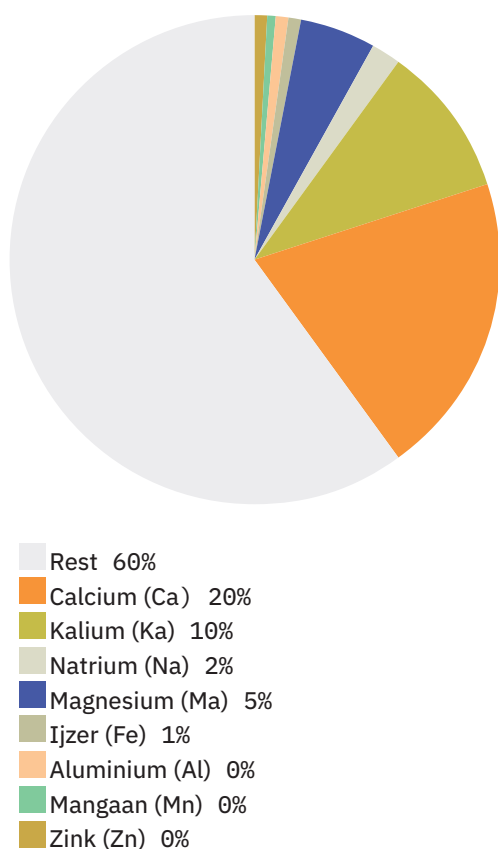
Hieronder zijn de volgende onderzoeksstappen beschreven: eerst is de samenstelling van de verschillende soorten as bepaald. Vervolgens zijn de resultaten van diverse scheidingstechnieken beschreven en uiteindelijk zal een bepaalde optie weergegeven worden voor de oplossing van de verwerking van de as.



Figuur 1: Drie as samples gebruikt tijdens het onderzoek. De kleurverandering duidt op een verschillende samenstelling.

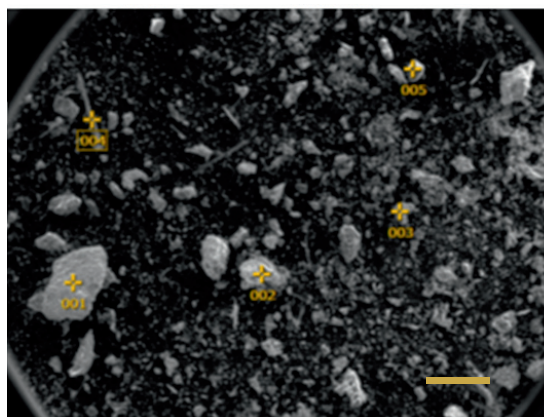
Samenstelling van de as

As bestaat grofweg uit verschillende elementen waarbij calcium, kalium, natrium, magnesium en chloor de belangrijke elementen zijn. De percentages van deze elementen in de verschillende fracties as kunnen behoorlijk variëren door het gebruik van verschillende biomassastromen, pyrolyseprocesvoering (bijvoorbeeld bodem- of vlieggas) en de hoeveelheid toegevoegd zand vanuit het pyrolyseproces. Naast deze elementen zijn ook de zware metalen in de as gevonden. Deze zware metalen geven juist de negatieve waarde aan de as, omdat ze giftig kunnen zijn. Ook is het duidelijk dat de elementen, waaronder de zware metalen, in verschillende samenstellingen kunnen voorkomen in de as. Een overzicht van een typische samenstelling van as is weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Een typische samenstelling van de as op veel voorkomende elementen. De ratio kan afwijken door de hoeveelheid zand. Indicatie: minder dan 0,1 % wordt gevonden voor de elementen koper, nikkel, cadmium, etc.

Met o.a. de scanning elektronen microscoop (SEM) en röntgenstraling (XRD) is, behalve naar de samenstelling van de as, ook gekeken naar de vorm en de structuur van de as. Uit de analyse van de SEM blijkt dat de deeltjesgrootte varieert (figuur 3). Verder geeft de SEM-foto ook weer dat de deeltjes qua samenstelling variëren; d.w.z. op microschaal is de as een heterogeen mengsel. Dit vermoeden wordt bevestigd door de XRD-analyse, waaruit blijkt dat het as-mengsel deels uit kleine kristallen bestaat. Wellicht is het daardoor mogelijk deeltjes te scheiden op dichtheid en grootte, waardoor ook elementen van elkaar gescheiden kunnen worden. In het ideale geval kunnen de zware metalen worden weggenomen en kan de resterende as terug naar de biomassa als voedingstof, hierdoor ontstaat een kringloop.

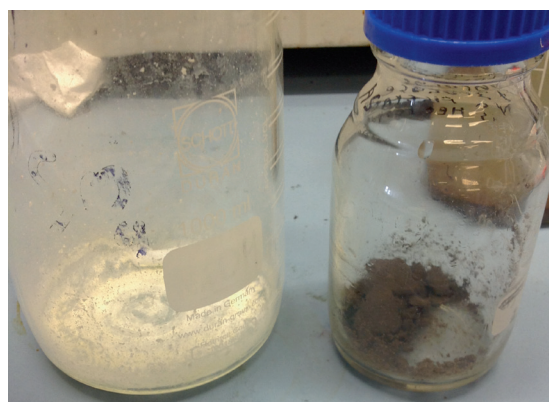


Figuur 3: SEM-foto van de as. Het maatstreepje is een halve millimeter lang. Deeltje #1 bestaat grotendeels uit CaO, #2 uit meerdere elementen, #3 uit vooral CaO, #5 vooral uit SiO (zand). Deeltje #4 bestaat vooral uit koolstof, en dit is waarschijnlijk afkomstig van de methode voor de SEM.

De opwaardering van de as

Tijdens het onderzoek is gezocht naar eenvoudige en goedkope processtappen voor het opwaarderen van de as. Deze stappen gaan uit van een eenvoudig principe en lage investerings-, energie- en chemicaliënkosten. De volgende technieken zijn toegepast en omschreven met een korte toelichting:

- (1) scheiding op grootte door zeven leverde geen gewenst effect op, de samenstelling van de elementen in de verschillende fracties veranderde niet.
- (2) het magnetisch winnen van ijzerdeeltjes uit de as was mogelijk, echter is de fractie ijzer erg klein en bovendien zaten aan deze deeltjes ook verontreinigingen, waardoor het economisch onwaarschijnlijk is de as magnetisch op te waarderen.
- (3) scheiding op elektrostatische lading resulteerde in geladen en ongeladen deeltjes, maar niet in een scheiding van elementen.
- (4) bezinken van de deeltjes in water leverde geen significante scheiding van de elementen op.
- (5) filtratie experimenten zijn uitgebreider bestudeerd, de variatie in temperatuur en pH biedt meerdere mogelijkheden.



Figuur 4: Voorbeeld van een filtratie-experiment: Pyrolyse-as wordt gemengd met demiwater. Uiteindelijk wordt deze oplossing gefilterd waardoor de onoplosbare delen achterblijven in het filter (residu). Geheel rechts is de uitkomst van een filtratiestap. De grotere witte fles bevat kalium, chloor, natrium en uitgedroogd filtraat. De rechter pot bevat het residu.

Een groot deel van de as, zoals de elementen kalium, natrium en calcium, is oplosbaar in water. Daarom zijn er verschillende filtratietechnieken uitgevoerd bij verschillende pH en temperaturen (figuur 4 en 5). Uit de filtratieproeven blijkt dat het mogelijk is het grootste deel kalium, chloor, zwavel en deels calcium uit de as te filtreren. Door sturing in temperatuur en pH is de hoeveelheid calcium in het filtraat te beïnvloeden. Als een groot deel van dit calcium in het filtraat kan eindigen, dan kan uiteindelijk een product verkregen worden voor de landbouw. De meeste zware metalen en hinderlijke componenten blijven in het residu aanwezig, hierdoor is uiteindelijk een deel van de voedingsstoffen gescheiden van de zware metalen.

Conclusie: oplossing voor de verwerking van pyrolyse-as

Tegenwoordig wordt de pyrolyse-as bij wet bestempeld als afval, omdat er zware metalen in aanwezig zijn. De zware metalen maken het momenteel onmogelijk om bij wet de as direct toe te passen als bemestingsstof. De opwerking van de as door middel van filtratie (waardoor de zware metalen worden verwijderd) biedt perspectieven voor een product als bodemverbeteraar. Ook kan gekeken worden naar mogelijkheden om de wettelijke regelingen aan te passen om pyrolyse-as toch direct te gebruiken als bodemverbeteraar, wanneer het lukt om de zware metalen eruit te halen. Uiteindelijk kan een dergelijke wettelijke verandering uitkomst bieden voor de verwerking van pyrolyse-as. De as terugvoeren naar waar het vandaan komt bijvoorbeeld (biomassavergister) of terug naar het bos. Hiervoor is nauwelijks voorbereiding nodig.



Figuur 5: Filtraat en residu. De bovenstaande figuur toont een detail van gedroogd filtraat (links) en residu (rechts). Na indrogen van de fracties blijft een harde substantie over (vandaar de brokken op de foto)



dr. Jurjen Spekreijse

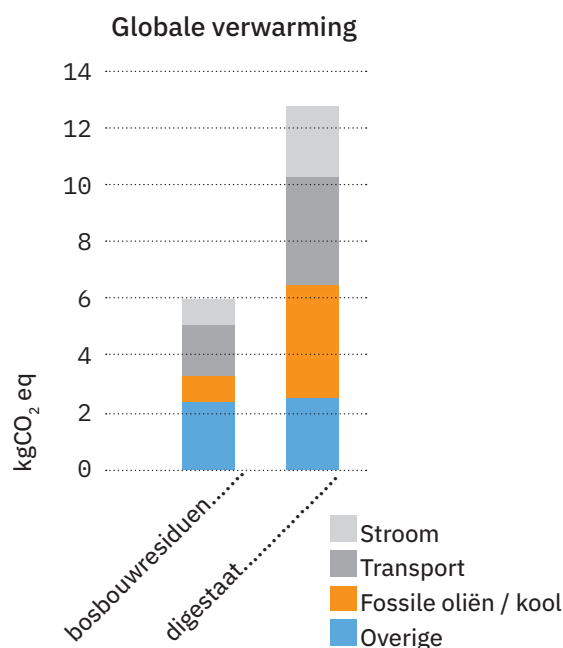
Projectleider van de LCA
BTG

WP 5: Life-Cycle-Analyse

In dit werkpakket zijn de milieueffecten van de productie en toepassing van pyrolyse-olie uit biogene reststromen onderzocht. Voor de productie van pyrolysesuikers voor het modificeren van hout is een integrale business case inclusief economische analyse uitgevoerd. Werkpakket 5 is doorgevoerd onder leiding van BTG.

1. LCA productie en toepassing van pyrolyse-olie

Pyrolyse-olie wordt verkregen door snelle verhitting van biomassa, meestal bosbouwresiduen in een zuurstofloze omgeving. De verkregen olie heeft een hogere dichtheid en is homogener dan de biomassa, wat het gebruik ervan als industriële warmtebron vergemakkelijkt. In dit werkpakket wordt het gebruik van maïsdigestaat afkomstig uit een Nawa-



Figuur 1. Broeikasgasemissies bij de productie van 1 GJ pyrolyse-olie uit hetzij bosbouwresiduen of digestaat, uitgedrukt in kg CO₂-equivalenten.

Ro-installatie (biogasinstallatie die werkt op bepaalde hergroeiende grondstoffen) als alternatieve grondstof onderzocht. Bovendien wordt de toepassing van pyrolysefracties als houtverduurzamingsmiddel geanalyseerd. In deze toepassing kunnen de pyrolytische suikers, die verkregen kunnen worden door het scheiden van de pyrolyse-oliefracties, creosoot vervangen. Creosoot, verkregen uit steenkoolteer, wordt momenteel gebruikt om de aantasting van hout te voorkomen wanneer het in contact komt met aarde of water. De levenscyclusanalyse (LCA) wordt uitgevoerd in het kader van het Groen Goud project en heeft tot doel de milieubelasting van de productie van pyrolyse-olie uit twee verschillende grondstoffen te vergelijken: bosbouwresiduen of maïssilage. Daarnaast wordt de milieubelasting van de houtverduurzamingsbehandeling met behulp van pyrolytische suikers, verkregen uit pyrolyse-olie uit bosbouwresiduen, beoordeeld en worden deze effecten vergeleken met die van het gebruik van creosoot. Naast deze vergelijkingen heeft de LCA tot doel de processen in de systemen te identificeren die de grootste impact hebben, om op die manier ondersteuning te bieden bij de besluitvorming over de voortzetting van de procesontwikkeling. Hieronder wordt een samenvatting van de LCA gepresenteerd, een volledig LCA-rapport is openbaar beschikbaar en een wetenschappelijke publicatie is in voorbereiding.

Methodiek

Deze LCA berekent de milieubelasting van twee systemen. Ten eerste wordt de invloed van het gebruik van een andere biomassa als grondstof voor de productie van pyrolyse-olie vergeleken. Hier wordt het effect van 1 GJ pyrolyse-olie uit bosbouwresiduen vergeleken met de productie van 1 GJ pyrolyse-olie uit maïsdigestaat. Ten tweede wordt de behandeling met houtverduurzamingsmiddelen met een fractie van de pyrolyse-olie vergeleken met creosoot op basis van fossiele brandstoffen. Deze fractie, de pyrolytische suikers, wordt geproduceerd uit pyrolyse-olie die gemaakt is van bosbouwresiduen.

De vergelijking van pyrolyse-olie uit verschillende bronnen van biomassa is een Cradle-to-Gate-LCA, waarbij de effecten van de productie van pyrolyse-olie worden vergeleken, maar de effecten op het gebruik en de levensduur niet worden berekend. Dit is bij het vergelijken van de twee grondstoffen niet nodig, omdat het gebruik en de gevolgen aan het einde van de levensduur van pyrolyse-olie voor elk type pyrolyse-olie identiek zullen zijn.

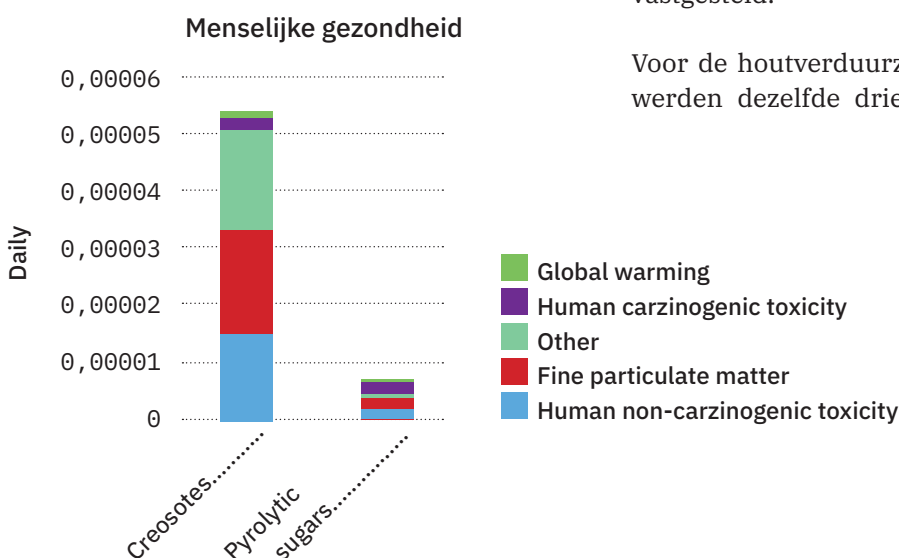
De vergelijking van houtbehandelingsmethoden is echter wel een volledige levenscyclusanalyse. Dit is nodig omdat het gebruik en de levensduur van de creosoot op fossiele basis en de biogebaseerde pyrolytische suikers aan het einde van hun levensduur verschillende milieueffecten hebben. In de sensitiviteitsanalyse werd bevestigd dat de keuze van de levensduur, ook al heeft die keuze een effect op de milieueffecten, de conclusies van deze LCA niet verandert.

Resultaten

De grondstof voor 1 GJ pyrolyse-olie wordt vergeleken in drie categorieën milieueffecten: (1) schade aan de menselijke gezondheid, (2) schade aan ecosystemen en (3) de toename van de schaarste aan grondstoffen. Deze effecten resulteren uit onderliggende categorieën, zoals grondgebruik, ecotoxiciteit en opwarming van de aarde. Het effect van 1 GJ pyrolyse-olie op de opwarming van de aarde is weergegeven in figuur 1.

Voor twee van de drie effectcategorieën, schade aan de menselijke gezondheid en toename van de grondstoffenschaarste, heeft het gebruik van maïsdigestaat aanzienlijk grotere gevolgen dan het gebruik van bosbouwresiduen. Voor de derde categorie, schade aan ecosystemen, werd geen significant verschil vastgesteld.

Voor de houtverduurzamingsbehandelingen werden dezelfde drie categorieën gebruikt



Figuur 2. Schade aan de menselijke gezondheid door 1 m3a behandeld hout door creosoot of pyrolytische suikers, uitgedrukt in levensjaren die zijn aangepast aan de beïnvloeding.

om de milieubelasting van 1 m³ behandelde houten palen voor een jaar te bepalen, inclusief de productie van het houtverduurzamingsmiddel, het gebruik van de houten paal en het einde van de levensduur. Van de drie categorieën hebben er twee een beduidend geringer effect bij het gebruik van pyrolytische suikers: schade aan de gezondheid van de mens en de toename van de grondstoffenschaarste. De derde categorie, schade aan ecosystemen, vertoont geen significant verschil. De grotere impact op de toegenomen grondstoffenschaarste is vooral te wijten aan de productie van creosoot uit fossiele grondstoffen. De schade aan ecosystemen is grotendeels het gevolg van het bodemgebruik dat de duurzame bosbouw nodig heeft om de houten paal en de bosbouwresiduen te produceren.

De schade aan de menselijke gezondheid vertoont een complexer effectenpatroon. Dit overzicht is weergegeven in figuur 2. Hier worden de belangrijkste bijdragen getoond voor zowel het creosootsysteem als het pyrolytische suikersysteem. De belangrijkste effecten voor pyrolytische suikers zijn de opwarming van de aarde en niet-kankerverwekkende toxiciteit. De impact van de opwarming van de aarde komt voort uit de energie die nodig is bij de toepassing van de pyrolytische suikers in de houten paal. De niet-kankerverwekkende toxiciteit komt voort uit de as die tijdens het pyrolyseproces ontstaat. Voor creosoot zijn de belangrijkste effecten

de opwarming van de aarde, de productie van fijnstof en de kankerverwekkende toxiciteit. De opwarming van de aarde is hier het gevolg van het toepassingsproces en de productie van creosoot. De fijnstof wordt voornamelijk geproduceerd bij de productie van creosoot. Ten slotte kan de kankerverwekkende toxiciteit worden herleid naar de uitloging van creosoot tijdens de toepassing van de creosoot in de houten paal en de uitloging van de creosoot tijdens de levensduur van de houten paal.

2. Economische analyse

De economische perspectieven van de te ontwikkelen nieuwe producten en ketens zijn onderzocht. Er heeft een economische evaluatie en een opzet van een integrale business case van de meest veelbelovende producten plaatsgevonden.

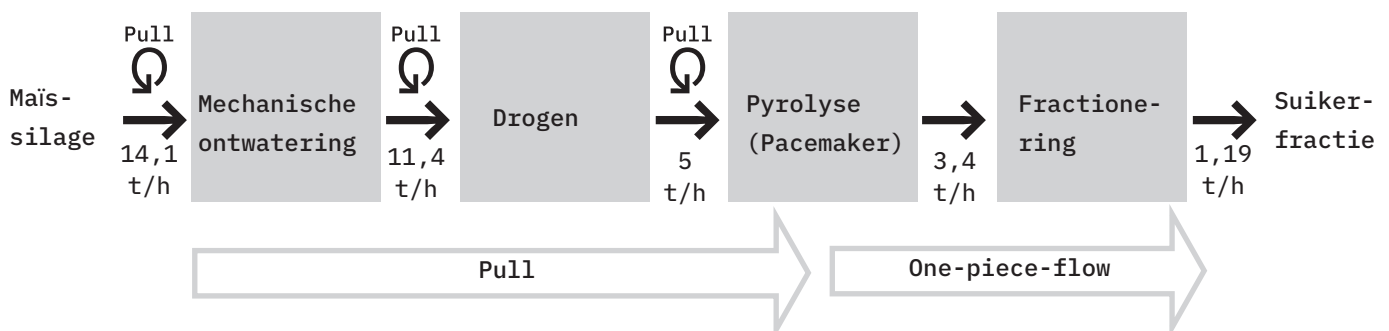
T.a.v. de scope van deze economische evaluatie is als startpunt de meest veelbelovende business case genomen, namelijk die van de productie van pyrolysesuikers voor het modificeren van hout. Deze waardeketen is verder ontwikkeld in het Groen Goud project, tot op een niveau dat er proefstukken (samples) ontwikkeld zijn, en dat er verder gewerkt kan worden aan de opschaling van de waardeketen. De resultaten hiervan zijn in een uitgebreide rapportage weergegeven¹. Hier wordt een samenvatting van de belangrijkste resultaten gegeven.

1 „Maïssilage tot suikerfractie“, Koen Bensink en Casper Adams, afstudeerverslag Technische Bedrijfskunde (BK5) Saxion Hogeschool, juni 2019.

Scope

De scope van het onderzoek omvat het bepalen van de haalbaarheid van de waardeketen van grondstof tot product. Qua grondstof is ervoor gekozen om maïssilage te nemen. Deze grondstof is gekozen in plaats van enkele andere grondstoffen welke onderzocht zijn in het Groen Goud project, omdat nader onderzoek heeft aangetoond dat daarmee de beste pyrolyse-olie kwaliteit bereikt kon worden. Het product betreft de suikerfractie van de pyrolyse-olie. De waardeketen betreft de volgende vier stappen (figuur 3):

Ten aanzien van de grondstof (maïssilage) wordt ervan uitgegaan dat deze gekocht kan worden. Met name in Duitsland is er een groot aanbod (en een grote vraag) naar maïssilage. De suikerfractie is het 'eindproduct'. In de opzet van deze waardeketen is bepaald dat dit product wordt geleverd als grondstof voor houtmodificatie. De verdere verwerking van deze suikerfractie wordt door gespecialiseerde bedrijven uitgevoerd en valt hiermee buiten de scope van het onderzoek. Qua hoeveelheden is het onderzoek uitgegaan van productie van pyrolysesuikers in een 'typische' pyrolysefabriek met een capaciteit van 5 ton (droge) biomassa per uur (input).



Figuur 3: Schematische voorstelling van de gehele waardeketen van maïssilage naar suikerfractie

Nadere uitwerking processtappen

Vorbewerking

Elk jaar zullen er 37.500 ton droge maïssilage beschikbaar moeten zijn om voldoende te kunnen pyrolyseren, dit betekent dat er 106.000 ton maïssilage vorbewerkt dient te worden, omdat maïssilage na mechanische ontwatering nog steeds een drogestofgehalte van minimaal 42 % heeft. De vorbewerking van deze maïssilage zal worden afgestemd op de pyrolyse. De samenstelling van de maïssilage per jaar zal licht verschillen waardoor de uitwerking op het gehele proces licht verandert. Het droge stof percentage zal ervoor zorgen dat er eventueel meer of minder energie nodig is voor de vorbewerking.

Pyrolyse

Als de maïssilage vorbewerkt is zal deze verwerkt worden tot pyrolyse-olie. De pyrolyse-fabriek zal in principe 24 uur per dag 7 dagen in de week draaien. Ervan uitgaande dat er ook stilstand optreedt in het proces voor onderhoud of storingen wordt aangenomen dat de pyrolyse-fabriek 7500 uur per jaar draait. Bij de pyrolyse wordt er per uur 5 ton vorbewerkte maïssilage verwerkt tot 3,4 ton pyrolyse-olie. Aangezien de maïssilage al vorbewerkt is conform de gestelde eisen, dienen er geen aparte stappen uitgevoerd te worden voordat het verwerkt wordt tot pyrolyse-olie. Dit feit creëert de omstandigheden om in een continu proces te werken.

Fractionering

De geproduceerde pyrolyse-olie zal vervolgens worden gefractioneerd door middel van extractie, dit wordt uitgevoerd middels een speciaal hiervoor ontworpen fractioneringsopstelling. Er is geen verdere vorbehandeling van de pyrolyse-olie vereist. De fractioneringsopstelling kan zo groot gemaakt worden als nodig. Hierdoor kan de fractionering in ieder geval 3,4 ton pyrolyse-olie per uur fractioneren. In dit proces ontstaat geen tussenvoorraad van pyrolyse-olie. De fractionering zal net zoals de pyrolyse fabriek 7500 uur per jaar dienen te draaien om de gewenste hoeveelheid suikerfractie te kunnen produceren. De pyrolyse-olie zal gescheiden worden in lignine, waterige fractie en suikerfractie. In tabel 1 is een overzicht hier van weergegeven.

Fractie	Hoeveelheid (v/v %)	Hoeveelheid (t)
Lignine	25-30	0,85-1,02
Waterige fractie	25	0,85
Suikerfractie	30-40	1,02-1,36

Tabel 1 : Opbrengst gefractioneerde pyrolyse-olie met een input van 3,4 ton pyrolyse-olie per uur

Logistiek

Er zijn twee belangrijke logistieke stappen te onderscheiden in de waardeketen:

- Transport (en opslag) van de maïssilage naar de pyrolysefabriek,
- Transport van de suikerfractie naar de eindafnemer.

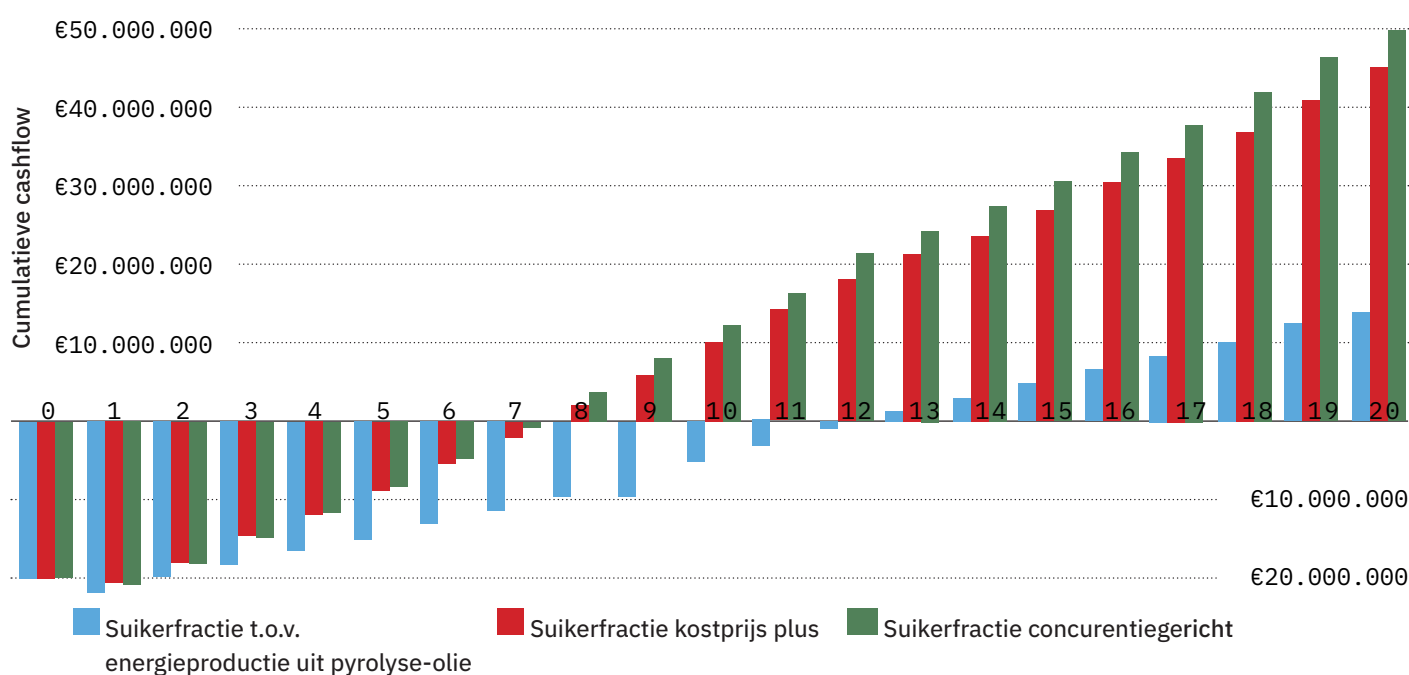
Omdat de eerste stap het belangrijkste is qua vrachtwagenbewegingen en kosten, is het van belang om de pyrolysefabriek zo dicht mogelijk bij de gebieden te situeren waar de markt voor maïssilage het meest gunstig is. Uit een analyse van de Duitse markt voor maïssilage blijken de deelstaten Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen en Bayern de meest interessante locaties om uit te zoeken. In deze deelstaten wordt de meeste snijmaïs geproduceerd en in één van deze deelstaten zal de fabriek dus worden gebouwd

Resultaat

Een economische analyse is uitgevoerd op de maïssilage – suikerfractie waardeketen. Hierbij zijn de investeringskosten, alsmede de operationele kosten en opbrengsten van de gehele waardeketen meegenomen. Qua opbrengsten zijn drie mogelijke prijzen voor de suikerfractie meegenomen:

- **Kostprijs plus:** hierbij wordt er uitgegaan van een opslag van 12% op de break even kostprijs. Dit resulteert in een verkoopprijs van 888 Euro/ton suikerfractie.
- **Zelfde opbrengst als bij energieproductie uit pyrolyse-olie.** Als we uitgaan van inkomsten van 300 euro/ton ruwe pyrolyse-olie (dit is de huidige verkoopprijs van de pyrolyse-olie) dan is er een verkoopprijs van 734 Euro/ton suikerfractie nodig voor de suikerfractie. Hierbij wordt al meegenomen dat het bijproduct lignine verkocht kan worden voor dezelfde prijs als pyrolyse-olie (op energiebasis).
- **Een derde mogelijke prijsstelling is de concurrentiegerichte prijsstelling.** Hierbij wordt de prijs van de suikerfractie 10% onder die van het te vervangen product (furfuryl alcohol) gesteld. Dit levert een prijs op van 930 Euro/ton suikerfractie.

In de onderstaande figuur is de netto cashflow van de waardeketen weergegeven voor deze drie prijsstellingen. Terugverdiëntijden lopen uiteen van 13 jaar voor de laagste prijsstelling tot 8 jaar voor de hoogste prijsstelling.



Figuur 4: Cashflow maïssilage - suikerfractie voor drie prijsstellingen

De opbouw van de kosten – in het geval van concurrentiegerichtte prijsstelling – is weer-gegeven in figuur 5. Duidelijk is te zien dat de kosten van de maïssilage een belangrijke kostencomponent zijn. Ook in het geval van houtige grondstoffen, zoals bij de Empyro fabriek, is dit het geval. Afschrijvingen zijn daarnaast een belangrijk onderdeel van de kosten, gevolgd door transportkosten. Zoals verwacht zijn de transportkosten van de maïssilage veel hoger dan de kosten van transport van de suikerfractie. Dit betekent dat de keuze om de maïssilage transportkosten te minimaliseren door transportafstanden zo laag mogelijk te houden een juiste was.

Conclusies

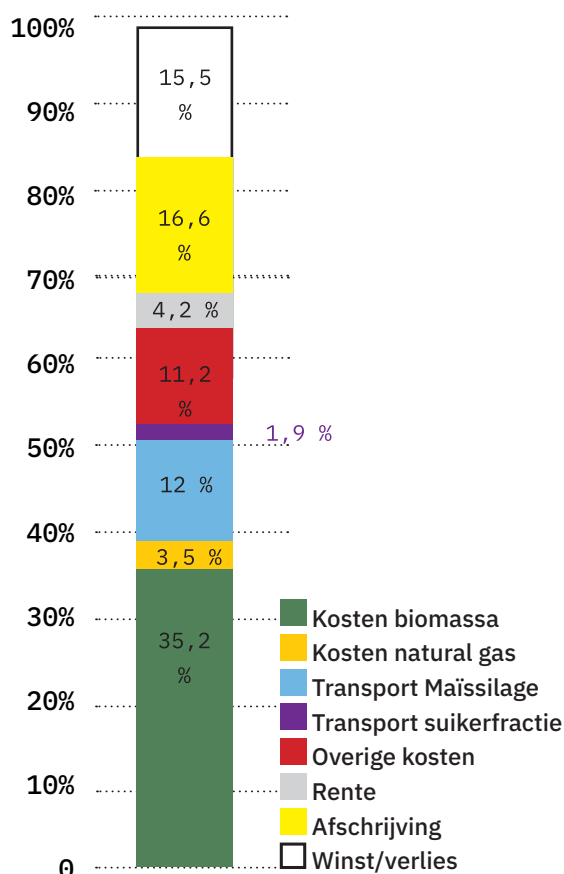
In dit werkpakket is onderzoek gedaan naar de milieu-impact van pyrolyse en de toepassing daarvan in producten door middel van levenscyclusanalyses. Daarnaast is een economische analyse uitgevoerd van de gehele

waardeketen van biomassa grondstof naar pyrolyse-olie fractie.

Ten aanzien van de milieu-impact analyse zijn er twee zaken onderzocht. Allereerst is de milieu-impact van de productie van pyrolyse-olie uit bosbouwresiduen vergeleken met de milieu-impact van pyrolyse-olie productie uit maïsdigestaat. Hieruit is gebleken dat de productie van pyrolyse-olie uit bosbouwresiduen een lagere milieu-impact heeft dan pyrolyse-olie uit maïsdigestaat. Dit betekent niet automatisch dat bosbouwresiduen altijd een betere grondstof zijn, maar alleen dat dat voor de gekozen case zo is. Het digestaat is immers een afvalstof van lagere kwaliteit. De tweede case die vergeleken is betreft het verduurzamen van hout. Houtverduurzaming met pyrolysesuikers is vergeleken met houtverduurzaming door het fossiele alternatief (creosoot olie). Hierbij bleek dat het gebruik van pyrolysesuikers een lagere milieu-impact heeft dan het fossiele alternatief, enerzijds omdat de pyrolysesuikers uit natuurlijke grondstoffen geproduceerd worden (biobased) en anderzijds omdat de toxiciteit lager is dan bij creosoot olie.

Ten aanzien van de economische analyse is gebleken dat de gehele waardeketen vanaf het pyrolyseren van maïssilage tot en met het fractioneren van de olie en het leveren van de suikerfractie voor de toepassing bij houtmodificatie economisch haalbaar is.

De waardeestroom, het proces, vanaf de inkoop van maïssilage tot de levering van het eindproduct suikerfractie aan de afnemer, zou vanuit het drogestofpercentage van maïssilage ingericht moeten worden. Als de capaciteit is afgestemd op de Customer Demand van de eindgebruiker zal het leiden tot



Figuur 5: Opbouw kostprijs suikerfractie (concurrerende prijsstelling)

een economisch haalbaar proces. Er worden inkomsten gegenereerd uit het hoofdproduct suikerfractie, ongeacht de prijszetting, en de bijkomende producten lignine en elektriciteit.

Aanbevelingen zijn dat het goed is om te onderzoeken of de energiekosten van de pyrolysefabriek verminderd kunnen worden omdat deze onder de huidige aannamen (42 % ds maïssilage input) niet zelfvoorzienend is

qua energie. Andere aanbevelingen zijn om de politieke weerstand in Duitsland tegen het gebruik van maïs voor energie mee te nemen bij de besluitvorming. Verder wordt aanbevolen om toepassingen te ontwikkelen voor twee afvalstromen uit de waardeketen te weten waterige fractie (bijproduct van het fractioneren) en persvocht (bijproduct mechanisch ontwateren). Vergisting van de waterige fractie zou mogelijk kunnen zijn.

SLOTWOORD

Met het project Groen Goud is het gelukt om ten eerste duurzame pyrolyseprocessen te ontwikkelen voor minderwaardige biomassastromen en ten tweede door fractionering hoogwaardige toepassingen van pyrolyseolie te ontwikkelen voor houtverduurzamingsmiddelen, verf en harsen. De sleutel tot dit succes lag vooral in een tweeledige grensoverschrijdende samenwerking: enerzijds tussen Duitsland en Nederland en anderzijds tussen bedrijfsleven en wetenschap. Met de twee hogescholen, de faculteit Energie Gebäude Umwelt van de FH Münster en de Academie Life Science, Engineering & Design van de Saxion Hogeschool, waren twee instituten betrokken, die niet alleen zeer veel expertise hebben ingebracht, maar elkaar ook perfect hebben aangevuld. Het analyseproces werd ondersteund door WESSLING, één van de deelnemende MKB-bedrijven. De andere bedrijven leverden enerzijds grondstoffen en biomassastromen (Lohmann en Alba Baving) en anderzijds een belangrijke bijdrage aan

de praktische uitvoering van de onderzoeksresultaten (BTG en Foreco). Bij BTG werden de pyrolyseprocessen op grote schaal getest en verder ontwikkeld en bij Foreco werden de toepassingen als houtverduurzamingsmiddelen en verven in de praktijk getest en verder geoptimaliseerd. De op handen zijnde marktrijpheid van de producten en de geplande patentaanvragen zijn tastbare resultaten van dit proces.

Wij willen van deze gelegenheid gebruik maken om onze hartelijke dank uit te spreken aan alle projectpartners en medewerkers die hebben bijgedragen aan dit project. Wij zijn ervan overtuigd dat de nauwe samenwerking en de daaruit voortgekomen betrouwbare netwerken ook na de subsidieperiode zullen worden voortgezet. In het bijzonder gaat onze dank uit naar het programmamanagement van INTERREG, dat ons te allen tijde actief heeft ondersteund bij de administratieve en subsidie-technische uitvoering van het project.

Johannes Reef / Frederik Wanink
DNL-contact

Steinfurt, augustus 2019