



# TECHNISCHE OPTIES VOOR HET RETROFITTEN VAN INDUSTRIEËN MET BIO-ENERGIE

*HANDBOEK*



- Auteurs:** Dominik Rutz<sup>2</sup>, Rainer Janssen<sup>2</sup>, Patrick Reumerman<sup>1</sup>, Jurjen Spekreijse<sup>1</sup>, Doris Matschegg<sup>3</sup>, Dina Bacovsky<sup>3</sup>, Arne Gröngroft<sup>4</sup>, Stephanie Hauschild<sup>4</sup>, Niels Dögnitz<sup>4</sup>, Emmanouil Karampinis<sup>5</sup>, Dimitrios-Sotirios Kourkoumpas<sup>5</sup>, Panagiotis Grammelis<sup>5</sup>, Kristian Melin<sup>6</sup>, Heidi Saastamoinen<sup>6</sup>, Ana Isabel Susmozas Torres<sup>7</sup>, Raquel Iglesias<sup>7</sup>, Mercedes Ballesteros<sup>7</sup>, Göran Gustavsson<sup>8</sup>, Daniella Johansson<sup>8</sup>, Anes Kazagić<sup>9</sup>, Ajla Merzić<sup>9</sup>, Dino Trešnje<sup>9</sup>, Hans Dagevos<sup>11</sup>, Siet J. Sijtsema<sup>11</sup>, Machiel J. Reinders<sup>11</sup>, Marieke Meeusen<sup>11</sup>  
*(nummers in superscript verwijzen naar de projectpartners op pagina 4)*
- Reviewers:** Edgar Ahn (BDI Holding GmbH), Nicholas LaPointe<sup>2</sup>
- Vertaler:** Nathalie van den Berg (BTG)
- Vertalingen:** De oorspronkelijke taal van het handboek is Engels. Dit handboek is ook beschikbaar in de volgende talen: Bosnisch, Duits, Grieks, Spaans. Andere talen kunnen volgen.
- ISBN:** 978-3-936338-68-3
- Gepubliceerd:** © 2020 door WIP Renewable Energies, München, Duitsland
- Editie:** 1<sup>e</sup> editie
- Contact:** WIP Renewable Energies, Sylvensteinstr. 2, 81369 München, Duitsland  
[Dominik.Rutz@wip-munich.de](mailto:Dominik.Rutz@wip-munich.de) Tel.: +49 89 720 12 739  
[www.wip-munich.de](http://www.wip-munich.de)
- Nationaal contact:** BTG Biomass Technology Group BV, Josink Esweg 34, 7545 PN, Nederland  
[reumerman@btgworld.com](mailto:reumerman@btgworld.com) Tel.: +31 53 486 1198  
[www.btgworld.com](http://www.btgworld.com)
- Website:** [www.BIOFIT-h2020.eu](http://www.BIOFIT-h2020.eu)
- Copyright:** Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit boek mag worden verveelvoudigd, in welke vorm of op welke wijze dan ook, om te worden gebruikt voor commerciële doeleinden, zonder schriftelijke toestemming van de uitgever. De auteurs staan niet in voor de juistheid en/of volledigheid van de informatie en de gegevens die in dit handboek zijn opgenomen of beschreven.
- Disclaimer:** Dit project is gefinancierd uit het onderzoeks- en innovatieprogramma Horizon 2020 van de Europese Unie in het kader van overeenkomst nr. 817999. De verantwoordelijkheid voor de inhoud van dit verslag ligt uitsluitend bij de auteurs. Het weerspiegelt niet noodzakelijkerwijs de mening van de Europese Unie of van het Innovation and Networks Executive Agency (INEA). Noch INEA, noch de Europese Commissie zijn verantwoordelijk voor het gebruik van de informatie in dit handboek.

## ***Dankwoord***

Dit handboek werd uitgewerkt in het kader van het BIOFIT-project. De auteurs bedanken de Europese Commissie voor haar steun aan het project. Voor het toestaan van het gebruik van informatie en grafieken, bedanken de auteurs de volgende bedrijven en medewerkers: Bioenergy Europe, KnowPulp database, C-Green Technology AB, Arbaflame, Yilkins, UPM Biofuels en de projectpartners.

## ***Het BIOFIT project***

Bio-energie is een essentiële vorm van hernieuwbare energie en levert ongeveer 60% van de huidige hernieuwbare energievoorziening in de EU28. Door continue innovaties worden bio-energietechnologieën steeds geavanceerder en meer divers, wat leidt tot energie-efficiënte productie van elektriciteit, warmte en koeling en een verscheidenheid aan transportbrandstoffen. Retrofitten, wat betekent dat een deel van een bestaande faciliteit of installatie wordt vervangen door state-of-the-art apparatuur, kan een kosteneffectieve oplossing zijn om meer bio-energie te benutten in bepaalde industrieën. Retrofitten is een van de snelste manieren om het aandeel hernieuwbare energie in Europa te vergroten door de energieproductie van bestaande industrieën duurzamer te maken.

Het BIOFIT-project, ondersteund door het Horizon 2020-programma van de Europese Unie, heeft als doel bij te dragen aan de invoering van bio-energie retrofits in Europese industrieën. Retrofitten betekent vaak lagere kapitaalkosten, kortere doorlooptijden, snellere implementatie, minder tijdverlies bij de productie en minder risico's. Het project maakt de invoering van retrofits op het gebied van bio-energie eenvoudiger in vijf specifieke sectoren<sup>1</sup>:

- Eerste generatie biobrandstoffen industrie
- Pulp- en papierindustrie
- Fossiele raffinaderijen
- Fossiele energieopwekking
- Warmtekrachtkoppeling (WKK)

De doelstellingen van het BIOFIT-project zijn onder andere:

- Het uitwerken van 10 concrete voorstellen (case studies) voor het retrofitten van bio-energie voor elk van de genoemde industrieën, samen met de actoren uit de industrie en de markt, die zich inzetten om de resultaten van BIOFIT in de praktijk te brengen.
- Verkrijgen van een accuraat en compleet overzicht van de mogelijkheden voor bio-energie retrofits in de beoogde industrieën, alsook inzicht in de voorwaarden waarop elk type van bio-energie retrofit haalbaar is, en dit te communiceren naar de doelgroepen.
- Het betrekken, verbinden en ondersteunen van stakeholders en marktactoren, met name uit de industrie, door het communiceren van resultaten, het verspreiden van kennis, het bieden van de mogelijkheid tot dialoog en het ontwikkelen van de beste methoden en tools.
- Het evalueren van de randvoorwaarden (juridisch, institutioneel en politiek) om algemene en sectorspecifieke belemmeringen en mogelijkheden in kaart te brengen.
- Advies geven aan beleidsmakers op nationaal en regionaal niveau om als input te dienen om het beleid, de marktondersteuning en de financiële randvoorwaarden beter te kunnen informeren.

Tot de kernactiviteiten van BIOFIT behoren de verspreiding van bestaande voorbeelden van de beste methoden en de ontwikkeling van 10 retrofit case studies in samenwerking met industriële partners. Tegelijkertijd zal de hele industrie worden betrokken en ondersteund via vijf industriële fora (werkgroepen).

---

<sup>1</sup> De selectie van deze industrieën is vanwege de specificaties van de oproep in het Horizon 2020-programma, waar BIOFIT een onderdeel in was.

Het driejarige project is in oktober 2018 van start gegaan. Het BIOFIT-consortium bestaat uit veertien partners uit acht Europese landen: Zweden, Nederland, Duitsland, Spanje, Finland, Oostenrijk, Bosnië-Herzegovina en Griekenland. Het consortium bestaat uit zowel industriële partners als academische/ onderzoekspartners.

## Project Consortium en Nationale aanspreekpunten:



**BTG Biomass Technology Group BV**, Nederland<sup>1</sup>  
Patrick Reumerman reumerman@btgworld.com  
www.btgworld.com



**WIP Renewable Energies**, Duitsland<sup>2</sup>  
Dominik Rutz Dominik.Rutz@wip-munich.de  
www.wip-munich.de



**BIOENERGY 2020+**, Oostenrijk<sup>3</sup>  
Dina Bacovsky Dina.bacovsky@bioenergy2020.eu



**DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH**, Duitsland<sup>4</sup>  
Arne Gröngröft Arne.Groengroeft@dbfz.de  
www.dbfz.de



**Centre for Research & Technology, Hellas**, Griekenland<sup>5</sup>  
Manolis Karampinis karampinis@certh.gr  
www.certh.gr, www.cperi.certh.gr



**VTT Technical Research Centre of Finland Ltd**, Finland<sup>6</sup>  
Heidi Saastamoinen heidi.saastamoinen@vtt.fi  
www.vttresearch.com



**Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas**, Spanje<sup>7</sup>  
Mercedes Ballesteros m.ballesteros@ciemat.es  
www.ciemat.es



**ESS – Energikontor Sydost AB**, Zweden<sup>8</sup>  
Daniella Johansson daniella.johansson@energikontorsydost.se  
www.energikontorsydost.se



**JP Elektroprivreda BiH d.d.-Sarajevo**, Bosnië-Herzegovina<sup>9</sup>  
Anes Kazagic a.kazagic@epbih.ba  
www.epbih.ba



**Technip Benelux B. V.**, Nederland<sup>10</sup>  
Mark Wanders mark.wanders@technipfmc.com  
www.TechnipFMC.com



**Stichting Wageningen Research**, Nederland<sup>11</sup>  
Marieke Meeusen marieke.meeusen@wur.nl  
www.wageningenur.nl/lei



**Swedish Biofuels AB**, Zweden<sup>12</sup>  
Andrew HullL andrew.hull@swedishbiofuels.se  
www.swedishbiofuels.se



**Hellenic Petroleum S.A.**, Griekenland<sup>13</sup>  
Spyros Kiartzis skiartzis@helpe.gr  
www.helpe.gr



**Biocarburantes de Castilla y León S.A.**, Spanje<sup>14</sup>  
Juan María García Alonso Juan.garcia@vertexbioenergy.com  
www.vertexbioenergy.com

## ***Inhoudsopgave***

<b>Dankwoord</b> .....	<b>2</b>
<b>Het BIOFIT project</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Introductie</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Het retrofit proces</b> .....	<b>9</b>
2.1 Betrokken stakeholders .....	10
2.2 De rol van burgers en consumenten.....	11
2.3 Motivatie voor retrofitten .....	16
<b>3 Biomassa beschikbaarheid</b> .....	<b>19</b>
3.1 Biomassapotentieel .....	19
3.2 Biomassa verschijningsvormen .....	24
3.3 Logistieke waardeketens .....	29
3.4 Duurzaamheid en certificeringsbeleid.....	30
<b>4 Overzicht van de biomassa conversieroutes</b> .....	<b>34</b>
<b>5 Retrofitten (aanpassen) van de eerste generatie biobrandstof installaties</b> .....	<b>36</b>
5.1 Overzicht van de sector.....	36
5.2 Toevoeging van cellulose-ethanol aan eerste generatie bioethanol.....	37
5.3 Alcoholen voor de luchtvaart .....	39
5.4 Multi-feedstock biodiesel toevoeging.....	40
5.5 Glycerol omzetting in methanol .....	42
5.6 Biomethaan als vervanger van aardgas .....	43
5.7 Elektrobrandstoffen .....	44
5.8 Conclusie .....	46
<b>6 Retrofitten van fossiele raffinaderijen</b> .....	<b>48</b>
6.1 Sector overzicht .....	48
6.2 Koolstofreductie in fossiele raffinaderijen .....	50
6.3 HVO-integratie .....	52
6.4 Integratie van pyrolyse-olie in raffinaderijen .....	56
6.5 Conclusie .....	60
<b>7 Retrofitten van fossiel gestookte elektriciteits- en warmtekrachtcentrales</b> .....	<b>62</b>
7.1 Overzicht van de sector.....	62
7.2 Gebruikte technologieën in de sector .....	63
7.3 Directe co-firing (gedeeltelijke bio-energie retrofit) .....	68
7.4 Indirecte co-firing (gedeeltelijke bio-energie retrofit) .....	68
7.5 Parallel co-firing (gedeeltelijke bio-energie retrofit).....	69
7.6 Biomassa hergebruik (volledige bio-energie retrofit).....	70
7.7 Thermisch behandelde biomassa.....	72



---

7.8	Conclusie .....	74
<b>8</b>	<b>Retrofitten van de pulp- en papierindustrie.....</b>	<b>76</b>
8.1	Overzicht van de sector.....	76
8.2	Pulproces en residuen van de pulp- en papierindustrie .....	77
8.3	Black/brown liquor ethanol .....	83
8.4	Black liquor vergassing tot DME.....	83
8.5	Methanol uit pulpfabrieken .....	84
8.6	Benutting van pulp en papierslurry .....	85
8.7	Lignine extractie .....	87
8.8	Hydrothermische liquefactie .....	88
8.9	Vervanging van fossiele brandstoffen bij de energieproductie van papierfabrieken	89
8.10	Alternatieve brandstoffen in de kalkoven en de schorsvergassing.....	90
8.11	Hernieuwbare diesel uit resten tallolie uit pulpfabrieken .....	90
8.12	Conclusie .....	92
	<b>Referenties.....</b>	<b>94</b>

## 1 **Introductie**

In de laatste paar decennia is het steeds duidelijker geworden dat de fossiele brandstoffen schaars en eindig zijn, en het gebruik ervan het milieu en het klimaat kan schaden. Groeiende productie van hernieuwbare energie zal, naast het verminderen van onze CO<sub>2</sub>-uitstoot volgens het Parijs-akkoord (2015), zorgen voor een betere continuïteit van de energievoorziening, het stimuleren van innovatie, het creëren van nieuwe banen en een bijdrage leveren aan de economische ontwikkeling.

In de EU-richtlijn hernieuwbare energie (Renewable Energy Directive) van 2009 zijn nationale streefcijfers voor hernieuwbare energie overeengekomen die dienen te leiden tot 20% hernieuwbare energieproductie in de EU tegen 2020. Sindsdien hebben veel lidstaten een snelle groei van de productie van hernieuwbare energie doorgemaakt, vaak zelfs tot meer dan de gestelde doelen, waaruit blijkt dat er in Europa een brede consensus over dit onderwerp bestaat. In het EU-pakket "Schone energie voor alle Europeanen" uit 2016 is de ondubbelzinnige keuze voor hernieuwbare energie verder vastgelegd door de vaststelling van een bindende, hogere doelstelling van 27% van het eindverbruik van energie uit hernieuwbare bronnen in 2030. In 2018 werd dit streefcijfer naar boven bijgesteld tot ten minste 32% van het eindverbruik van energie. Dit is in overeenstemming met de routekaart van de EU voor 2050, die voorziet in een geleidelijke afschaffing van fossiele brandstoffen, mede door vervanging door hernieuwbare energie.

Bio-energie is een essentiële vorm van hernieuwbare energie en leverde naar schatting 60% van de EU-productie van hernieuwbare energie in 2017<sup>2</sup>. Ook in de toekomst zal bio-energie belangrijk blijven. Het Internationaal Energieagentschap (IEA) merkt op dat in de routekaart<sup>3</sup> voor 2017 bio-energie een essentiële rol speelt in het 2DS (2°C scenario), en dat bio-energie tegen 2060 bijna 20% van de wereldwijde cumulatieve CO<sub>2</sub>-emissiereductie op zal opleveren. Bio-energie is een complex en soms controversieel onderwerp. Er is een groeiend besef dat alleen voor bio-energie die op duurzame wijze wordt geleverd en gebruikt een plaats is in een toekomst met een lage CO<sub>2</sub>-uitstoot.

Moderne bio-energie kent vele vormen. Relatief eenvoudige toepassingen, zoals het opwekken van warmte door de verbranding van hout worden samen met de productie van biogas door middel van anaerobe vergisting (AD) en de productie van transportbrandstoffen toegepast. Door innovatie worden technologieën steeds geavanceerder en meer divers, wat leidt tot de productie van een verscheidenheid aan geavanceerde transportbrandstoffen (eerste en tweede generatie bio-ethanol, biodiesel en biokerosine), intermediaire bio-energiedragers en zeer efficiënte, koolstofarme energieproductie, verwarming en koeling.

Naast het bouwen van volledig nieuwe bio-energiecentrales kan retrofitten - dat wil zeggen dat delen van een fabriek of installatie worden vernieuwd - een goed alternatief zijn om fossiele brandstoffen te vervangen of voor het upgraden van verouderde duurzame technologieën. Retrofitten betekent vaak lagere kapitaaluitgaven (CAPEX), kortere doorlooptijden, snellere implementatie, minder productietijdverliezen en lagere risico's, vergeleken met de volledige sloop van oude fabrieken en de bouw van geheel nieuwe bio-energiecentrales.

Het BIOFIT-project, ondersteund door het Horizon 2020-programma van de Europese Unie, ondersteunt het retrofitten van bio-energie in vijf sectoren: Eerste generatie biobrandstoffenproductie, de pulp- en papierindustrie, fossiele olieraffinaderijen, fossiele elektriciteitscentrales en bij warmtekrachtkoppeling (WKK). De selectie van deze industrieën volgt uit het Horizon 2020-programma, de basis voor de financiering van BIOFIT.

---

<sup>2</sup> <http://www.europeanbioenergyday.eu/>

<sup>3</sup>

[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology\\_Roadmap\\_Delivering\\_Sustainable\\_Bioenergy.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf)

Om de technische mogelijkheden van het retrofitten in de vijf genoemde sectoren te laten zien is dit handboek "Technische opties voor het retrofitten van industrieën met bio-energie" geschreven door de leden van het BIOFIT-consortium. Het handboek schetst een breed scala aan technische oplossingen voor de beoogde industrieën, die zeer verschillend zijn, maar die vaak voor vergelijkbare uitdagingen staan. Het doel is om deze informatie te verstrekken aan belanghebbenden en besluitvormers in de relevante industrieën die mogelijk weinig technische achtergrondkennis hebben. Het handboek heeft als doel het technische inzicht in bio-energiemogelijkheden voor deze industrieën te vergroten. Er is getracht om de taal eenvoudig (niet-technisch) te houden en het bevat veel grafieken en illustraties.

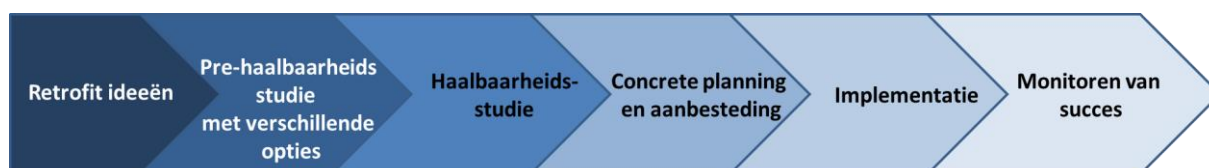
## 2 Het retrofit proces

Bio-energie retrofitten is het vervangen van delen van een fabriek of installatie door geavanceerde biomassatechnologieën. Daarbij kunnen fossiele brandstoffen vervangen worden of verouderde technologieën geüpgraded worden tot moderne duurzame energie technologieën. Het alternatief is het bouwen van volledig nieuwe bio-energiecentrales, waarbij de oude fabriek of installatie wordt gesloopt. Potentiële voordelen van een retrofit zijn lagere kapitaaluitgaven (CAPEX), kortere doorlooptijden, snellere implementatie, minder productietijdverliezen en lagere risico's.

In de praktijk hangen retrofits sterk af van het type bedrijfstak en van de doelstellingen. Het retrofit-proces kan worden gekenmerkt door de volgende parameters:

- **Soort en schaal van de industrie:** Het soort en de schaal van de industrie is van invloed op vele factoren voor retrofits, zoals de technologieën, financiering, doelstellingen, etc.
- **Kernprocessen en -producten:** De bio-energie gebruikt als procesenergie voor de industrie (bijvoorbeeld in de pulp- en papiersector) of kan het hoofdproduct zelf zijn (bijvoorbeeld bij 2e generatie biobrandstoffen).
- **Aantal implementatiestappen van de retrofit:** De retrofit kan in één stap worden geïmplementeerd, of het kan een meerstapsproces zijn dat verschillende individuele projecten omvat.
- **Compleetheid van retrofit:** De retrofit kan een volledige omschakeling zijn van het oude systeem naar gebruik van enkel biomassa, of het kan een gedeeltelijke omschakeling zijn naar biomassa.
- **Tijdsbestek van de retrofit:** Afhankelijk van de grootte en het soort industrie kan de omschakeling binnen een zeer korte tijd (bijvoorbeeld binnen een jaar) of binnen een lang tijdsbestek (meerdere jaren) worden geïmplementeerd.

De algemene stappen van het retrofit proces zijn vereenvoudigd weergegeven in Figuur 1. Afhankelijk van de omvang van de retrofit kan de implementatie ervan zeer tijdrovend, langdurig en kapitaalintensief zijn, vooral voor grote projecten.



Figuur 1: Vereenvoudigde weergave van het retrofit proces

## 2.1 Betrokken stakeholders

Bij het retrofitten van grotere industrieën zijn meestal meerdere belanghebbenden betrokken, zowel binnen het bedrijf (interne stakeholders) als buiten het bedrijf (externe stakeholders). De potentiële betrokkenheid bij en belangen in het retrofit proces van de interne en externe belanghebbenden zijn weergegeven in Tabel 1 en Tabel 2. De rol van burgers en consumenten wordt beschreven in paragraaf 2.2. Het is belangrijk om de relevante stakeholders voor elk retrofit proces te identificeren en hen in de juiste fase van projectuitvoering te betrekken: Vaak is het beter om hen zo vroeg mogelijk en niet te laat te betrekken, om te anticiperen op de belangrijkste stappen voor de implementatie, en mogelijke belemmeringen tijdig aan te kunnen pakken.

**Tabel 1: Interne stakeholders die betrokken zijn bij het retrofit proces**

<i>Interne stakeholders</i>	<i>Betrokkenheid en belangen bij het retrofit proces</i>
<b>Topmanagement van het bedrijf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neemt de belangrijkste beslissingen binnen het bedrijf</li> <li>• De managementondersteuning van het retrofit project hangt af van de algemene bedrijfsdoelstellingen</li> <li>• Moet misschien overtuigd worden van de voordelen van de retrofit</li> <li>• Bio-energie retrofitten kan bijdragen aan een goed imago van het bedrijf</li> </ul>
<b>R&amp;D afdeling</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaak verantwoordelijk voor de planning en implementatie van de retrofit</li> <li>• Verantwoordelijk voor het realiseren van innovaties in het bedrijf</li> </ul>
<b>Andere afdelingen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afhankelijk van de complexiteit van de retrofit, moeten er mogelijk verschillende bedrijfsafdelingen bij worden betrokken, zoals de afdelingen voor financiering, inkoop, exploitatie, techniek, milieu, etc.</li> </ul>
<b>Operators en technici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De operators en technici moeten hun technische kennis en ervaring in (kunnen) brengen</li> </ul>

**Tabel 2: Externe stakeholders die betrokken zijn bij het retrofit proces**

<i>Externe stakeholders</i>	<i>Betrokkenheid en belangen bij het retrofit proces</i>
<b>Beleidsmakers en politici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definiëren politieke doelen en wetgeving die van invloed kunnen zijn op het bedrijf.</li> <li>• Profiteren positief van industriële retrofits omdat ze bijdragen aan politieke doelstellingen.</li> </ul>
<b>Brancheorganisaties en lobbygroepen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beïnvloeden politici en beslissingen van bedrijven.</li> <li>• Kunnen retrofits bevorderen of ontmoedigen, afhankelijk van de doelstellingen van de vereniging/ branche-groep.</li> <li>• Zijn geïnteresseerd in een positief imago voor de branche die zij vertegenwoordigen.</li> </ul>
<b>Milieuactivisten, NGO's</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grote retrofitten zijn vaak 'in het vizier' van milieuactivisten.</li> <li>• Bio-energievoorziening moet duurzaam zijn en moet negatieve milieueffecten vermijden.</li> <li>• Retrofitten met weinig daadwerkelijke duurzame impact kan als "greenwashing" worden gezien.</li> </ul>

<b>Lokale autoriteiten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verantwoordelijk voor relevante vergunningen, noodzakelijk voor het uitvoeren van het retrofit project.</li> <li>• Kunnen stimulans geven.</li> </ul>
<b>Financiële instituten, banken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zorgen voor financiering (leningen).</li> </ul>
<b>Burgers en consumenten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geïnteresseerd in lage prijzen van milieuvriendelijke producten (bijv. stadsverwarmingsbedrijven willen warmte produceren uit biomassa in plaats van steenkool om meer duurzame warmte aan hun consumenten te verkopen).</li> <li>• Invloed op beleid door de verkiezing van politici.</li> </ul>
<b>Technologieleveranciers</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zijn cruciaal voor de implementatie van de retrofit.</li> <li>• Willen technologieën verkopen: Zijn geïnteresseerd in het leveren van goede apparatuur en diensten.</li> </ul>
<b>Externe consultants en experts (bedrijven, universiteiten, etc.)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zijn cruciaal in het retrofit proces, als er te weinig expertise is of als externe expertise goedkoper is dan de interne.</li> <li>• Willen hun adviesdiensten verkopen</li> <li>• Kunnen nodig zijn voor vergunningen en certificering (bijv. met betrekking tot veiligheid en milieu).</li> </ul>
<b>Publieke pers en media</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zijn geïnteresseerd in succesverhalen over geslaagde retrofits.</li> <li>• Kunnen informatie overdragen aan het publiek en zo bijdragen aan een positief imago.</li> </ul>

## 2.2 De rol van burgers en consumenten

Klimaatverandering, biodiversiteitsverlies of broeikasgas(BKG)emissies hebben de afgelopen jaren veel maatschappelijke, politieke en media-aandacht gekregen. Dit heeft geleid tot een geleidelijke toename van het publieke bewustzijn over de nadelen en grenzen van de op fossiele brandstoffen gebaseerde economie. De alternatieve bio-economie is bedoeld om fossiele brandstoffen te vervangen door het gebruik van hernieuwbare biomassa in producten en energie. Binnen de bredere context van de bio-economie is er een paradigmaverschuiving die evolueert naar productie- en consumptiemodi die meer verantwoordelijk zijn voor, en reageren, op de draagkracht van de planeet. Met name Duurzaam Ontwikkelingsdoel 12 (Sustainable Development Goal 12), dat zich richt op verantwoorde consumptie en productie door onder andere het bevorderen van hulpbronnen- en energie-efficiëntie, is opmerkelijk.

Gezien het feit dat bij retrofits de economische voordelen en duurzaamheid centraal staan, is het ook belangrijk om te beseffen dat industrieën niet in een maatschappelijk vacuüm opereren. Naast de dimensies Profit en Planet, staat de derde P voor People. Het idee van de 3 P's suggereert dat innovatieve retrofit methoden, die zijn gericht op het beter gebruiken van niet-fossiele energiebronnen, meer zijn dan alleen het verbeteren van de technologische haalbaarheid en economische levensvatbaarheid. Retrofitten is dus niet alleen een kwestie van bedrijfsprestaties en vermindering van de impact op het milieu, maar ook van maatschappelijke verantwoordelijkheid en maatschappelijke acceptatie. Naast dat het belangrijk is om te onderzoeken of en hoe retrofit doelen voor efficiëntie (Profit) en duurzaamheid (Planet) zorgen, is het ook belangrijk om te onderzoeken of en in welke mate

ze door **burgers en consumenten**<sup>4</sup> in sociaal opzicht op prijs gesteld worden of als sociaal en moreel verantwoord beschouwd worden (People).

Dit maatschappelijke perspectief op de bio-economie is nog niet gebruikelijk en kan gemakkelijk als vergezocht worden beschouwd ("Wat heeft het grote publiek te maken met retrofits in bio-energie-installaties?"). De volgende paragrafen geven echter verschillende argumenten en overwegingen die laten zien dat consumenten belangrijk zijn voor verdere ontwikkeling van de opkomende bio-economie en het retrofitten ervan.

### 2.2.1 *Belang van consumenten in de bio-economie*

Diverse argumenten zijn belangrijk bij het bepleiten van het belang van consumptie en consumenten bij het vergroenen van de economie.

We leven in een consumptiemaatschappij die wordt gekenmerkt door het economische, sociale en culturele belang van consumptie. Economische groei en welvaart zijn sterk afhankelijk van **consumptieniveaus**. Het sociaal-culturele belang van consumptie uit zich in de identiteit en symbolische waarde van consumptiegoederen van hedendaagse mensen: "Je bent wat je koopt". Gezien de centrale rol van consumptie in de huidige samenleving, zou men zichzelf buiten de realiteit kunnen plaatsen wanneer consumptie wordt verwaarloosd. Dus, om een bio-economie te laten gedijen, kan de ondersteunende consumentenbetrokkenheid beter niet genegeerd worden. Als gevolg van publieke acceptatie en legitimiteit, bieden consumenten en de maatschappij aan bedrijven een exploitatievergunning ('licence to operate'). De groeiende aandacht van bedrijven voor **maatschappelijk verantwoord ondernemen** (MVO), het aanpakken van maatschappelijke uitdagingen, en de erkenning in zakelijke kringen dat maatschappelijke ondersteuning cruciaal is voor economische levensvatbaarheid, zijn misschien nog relevanter in het geval van het opbouwen van een onconventionele bio-economie die als doel heeft de bekende fossiele economie te vervangen. Het creëren van een alternatief voor het conventionele, impliceert confrontatie en weerstand, want transitie is nooit eenvoudig. Een focus op de positie van consumenten en de wegen die ze kiezen in de transitie naar de bio-economie is daarom van toegevoegde waarde voor het begrip van de onderliggende sociale basis. Consumentenbetrokkenheid kan werken als een katalysator of een barrière voor de vergroening van de economie en het retrofitten van bio-energie als onderdeel van deze transitie.

Een ander argument, om de voorkeuren en prioriteiten van consumenten niet uit het oog te verliezen, is het idee dat transitie niet alleen een kwestie is van technologische innovatie, maar ook van maatschappelijke betrokkenheid en veranderingen in menselijk gedrag.

Vainio et al. (2019) splitst het item 'aard van verandering' in **technologische verandering** enerzijds en **levensstijlverandering** anderzijds. Technologische en levensstijlveranderingen zijn niet noodzakelijk tegengesteld en hangen vaak samen. Het onderscheid tussen deze twee maakt het echter duidelijker wat burgers-consumenten denken dat ze zelf kunnen doen en wat de overgang naar bio-economie kan betekenen in de zin van technologische mogelijkheden en gevolgen. Dit biedt inspiratie voor het idee dat consumentgericht onderzoek zinvol is als

---

<sup>4</sup> In dit hoofdstuk gebruiken we in de eerste plaats het woord **consument** en af en toe gebruiken we het door elkaar met de burger-consument. Het begrip consument is hier bedoeld als synoniem voor burger of algemeen publiek. We realiseren ons dat de termen consument en burger vaak worden geïnterpreteerd als een binair paar en worden gedefinieerd in termen van verschillende gedragsmotieven en -doelen - consumenten worden afgeschilderd als meer individualistisch en korte termijn gericht, terwijl prototypische burgers worden gepresenteerd als meer collectivistisch van aard en rekening houdend met mogelijke gevolgen op lange termijn van hun gedragskeuzes. Burger-consument wordt in de wetenschappelijke literatuur gebruikt om deze tweedeling te nuanceren of te neutraliseren. We gaan in dit hoofdstuk niet in op deze zaken, maar merken alleen op dat wanneer we gebruik maken van consumentenbetrokkenheid men vrij is om burger- of publieksbetrokkenheid te lezen.

het gaat om de overgang naar de bio-economie. Het helpt om de transitie van de bio-economie breder te bekijken en te beseffen dat het niet alleen een kwestie is van het nemen van efficiëntiematregelen, maar uiteindelijk een positief effect dient te hebben op de vergroening van het productie-consumptiesysteem in het algemeen. Dus nemen burgers en consumenten deel aan dit proces, hebben er meningen en visies over en zijn belangrijke belanghebbenden bij het bieden van de nodige legitimiteit en ondersteuning aan de bio-economie.

Hoewel deze zienswijze de laatste tijd meer geaccepteerd wordt, is het nog steeds niet gebruikelijk in verhandelingen over bio-economie en circulaire economie om zich te concentreren op **consumentengedrag** en betrokkenheid. Discussies zijn vooral technologie gedreven en gericht op technologische innovaties. De transitie van de fossiele economie naar een duurzamere economie wordt in de eerste plaats benaderd als een kwestie van verbetering van productie- en/of logistieke processen. De laatste tijd is er echter onder academici en beleidsmakers een beweging gaande die ziet dat consumenten ook deel uitmaken van deze transitie. Consumenten worden gezien in het licht van de sociale basis om de economie groener te maken of vanwege hun koopkracht om 'groene' producten te kopen. Gewoonlijk worden consumenten beschouwd als vrij passieve actoren, en niet als proactieve veranderaars. Kortom, consumenten worden steeds vaker verondersteld een rol te spelen, maar het blijft vaak onduidelijk wat hun bijdrage aan het transitieproces eigenlijk is of zou kunnen zijn (zie ook Kirchherr et al., 2017). Dit betekent niet dat de recente pogingen om consumenten en hun consumptie te integreren in, met name, de circulaire economie, worden verwaarloosd (Sijtsema et al., 2020).

## 2.2.2 Consumentenpercepties en segmentatie

In recente consumentenstudies op het gebied van bio-economie wordt geconcludeerd dat de **perceptie van consumenten** over deze economie en verschillende concrete biobased consumentengoederen in het algemeen niet duidelijk, ondubbelzinnig noch stabiel zijn (Onwezen et al., 2017; Pfau et al., 2017; Sijtsema et al., 2016). Zulke onderzoeken suggereren dat veel consumenten onbekend zijn met bio-economie, deze verkeerd begrijpen of er vage gedachten over hebben. Al met al geeft onderzoek tot nu toe aan dat er een kloof bestaat tussen de perceptie van de consument en de ontwikkeling van de bio-economie. In dit opzicht lijkt er niet veel te zijn veranderd sinds een eerdere studie die wees op "gebrek aan kennis en voldoende informatiestroom samen met onvoldoende perceptie en acceptatie 'als belangrijkste niet-technische uitdagingen in het biobased domein (Rösch & Kaltschmitt, 1999: 347). Gezien de huidige situatie waarin de bio-economie geen belangrijk aandachtspunt van de consument lijkt te zijn, zijn informatie en bewustwording nog steeds voorwaarden voor het creëren van consumentenbetrokkenheid. Informatie en betrokkenheid zijn noodzakelijke springplanken voor consumenten om mogelijk daadwerkelijke actoren van de bio-economie te worden.

Verwacht wordt dat consumenten verschillen in hun betrokkenheid en enthousiasme om de vergroening van de economie te ondersteunen. Mensen zijn vaak terughoudend tegenover veranderingen en geven de voorkeur aan dingen zoals ze nu zijn (zie bijvoorbeeld Kahneman & Tversky, 1979 of Samuelson & Zeckhauser, 1988 voor eerdere studies). Deze zogenaamde **status quo bias** (voorkeur voor de huidige stand van zaken) is begrijpelijk genoeg wanneer men zich realiseert dat veranderingen meer onzekerheden, onvoorspelbaarheid, risico's, kosten en inspanningen kunnen geven.

In tegenstelling tot deze natuurlijke negatieve perceptie, kunnen veranderingen ook gerelateerd zijn aan **positieve percepties** zoals aantrekkelijkheid, opwinding, verbetering en waarde. Consumenten zijn ook nieuwsgierig naar nieuwigheden en geloven in vooruitgang. In dit opzicht zijn de categorieën 'adopters' van Rogers (1962) nog steeds leerzaam. Er werden vijf categorieën onderscheiden, variërend van innovators en early adopters tot early majority, late majority, en tot slot laggards. Innovators staan open voor innovaties. Innovators en early adopters zijn bereid en in staat om met onzekerheden om te gaan en de risico's te nemen die gepaard gaan met innovaties. In tegenstelling tot deze vernieuwende leiders, is de

betrokkenheid en ondersteuning van de late majority en de laggards bij innovaties laag en traag. Een verder onderscheid kan worden gemaakt tussen aangeboren innovativiteit en domeinspecifieke innovativiteit. Aangeboren innovativiteit kan gedefinieerd worden als een persoonlijkheidskenmerk dat de aangeboren neiging van een individu om nieuwe ervaringen op te zoeken weerspiegelt (Hirschman, 1980). Domeinspecifieke innovativiteit is de aanleg van een individu voor bepaalde domeinen van interesse en weerspiegelt de neiging om snel nieuwe producten of ideeën uit dit domein over te nemen (Bartels & Reinders, 2011; Goldsmith & Hofacker, 1991). Domeinspecifieke innovativiteit hangt vaak nauw samen met betrokkenheid bij en kennis over een bepaald productdomein. Sommige mensen zijn bijvoorbeeld erg geïnteresseerd in technologische gadgets, terwijl anderen interesse tonen in voedsel, auto's of huishoudelijke apparaten, om maar een paar voorbeelden te noemen.

Beide neigingen kunnen worden beschouwd als twee fundamentele menselijke neigingen: **neofobie** (de angst voor nieuwheid) en **neofilie** (de drang naar nieuwheid). Hierdoor wisselen mensen acceptatie en vermijding van innovaties af. Een dergelijke afwisseling kan ambivalente gevoelens veroorzaken, die bijvoorbeeld de gevoeligheid van mensen voor de waargenomen risico's of onnatuurlijkheid van innovatieve productieprocessen beïnvloeden of hun intentie beïnvloeden om producten te kopen en consumeren, die worden geproduceerd door technologie-gedreven innovaties. Dit verwijst direct naar een ander aspect van de meningen en reacties van consumenten op innovaties.

Naast neofobe terughoudendheid en neofiele ontvankelijkheid voor innovaties, zou het relevant kunnen zijn om een onderscheid te maken tussen **innovatieve productieprocessen** en **innovatie geïntegreerd in nieuwe consumptiegoederen**. Dit laatste zal over het algemeen concreter zijn voor consumenten en geeft hun de mogelijkheid om deze producten te kopen en te gebruiken. Innovaties met betrekking tot productieproces technologieën zullen over het algemeen abstracter zijn voor consumenten en/of geeft ze de indruk dat de rol die ze zouden kunnen spelen minder invloedrijk is. Met betrekking tot consumentenbetrokkenheid en acceptatie van retrofitten lijkt het belangrijk om dit verschil ook in gedachten te houden. Retrofitten betreft immers vooral innovatie van productieprocessen in plaats van consumentenproducten. In principe vervreemdt dit consumenten van retrofit initiatieven.

Het hogere doel van retrofitten is duurzaamheid en daarom moet de betrokkenheid van de consument worden gezien vanuit het oogpunt van **duurzame consumptie**. Dit bloeiende onderzoeksgebied heeft geleid tot voldoende bewijs dat de keuze van de consument niet alleen wordt aangedreven door egocentrische, prijsbewuste of op comfort gerichte motieven, maar dat consumenten zich vaak bewust zijn van mogelijke schadelijke gevolgen van hun gedragskeuzes, rekening houdend met bewuste milieu- en maatschappelijke problemen, en dan proberen een "groene" consumptiestijl aan te nemen.

De betrokkenheid van consumenten bij duurzaamheid is niet uniform; verschillende consumentsegmenten kunnen worden onderscheiden. Een voorbeeld is de milieu segmentatiestudie van Defra (2008); die onderscheidde zeven segmenten met verschillende opvattingen over milieukwesties en gedrag ten opzichte van het milieu. De segmenten hebben betrekking op 'Positieve greens' en 'Concerned consumers' aan de "groene" kant en 'Cautious participants' of 'Honestly disengaged' aan de lage potentiële en onwillige "niet-groene" kant van het spectrum.

### 2.2.3 Onderzoek naar de rol van consumenten bij retrofitten

In deze paragraaf wordt beschreven hoe de belangstelling van consumenten, en de ondersteuning voor het groener worden van de economie, en meer specifiek, voor inspanningen voor de aanpassing van bio-energie, kunnen worden onderzocht. De aanpak is gebaseerd op de voorkeuren en prioriteiten van consumenten op het gebied van duurzaamheid, technologische innovatie en de verantwoordelijkheid van de industrie voor het groener maken van de economie. Het is belangrijk om te onderzoeken wat consumenten persoonlijk belangrijk en waardevol vinden (Hoe "groen" zijn consumenten zelf?). En wat

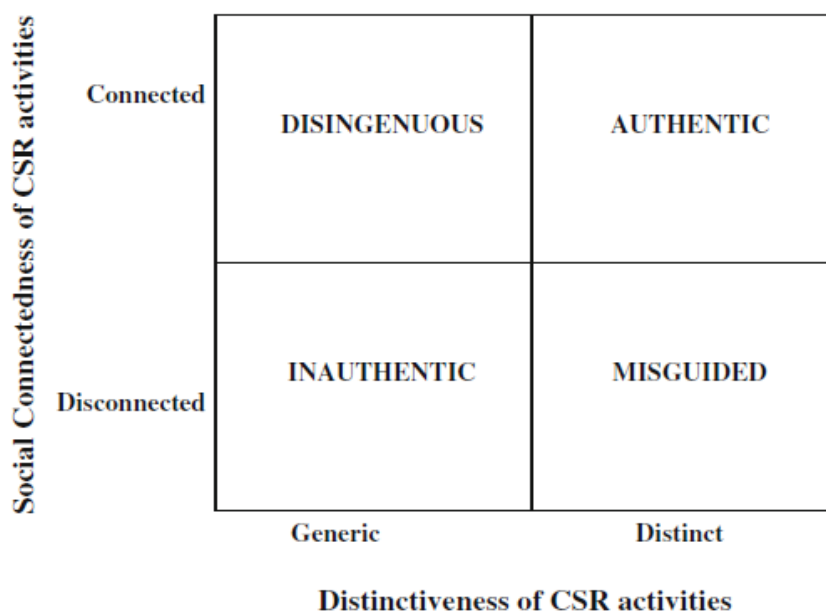


consumenten van producenten verwachten te doen, en of ze vertrouwen op het beleid van bedrijven met betrekking tot maatschappelijk verantwoord ondernemen (Hoe verantwoordelijk en betrouwbaar willen consumenten dat bedrijven zijn om de economie groener te maken?).

Goedkeuring en aanvaarding van de consument kan worden onderzocht door het beoordelen van het vertrouwen en wantrouwen van de consument en hun perceptie in de richting van “**greenwashing**” van een bedrijf (Cho, 2006; Leonidou & Skarmeas, 2017). Consumenten kunnen worden gevraagd te reageren op verklaringen als:

- Bedrijven misleiden (met woorden of beeldmateriaal) de milieukeurmerken van hun productiepraktijken of eindproducten.
- Bedrijven leveren vage of schijnbaar onbewijsbare milieucclaims voor hun productiemethoden.
- Bedrijven overdrijven milieukeurmerken van hun productieprocessen.
- Bedrijven laten belangrijke informatie over de echte milieukeurmerken van hun productieprocessen achterwege of verbergen deze.
- Bedrijven promoten zowel de voordelen voor de consument als die van zichzelf.
- Bedrijven handelen op verantwoorde en betrouwbare manieren.

Dit kan verder worden onderzocht met behulp van het kader van Mazutis & Slawinski (2015) waarin de twee dimensies van authenticiteit van MVO-activiteiten, onderscheidend vermogen en sociale verbondenheid, zijn gedefinieerd (Figuur 2). Het werk beschrijft de percepties van stakeholders over MVO.



**Figuur 2: Percepties van authenticiteit van MVO-inspanningen (Mazutis en Slawinski, 2015: 144)**

Hoewel deze conceptvorming in het algemeen is ontwikkeld voor MVO-inspanningen, kan het nuttig zijn om deze te gebruiken in het specifieke geval van het retrofitten van bio-energie. Voor **publieke acceptatie** en consumentenbetrokkenheid lijkt het van groot belang te zijn of een branche al dan niet duidelijk **communiceert** - en in de praktijk bewijst - dat hun retrofit activiteiten deel uitmaken van de maatschappelijke verantwoordelijkheid van een branche en het eigen bedrijfsbelang overstijgt. Aan de andere kant is het makkelijk voor te stellen dat sympathie en ondersteuning van de consument, voor bijvoorbeeld het retrofitten van de industrie, wordt vergemakkelijkt door een bedrijfsstrategie die expliciet is over zijn inzet en verbondenheid om te helpen bij het oplossen van maatschappelijke uitdagingen. Vanuit dit

perspectief wordt een industrie als waarachtiger ervaren als sociale verantwoordelijkheid van bedrijven deel uitmaakt van de identiteit van een bedrijf en tot uitdrukking komt in zakelijke beslissingen (authentic). Bio-energie retrofit initiatieven zonder openbare communicatie kunnen leiden tot cynisme en achterdocht bij consumenten (disingenuous). Bedrijfsactiviteiten die in de sociale context niet eerlijk, rechtvaardig, transparant of duurzaam zijn, worden als oneerlijk beschouwd als ze behoren tot de kernwaarden en het doel van een bedrijf (misguided). Een bedrijf dat zich expliciet associeert met MVO, zonder dit serieus te nemen in de bedrijfspraktijk, afgezien van het nemen van geïsoleerde beslissingen om zijn reputatie of "filantropische aard" te beschermen, zal door consumenten negatief worden beoordeeld in termen van greenwashing (inauthentic).

De perceptie van consumenten hangt ook af van de **anonymiteit** versus **bekendheid** van een bedrijf die omschakelt naar bio-energie. Consumenten die in de buurt wonen en die misschien zelfs economisch afhankelijk zijn van een industriële fabriek waarin een bio-energie retrofit is geïmplementeerd, kunnen anders reageren dan degenen voor wie retrofitten abstract en een ver fenomeen is. Bovendien hangt de perceptie van consumenten af van de vraag of en in hoeverre de percepties en prioriteiten van consumenten verschillen tussen de verschillende betrokken bedrijfstakken. Hebben consumenten bijvoorbeeld hogere verwachtingen als het gaat om de pulp- en papierindustrie, of zijn ze van mening dat bijvoorbeeld fossiele raffinaderijen de plicht hebben het voortouw te nemen bij het vergroenen van de economie?

### **2.3 Motivatie voor retrofitten**

De motivatie van bedrijven om te investeren in een retrofit kan divers zijn. Industrieën moeten aan de wetgeving voldoen en moeten economisch rendabel zijn of in ieder geval geen verliezen maken. Overheidsbedrijven mogen soms geen winst maken, terwijl particuliere bedrijven meestal winst willen maken die wordt verdeeld tussen de eigenaren van het bedrijf of die opnieuw worden geïnvesteerd om het bedrijf te laten groeien.

Bovendien kunnen de volgende strategische doelen belangrijk zijn voor bedrijfsbeslissingen om een bio-energie retrofit aan te brengen:

- Marktgroei op lange termijn
- Technologisch leiderschap
- Winstgevendheid op korte termijn
- Financieel rendement voor eigenaren
- Beveiliging van lokale toevoer van grondstoffen
- Milieukwesties

#### *2.3.1 Naleving van de wetgeving*

Aangezien bedrijven aan wetgeving moeten voldoen, kan elke wettelijke maatregel een krachtig hulpmiddel zijn om industrieën te motiveren om een bio-energie retrofit uit te voeren. **In enquêtes werd wetgeving zelfs genoemd als de belangrijkste reden voor retrofitten** (Nuhoff-Isakhanyan et al., 2019). Juridische aspecten voor bio-energie retrofitten worden beschreven in het BIOFIT-rapport "Framework conditions for retrofitting Europe's industry with bioenergy" (Rutz et al., 2019).

Als geen rekening wordt gehouden met **externe effecten**, is het gebruik van fossiele brandstoffen meestal erg goedkoop. Tot op heden werd fossiele energie vaak ondersteund, hetzij direct, hetzij indirect door de externe effecten te verwaarlozen. Overheden hebben het, over het algemeen, voor het zeggen met betrekking tot de opname van externe effecten in de uiteindelijke beprijzing van industriële diensten en producten. Zo zouden ze passende wetgeving kunnen vaststellen die fossiele energie verbiedt, of externe kosten expliciet maakt,

bijvoorbeeld door CO<sub>2</sub>-belastingen in te gaan voeren. Of ze zouden wetgeving kunnen vaststellen voor de ondersteuning van hernieuwbare energie. Met het klimaatakkoord van Parijs hebben verschillende regeringen in Europa onlangs dergelijke wetgeving ontwikkeld om stapsgewijs over te gaan naar een koolstofneutrale economie. Er wordt breed erkend dat belangrijke stappen in de richting van meer duurzaamheid meestal gepaard gaan met de invoering van geschikte wetgeving.

Een concreet voorbeeld voor een geschikt wetgevingsinstrument het belasten van **CO<sub>2</sub>-emissies**. Vanwege de lagere emissies kunnen de prijzen van biomassa lager zijn dan die van steenkool. Een ander voorbeeld is het stapsgewijs verbieden van het gebruik van fossiele brandstoffen, zoals het uifaseren van het gebruik van steenkool voor energie. Diverse landen in Europa – waaronder Nederland – hebben deze stap inmiddels gezet.

### 2.3.2 *Economische kwesties*

**Directe economische voordelen** kunnen een belangrijke motivatie zijn voor bio-energie retrofits. Dit is het geval als de kapitaaluitgaven (CApital EXpenditure, of CAPEX) voor de technologie en de operationele uitgaven (OPerational EXpenditure, of OPEX) voor het gebruik van biomassa goedkoper zijn dan het gebruik van de bestaande technologie gedurende de hele levensduur ervan. Deze economische voordelen kunnen het gevolg zijn van een verhoogde efficiëntie van nieuwe apparatuur of van lagere grondstofprijzen.

Een barrière tegen bio-energie retrofits is de relatief **hoge CAPEX** van de installaties in vergelijking met fossiele technologieën. Dit kan worden beperkt door stimulansen van de overheid.

De OPEX is afhankelijk van de prijzen van fossiele en hernieuwbare grondstoffen, welke moeilijk te voorspellen zijn. In een onderzoek (Nuhoff-Isakhanyan et al., 2019) hebben verschillende stakeholders opgemerkt dat de lagere belasting op biomassa in vergelijking met die op steenkool de mogelijkheid bood om de retrofit uit te voeren. In de studie werd zelfs vermeld dat sommige projecten zonder een CO<sub>2</sub>-belasting niet haalbaar zouden zijn.

**Indirecte economische voordelen** houden verband met de toegenomen vraag naar duurzame producten of een beter imago van de industrie door het gebruik van hernieuwbare energiebronnen. Daarom is het belangrijk om alleen retrofits met grote milieuverbeteringen te gebruiken voor marketingdoeleinden, omdat het anders als "greenwashing" zou kunnen worden beschouwd, wat de tegenovergestelde impact zou hebben en een negatief zou afstralen op een industrie of branche.

### 2.3.3 *Risicobeperkende strategieën*

Elke technische verandering brengt extra risico's met zich mee, maar kan ook risico's verminderen. De volgende lijst beschrijft enkele risico's waarmee rekening gehouden kan worden bij retrofit projecten:

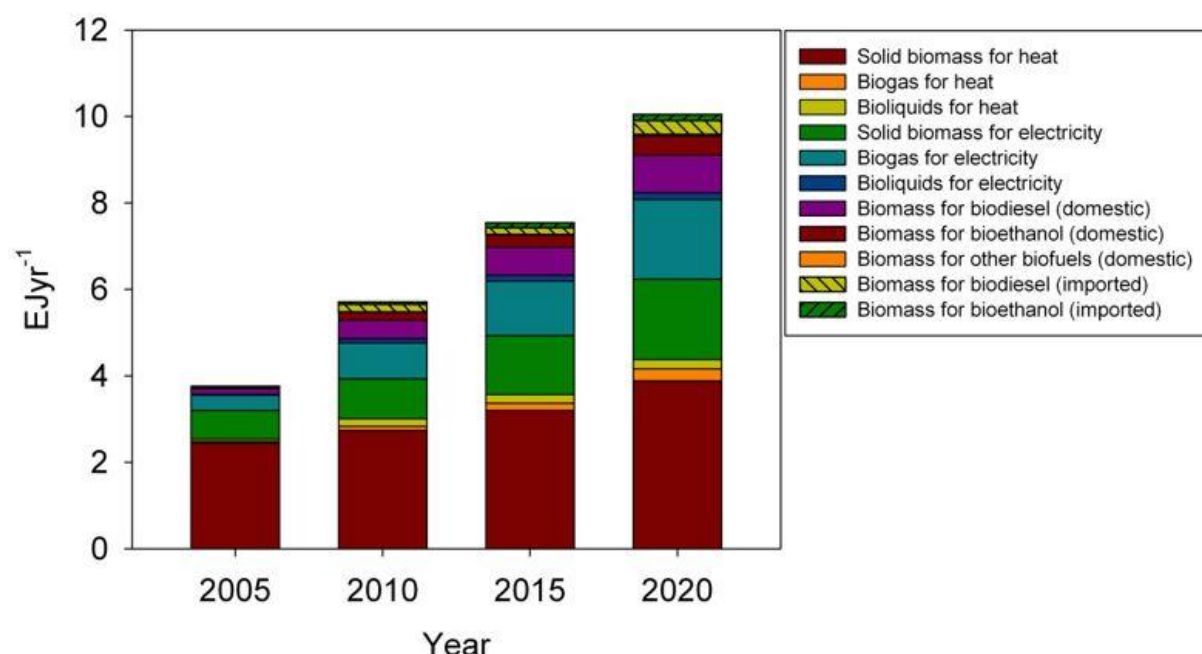
- **Fluctuerende prijzen voor biomassa:** Hoe meer biomassa wordt gebruikt voor bio-energiedoeleinden, des te groter is de concurrentie om de (schaarse) biomassa. Dit zou de prijzen voor biomassa kunnen verhogen. Aan de andere kant, hoe meer biomassa wordt gebruikt, hoe beter de logistieke infrastructuur zal worden, wat kan leiden tot lagere prijzen.
- **Variatie in prijzen voor fossiele energiebronnen:** Prijzen van fossiele energiebronnen (olie, gas, steenkool) dalen door het gebruik ervan. Verwacht wordt dat de prijzen op de lange termijn zullen stijgen, maar met de ontdekking van nieuwe reserves kunnen de korte termijn prijzen stagneren of zelfs dalen.
- **Zekeren van biomassa aanvoer:** De levering van biomassa toevoer moet zoveel mogelijk met langlopende contracten worden gewaarborgd.

- **Zekerheid van fossiele energievoorziening:** Uitputting van fossiele reserves kan het bevoorradingsrisico van fossiele brandstoffen vergroten.
- **Gevoeligheid en betrouwbaarheid van technologie:** Biomassa technologieën kunnen net zo betrouwbaar zijn als fossiele technologieën, maar dit is afhankelijk van de technologie zelf en moet voor elke technologie afzonderlijk worden beoordeeld.
- **Back-up apparatuur:** Voor energie-installaties kunnen back-upsystemen nodig zijn om het risico van defecten te verminderen.
- **Veranderingen in veiligheid:** Veiligheidsproblemen moeten een hoge prioriteit krijgen bij elke retrofit. Afhankelijk van de vervangen technologie en van de nieuwe biomassa technologie kunnen veiligheidsrisico's (bijvoorbeeld explosiegevaar) toenemen of afnemen.
- **Afhankelijkheden van andere industrieën:** Afhankelijkheden van andere bedrijven in de waardeketen kunnen verschillende risico's met zich meebrengen.
- **Overweging van niet-grondstof gebaseerde andere hernieuwbare energiebronnen:** Elke andere technologie voor hernieuwbare energie die niet afhankelijk is van materialen als input, zoals thermische zonne-energie, fotovoltaïsche energie, windenergie of omgevingsenergie, moet worden overwogen als aanvulling op biomassa technologieën.
- **Veranderend beleid:** Beleid verandert momenteel meer in het voordeel van hernieuwbare energiebronnen in vergelijking met fossiele brandstoffen. In het algemeen is retrofitten van industrieën met biomassa momenteel dus een maatregel om het risico van beleidswijzigingen te verminderen.

### 3 Biomassa beschikbaarheid

#### 3.1 Biomassapotentieel

In de EU28 is de **landbouw** de grootste toeleveringssector voor biomassa<sup>5</sup>, met een wegingsfactor van ongeveer 65% (van 13% in Finland tot 90% in Griekenland, Malta, Hongarije en Cyprus), gevolgd door bosbouw met 34% (van 8% in Malta tot 87% in Finland). Het relatieve biomassa gewicht van de **visserijsector** is vrij klein (minder dan 1%). In de landbouw vertegenwoordigen gewassen bijna 62% van de biomassavoorziening, waarbij de verzamelde gewasresten (23%) en begraasde biomassa (15%) een hogere dichtheid hebben, maar een bescheiden volume. De belangrijkste bron van **biomassa uit bossen** is primaire houtachtige biomassa welke bijna 70% van het totaal uitmaakt (Gurría et al. 2017). Een schatting van de vraag naar biomassa voor energie in de EU27-landen wordt gegeven door Scott Bentsen & Felby (2012) in Figuur 3.



**Figuur 3: Geschatte vraag naar biomassa voor energie in de EU27-landen (Scott Bentsen & Felby, 2012)**

Het totale aanbod van Europese **landbouwbiomassa** bedraagt ongeveer 765 miljoen ton (droge basis), als volgt verdeeld (Gurría et al.2017):

- De geogste productie van gewassen wordt geschat op 478 miljoen ton droge stof ( $t_{ds}$ ) biomassa in de EU-28 in 2013 (d.w.z. ongeveer 2 miljard ton verse biomassa).
- Verzamelde gewasresten zorgen voor 100 miljoen  $t_{ds}$  extra biomassa.
- 19 miljoen ton biomassa wordt gewonnen uit begraasde weilanden.
- Ongeveer 10 miljoen extra ton droge stof van gewasresten kunnen verzameld worden zonder de productie van ecosysteemdiensten te belemmeren, zoals behoud van koolstof in de bodem, behoud van vruchtbaarheid, waterretentie, etc.

<sup>5</sup> met inbegrip van biomassa voor levensmiddelen, diervoeder, producten en energie

- Er wordt ongeveer 67 miljoen t<sub>ds</sub> aan plantaardige biomassa-equivalenten geïmporteerd, 53% in de vorm van plantaardige producten (onbewerkt), 25% in de vorm van voedingsproducten en de rest in de vorm van biomateriaalproducten (ca. 22%).

In de landbouw zijn de belangrijkste bronnen van primaire residuen afkomstig van akkerbouwgewassen zoals stro en van het onderhoud van vaste plantages zoals fruit- en bessenbomen, noten, olijven, wijngaarden en Citrus. **Stro**, als bijproduct van graanproductie, is een potentiële grondstof voor energieproductie. Stro wordt meestal als meststof op het veld achtergelaten of, in het kader van een circulaire economie, als strooisel en vervolgens als meststof gebruikt. Het stro op het veld achterlaten biedt vele voordelen, zoals de toevoer van voedingsstoffen en humusvorming. Maar wanneer tarwe wordt gevolgd door koolzaad, kan de oogst van stro nuttig zijn, omdat minder plantmateriaal op het veld achterblijft om te rotten. Er moet dus per geval worden beslist of het gebruik van stro zinvol is. Bovendien kan de nutriëntenbalans worden verbeterd door de recirculatie van stro of bemesting met houtas, als dit wettelijk is toegestaan (bijvoorbeeld in Zweden).



**Figuur 4: Korte-omloop hakhout van populieren (Bron: Rutz D.)**


Bovendien zouden **Korte-omloop hakhout** (SRC) (Figuur 4) en energiegewassen een veelbelovende grondstof kunnen zijn voor de productie van bio-energie. Het beheer van SRC op akkerbouw is een extensieve vorm van landgebruik vanwege de lage vraag naar kunstmest en bestrijdingsmiddelen in vergelijking met andere gewassen. Snelgroeiende boomsoorten (wilgen, populieren, Paulowna, Robinia, etc.), kunnen worden gebruikt als energiegewas in meerjarige oogstcycli. De omlooptijd (periode van de oogstcycli) is afhankelijk van de plantgroep, de gebruiksintensiteit, het beoogde gebruik van de grondstof en de gegeven locatieomstandigheden. Als de bomen oogstklaar zijn (na twee tot acht jaar) worden ze gekapt, gechipt en vervoerd. Sommige soorten zouden ook op marginale gronden kunnen worden gebruikt, bijvoorbeeld voor de herontwikkeling van voormalige kolenmijnen. Zo is Robinia

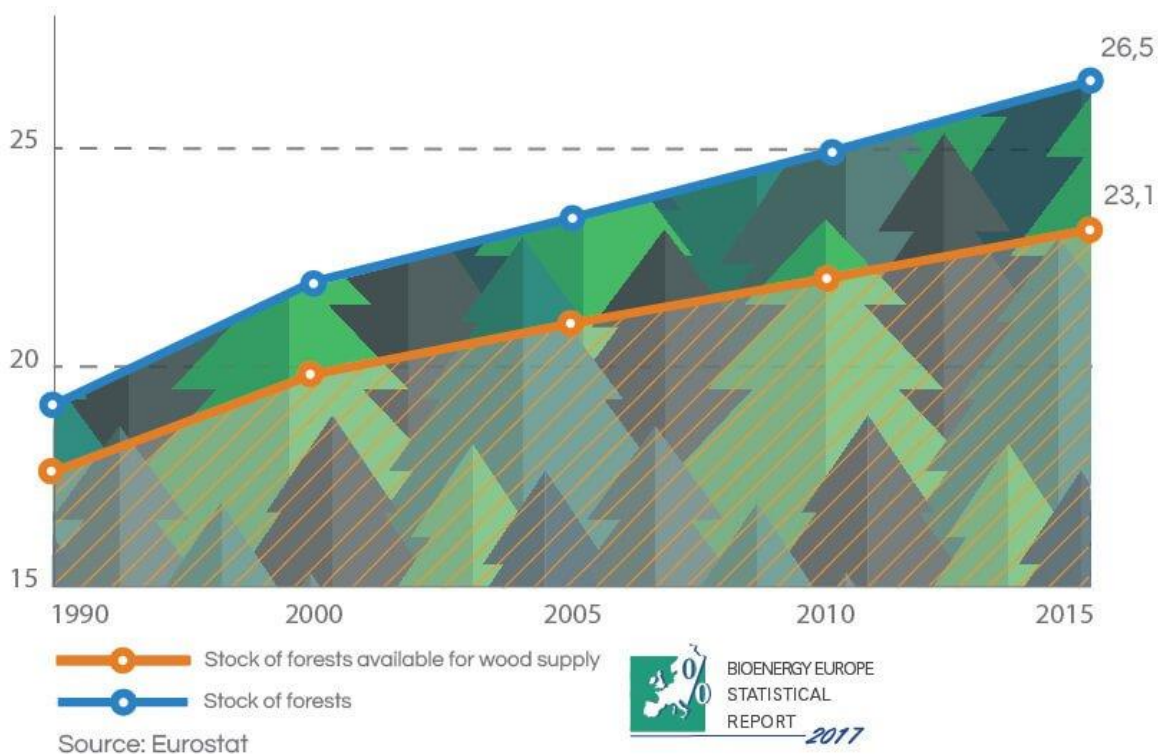
(*Robinia pseudoacacia*) een zeer geschikte boomsoort voor droge gronden met een laag koolstofgehalte.

**Speciale energiegewassen**, zoals Miscanthus, hebben een zeer lage bemestingsbehoefte. Hun teelt en oogst kunnen vergelijkbaar zijn met andere landbouwgewassen. Het gebied dat momenteel wordt bebouwd met meerjarige energiegewassen in de EU28 is echter beperkt tot 117.401 ha en omvat voornamelijk populier, wilg en miscanthus (Bioenergy Europe, 2019).

De **biomassa uit bossen** in de EU28 wordt in totaal geschat op bijna 370 miljoen  $t_{ds}$ . De totale geschatte oogst uit het bos van primair hout in de EU28 bedraagt 252 miljoen  $t_{ds}$ , terwijl de netto-invoer van rondhout wordt geschat op ongeveer 6,8 miljoen  $t_{ds}$ . Oogst uit bossen bestond voor 78,6% uit industrieel rondhout en 21,4% uit brandhout. Brandhout bestaat naar schatting voor 33% uit stamhout en voor 67% uit andere houtbestanddelen (takken, toppen, onverkoopbare stammen). Naast de oogst van brandhout, omvat de totale hoeveelheid houtachtige biomassa die wordt gebruikt voor energie ook secundaire residuen van houtverwerking, black liquor (bijproduct van pulpfabrieken), geïmporteerde secundaire residuen en houtpellets, afvalhout en een deel van het pulphout dat geclassificeerd als industrieel rondhout. De netto-import van bij- en coproducten (incl. houtpellets) bedraagt ongeveer 8 miljoen ton droge stof, terwijl de netto-import van houtpulp 13 miljoen ton bedraagt (Gurría et al. 2017).

In 2015 bedraagt het **bosoppervlak** in de EU28 ongeveer 181 miljoen ha, wat overeenkomt met 42% van het totale landoppervlak. Dit komt ongeveer overeen met het landbouwoppervlak in de EU28. Het bosoppervlak dat beschikbaar is voor houtproductie bedraagt 134 miljoen hectare. De volgende zeven lidstaten van de EU28 hadden in 2015 ten minste de helft van hun landoppervlak bedekt met bos: Portugal, Spanje, Letland, Estland, Slovenië, Zweden en Finland. In de afgelopen decennia is het bosoppervlak in de EU28 toegenomen: tussen 1990 en 2015 is het bosoppervlak met 5,2% toegenomen. Dit blijkt ook uit de volumestijging van de bosvoorraad in Figuur 5. Gemiddeld wordt slechts ongeveer 63% van de jaarlijkse bijgroei gebruikt (Bioenergy Europe, 2019).

 **EU-28 evolution of forest stock and stock available for wood supply**  
(From 1990 to 2015, billion of m<sup>3</sup>)



**Figuur 5: EU-28 verandering van beschikbare bosvoorraad voor houtvoorziening (Bron: Bioenergy Europe, 2017)**

De **eigendomsstructuur** van het bosgebied verschilt per land. De bossen van de EU28 zijn eigendom van kleine familiebedrijven en particulieren, de staat, en grote landgoederen die eigendom zijn van bedrijven. In totaal was ongeveer 60% van de bossen van de EU28 in 2010 in particulier bezit. Dit percentage is het hoogste (98,4%) in Portugal en het laagste in Bulgarije (13,2%) (Bioenergy Europe, 2019).

Hout afkomstig uit bossen is goed voor ongeveer 38% van de vaste biomassa die wordt gebruikt voor energieproductie in de EU28. Bovendien levert de houtindustrie (industriële bijproducten en pellets) meer dan 50% van de vaste biomassa die wordt gebruikt voor bio-energie (Bioenergy Europe, 2019). De houtachtige biomassavoorziening vanuit de bosbouw is afhankelijk van de economische marktsituatie. Bijvoorbeeld: hoe meer gezaagd hout er wordt geproduceerd, hoe meer bijproducten er beschikbaar zijn.

Bovendien is de **invoer van vaste biomassa-brandstoffen** de afgelopen tien jaar gestegen en bedraagt deze 8,5% van de totale productie van primaire energie uit vaste biobrandstoffen in 2016. Vooral pellets die worden gebruikt als brandstof in energiecentrales worden geïmporteerd van buiten de EU28, met name uit de Verenigde Staten, Canada en Rusland (Bioenergy Europe, 2019).

Er is een duidelijk **potentieel om het bosgebruik voor energiedoeleinden te vergroten** in de EU28, aangezien, zoals eerder vermeld, slechts 60-70% van de jaarlijkse bijgroei van EU-bossen wordt gekapt. Momenteel wordt ongeveer 42% van de oogst uiteindelijk gebruikt voor energie; residuen van verwerking met hogere waarde hebben een aanzienlijk aandeel.

De recente verwachting van de hoeveelheid realiseerbaar potentieel hout uit bossen in de EU28 is (675 miljoen kubieke meter (675 Mm<sup>3</sup>) beschikbaar per jaar, vooropgesteld dat houtmobilisatie krachtiger ter hand wordt genomen (Europese Commissie, 2019).



Diervoeders en voedsel zijn de belangrijkste categorieën in termen van **biomassagebruik**, goed voor ruim 60% van de totale biomassa. Bio-energie vertegenwoordigt ongeveer 19% van de totale biomassa in de EU-28. Het is echter belangrijk op te merken dat biogas en bio-elektriciteit hierin niet zijn meegenomen. Biomaterialen is de op twee na grootste groep (Gurría et al. 2017).

De biomassa die wordt gebruikt voor **diervoeders en voedselproducten** is bijna volledig van agrarische oorsprong. 71% van het totale aanbod aan biomassa in de landbouw (uitgedrukt in droge stof) wordt gebruikt als voedsel en diervoeders: 69% wordt gebruikt als diervoeders en strooisel om dierlijk voedsel te produceren, terwijl de rest rechtstreeks wordt geconsumeerd als plantaardig voedsel (Gurría et al. 2017).

De meeste biomassa die wordt gebruikt als **bio-energie** is afkomstig van bosproducten. In 2013 werd geschat dat 178,7 t<sub>ds</sub> hout werd gebruikt voor energie, welke direct of indirect afkomstig is uit het bos. Slechts 2% van het landbouwaanbod in de EU wordt verwerkt tot duurzame biobrandstoffen voor transport. De rest wordt gebruikt als biomateriaal of als afval. Het gebruik van biobrandstoffen in de EU-transportsector bedroeg in 2013 12,0 ktoe in termen van energie. Akkerbouwgewassen leverden de grootste bijdrage aan de transportsector geleverde biomassa, namelijk meer dan 90% in 2013. Op basis van de beschikbare gegevens wordt het volume van de binnenlandse, aan de transportsector geleverde akkerbouwgewassen geschat op 15 miljoen t<sub>ds</sub> in 2013. Duitsland was de belangrijkste leverancier met 12 miljoen t<sub>ds</sub> gevolgd door Slowakije (668 duizend t<sub>ds</sub>) en Roemenië (475 duizend t<sub>ds</sub>) (Gurría et al. 2017).

Bijna alle **biomaterialen** hebben hun oorsprong in bosbouwactiviteiten, met als grootste bestanddeel zaaghout en planken. In 2013 werd 189,9 miljoen ton droge stof uit hout gebruikt voor biomaterialen. De EU-28 is ook een netto-exporteur (14,3 miljoen t<sub>ds</sub>) van zaaghout, planken en producten daarvan.

Het Biomass Energy Europe (BEE)<sup>6</sup>project vergeleek meer dan 70 biomassapotentieelstudies. Geconcludeerd werd dat de schattingen in grote mate verschillen door verschillende definities van potentieel en door verschillende toegepaste methoden. Toch zijn de meeste studies het erover eens dat het **biomassapotentieel van bosbouw en afval in de loop van de tijd relatief stabiel is**. Een grotere onzekerheid komt bij de vraag, hoeveel biomassa voor energie zou de EU-landbouw kunnen leveren? Landbouw lijkt dus de sleutel te zijn voor een echte, grootschalige uitbreiding van de biomassavoorziening (Europese Commissie, 2019).

Schattingen voor het **potentieel van energiegewassen** variëren van 79 tot 377 Mtoe (3,3-15,8 EJ). Het werkelijke potentieel hangt af van het land dat in aanmerking komt voor productie, van de diversiteit van gewassen en de selectie van soorten, evenals van de intensiteit van landbouwbeheerpraktijken. Uitsluiting van natuurbeschermingsgebieden en gebieden belangrijk voor voedselzekerheid zijn ook overwogen (Faaij, 2018).

Het potentieel voor **landbouwresiduen** ligt tussen 45 en 67 Mtoe (1,9-2,8 EJ) en is afhankelijk van het type residu dat wordt gebruikt voor energie (alleen stro- en maïsstro of ook stekken en snoeiresten), de weersinvloeden en bodem-beschermende maatregelen (Faaij, 2018).

Met betrekking tot bosbiomassa lopen de schattingen – rekening houdend met actief duurzaam bosbeheer en een efficiënt gebruik van hulpbronnen van residuen van houtverwerkende industrieën - op tot 174 Mtoe (7,3 EJ) (Faaij, 2018).

De beschikbaarheid van **biologisch afbreekbaar afval** hangt sterk af van de manier waarop afvalbeheerpraktijken in de respectieve sectoren worden toegepast; het varieert van 40 tot 119 Mtoe (1,7-5 EJ) (Faaij, 2018).

---

<sup>6</sup> <http://www.eu-bee.eu/>

## 3.2 Biomassa verschijningsvormen

### Pellets

Een houtpellet, met of zonder additieven, bestaat uit geperst hout, normaal cilindrisch met gebroken uiteinden, met een lengte van typisch 5-40 mm en een diameter van maximaal 25 mm. Het vochtgehalte van houtpellets is normaal gesproken minder dan 10% en houtpellets hebben een asgehalte tot 3%. Pellets worden meestal geproduceerd in een pelletmolen.

De voordelen van pellets ten opzichte van hout of spaanders zijn onder andere: de mogelijkheid om de verbranding te optimaliseren vanwege de uniforme brandstof, de verlaagde transportkosten vanwege de verhoogde brandstof bulkdichtheid en de verbetering van thermische en verbrandingseigenschappen.

Veel pellets worden **gemaakt uit houtachtige biomassa**, zoals zaagsel, houtsnippers of bosresiduen, maar er zijn ook diverse andere grondstoffen die gepelletiseerd kunnen worden, zoals weergegeven in Figuur 6. Enkele voorbeelden zijn papierresiduen, biomassa uit afval, maïs, katoenzaad, hennep, Miscanthus, rietgras (kanariegras), stro, graan residuen, hooi etc.. De brandstofeigenschappen van pellets gemaakt van deze **alternatieve grondstoffen** verschillen van pellets gemaakt van houtachtige biomassa, welke doorgaans een lager asgehalte hebben. Bepaalde brandstofeigenschappen kunnen aangepast worden door verschillende grondstoffen in geschikte hoeveelheden met elkaar te mengen.

De internationale norm (ISO 17225-2: 2014 "Vaste biobrandstoffen - Brandstofspecificaties en klassen - Deel 2: Naar grootte gesorteerde houtpellets") definieert de kwaliteitsnormen van houtpellets. Er zijn drie verschillende classificaties voor pellets: A1, A2 en B. De verschillen zijn gerelateerd aan de gebruikte grondstoffen en hun kwaliteit. De meeste kleinschalige (bijv. binnenlandse) consumenten gebruiken A1-houtpellets, terwijl lagere kwaliteitsklassen worden gebruikt in grotere installaties, waaronder energiecentrales. Een andere internationale norm (ISO 17225-6: 2014 "Vaste biobrandstoffen - Brandstofspecificaties en klassen - Deel 6: Naar grootte gesorteerde niet-houten pellets") definieert kwaliteitsklassen voor **agrobiomassapellets**.

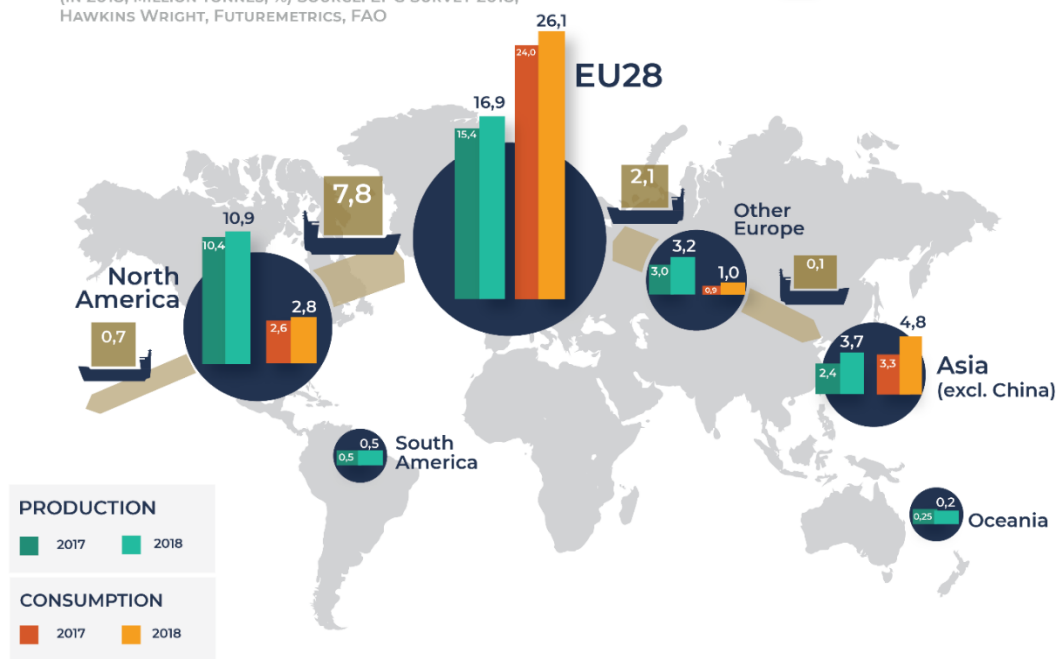
De EU-28 is zowel de grootste producent als consument van houtpellets ter wereld. De situatie verschilt per land. Italië, Duitsland en Frankrijk verbruiken voornamelijk houtpellets in de residentiële verwarmingsmarkt, Denemarken en Zweden in WKK-centrales, terwijl het Verenigd Koninkrijk, België en Nederland houtpellets vooral in omgebouwde kolencentrales verbruiken (zie paragraaf 7.6). Noord-Amerika (VS, Canada) is een netto-exporteur van houtpellets naar Europa, terwijl het ook interessant is om de stijgende vraag in Oost-Aziatische landen, zoals Japan en Zuid-Korea, op te merken.



Figuur 6: Voorbeelden van pellets gemaakt van verschillende materialen en processen (Bron: DBFZ)

## WORLD PELLET MAP AND TRADEFLOWS

(IN 2018, MILLION TONNES, %) SOURCE: EPC SURVEY 2018, HAWKINS WRIGHT, FUTUREMETRICS, FAO



Figuur 7: Internationale productie en handel van houtpellets (Bron: Bioenergy Europe)

### Houtsnippers en gehakseld hout

Om houtsnippers te produceren, moet houtachtige biomassa, voor verbranding, worden gehakt. Door het **versnipperen** zijn houtsnippers een relatief uniforme brandstof, die kan vloeien en automatisch in een ketel gebruikt kan worden. De gemiddelde afmeting van houtsnippers is 16-45 mm. Door de hoge verhouding oppervlakte/volume kunnen houtsnippers efficiënt worden verbrand. In vergelijking met hout hebben houtsnippers echter een lagere bulk-energie-dichtheid, wat leidt tot een grotere ruimtebehoefte tijdens transport en opslag. De kwaliteit van de houtsnippers is afhankelijk van de gebruikte grondstof en de versnipperaar.

**Gehakseld hout** is hout dat stukken van verschillende grootte en vorm heeft; in tegenstelling tot houtsnippers, wordt het gemaakt door het hout **hakselen** met bot gereedschap zoals rollen, hamers of klepels.

Met betrekking tot de grondstof kunnen houtsnippers worden onderverdeeld in de volgende groepen (ETIP Bioenergy, 2019):

- **Boschips** (geproduceerd uit boomstammen, hele bomen, houtresten of stronken)
- **Houtresten** (geproduceerd uit onbehandelde houtresten, gerecycled hout, restanten)
- **Zaagresten** (geproduceerd uit zagerijresten)
- **Bosbouwchips** met korte omlooptijd

Een reeds gepubliceerde norm (ISO 17225-4: 2014 "Vaste biobrandstoffen - Brandstofspectificaties en klassen - Deel 4: Naar grootte gesorteerde houten chips") omvat specificaties voor houtsnippers voor kleinschalige systemen (hoogwaardige brandstofeigenschappen), terwijl een norm die momenteel in ontwikkeling is (ISO 17225-9)

betrekking zal hebben op brandstofspecificaties en -klassen voor houtsnippers en gehakseld hout voor industrieel gebruik.



**Figuur 8: Links - hout uit het bos (Bron: Rutz D.), Rechts – gehakseld hout (hog fuel) uit olijfbom snoeihout (Bron: Karampinis E.)**

### Thermisch voorbehandelde biomassa

De term "thermisch voorbehandelde biomassa" kan worden gebruikt voor een andere reeks technologieën die erop gericht zijn de energiedichtheid van biomassa te verhogen en hydrofoob te maken. Het belangrijkste doel is om een **steenoolachtig materiaal** te produceren dat direct kan worden gebruikt om steenkool te vervangen in energietoepassingen.

De meest voorkomende technologieën die beschikbaar zijn voor het produceren van thermisch voorbehandelde biomassa zijn **torrefactie**, stoomexplosie en hydrothermische carbonisatie; verdere details staan in paragraaf 7.7 van dit handboek. Normaal ondergaat thermisch voorbehandelde biomassa een pelletiseringsstap om de energiedichtheid verder te verbeteren en het gelijkvormig maken van het eindproduct.

Er is een internationale technische specificatie (ISO/TS 17225-8:2016<sup>7</sup>) die de toepassing en specificatie van thermisch behandelde biomassapelleten definieert.

Ondanks de voordelen die thermisch voorbehandelde biomassapelleten kunnen bieden en het feit dat veel technologieontwikkelaars commerciële productie-installaties hebben opgezet, is de markt voor deze intermediaire bio- energiedragers nog niet geheel opgebouwd. Het Horizon 2020-project MUSIC (Market Uptake Support for Intermediate Bioenergy Carriers)<sup>8</sup> is bedoeld om de markt voor deze vernieuwde biomassafracties verder uit te breiden, samen met pyrolyse-olie en microbiële olie.

<sup>7</sup> DIN EN ISO 17225-8:2016 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 8: Graded thermally treated and densified biomass fuels

<sup>8</sup> [www.music-h2020.eu](http://www.music-h2020.eu)



**Figuur 9: Thermisch behandelde biomassapellets. Links: met stoom geëxplodeerde Arbacore-houtpellets (Bron: Arbaflame). Rechts: getorreficeerde houtpellets (Bron: Yilkins)**

### Bio-olie

Een aantal onderzoeks-, demonstratieprojecten en bedrijven ontwikkelen innovatieve processen om een breed scala aan biomassa (bosresten, gewasresten, oud papier en organisch afval) via pyrolyse/thermochemische conversie om te zetten in stabiele, geconcentreerde bio-olie (biocrude) of bio-slurry (olie met kool) die verenigbaar is met bestaande raffinagetechnologie en kan worden omgezet in geavanceerde biobrandstoffen (ETIP Bioenergy, 2019). Meer informatie over het pyrolyseproces is te vinden in Hoofdstuk 5.



**Figuur 10: Bio-olie, bioafval, strobalen (Bron: Rutz D.)**

### Bioafval

Bioafval wordt gedefinieerd als biologisch afbreekbaar tuin- en parkafval, voedsel- en keukenafval van huishoudens, restaurants, cateraars en winkelpanden, en vergelijkbaar afval van voedselverwerkende fabrieken. Hieronder vallen niet bos- of landbouwresten, mest, zuiveringsslib of ander biologisch afbreekbaar afval zoals natuurlijk textiel, papier of bewerkt hout. Het sluit ook de bijproducten van de voedselproductie uit die nooit afval worden (Europese Commissie, 2019c).

Eventuele organische resten/biologische afvalstoffen kunnen mogelijk worden omgezet in geavanceerde biobrandstoffen door thermochemische of (bio)chemische processen. Verwerkings- of productiefaciliteiten die biomassa omzetten in voedsel, bouwmaterialen, papier en andere bioproducten hanteren steeds vaker een 'bioraffinage-aanpak', waarbij de omzetting van grondstoffen en afvalstromen in waardevolle bijproducten, energie en biobrandstoffen wordt vergroot. Maar ook gemeentelijk vast afval kan worden omgezet in vloeibare en gasvormige biobrandstoffen voor de opwekking van warmte en elektriciteit of als transportbrandstof. Houtafval en bosresten zijn ook veelbelovende grondstoffen voor geavanceerde biobrandstoffen (ETIP Bioenergy, 2019).

## Hooibalen

Stro - als bijproduct van graanproductie - is een potentiële grondstof voor energieproductie. Stro wordt meestal als meststof op het veld achtergelaten of als strooisel gebruikt en vervolgens als meststof, in het kader van een circulaire economie. Zowel kwaliteitsborging als het minimaliseren van aanvoerkosten vereisen een optimalisatie van de gehele logistieke keten van het veld tot de opslag. Vanwege de omvang van het stro is de compactheid van bijzonder belang om de benodigde opslagruimte te verminderen (= strobalen). Bij normale compactiesystemen varieert het dichtheidsspectrum van 80 tot 160 kg m<sup>-3</sup>.



**Figuur 11: Strobaalaanvoersysteem voor een stadsverwarmingsnet in Denemarken (Bron: D. Rutz)**

## Plantaardige oliën

Oliegewassen vormen de basis voor de productie van biodiesel. In Europa is koolzaad de meest gebruikte grondstof voor de productie van biodiesel. Plantaardige olie wordt geproduceerd door persing of extractie uit oliehoudende zaden (koolzaad, zonnebloempitten, etc.), die zowel geraffineerd als ongeraffineerd kunnen worden gebruikt, maar chemisch niet verschillen als brandstof (ETIP Bioenergy, 2019).

## Gebruikte frituurvet en afvalvetten

Gebruikte frituurvet, talg, reuzel, geel vet, kippenvet, vetresten en de bijproducten van de productie van omega-3-vetzuren uit visolie worden steeds vaker gebruikt als grondstoffen voor biodiesel (ETIP Bioenergy, 2019).

## Energiegewassen (granen, suiker, lignocellulose)

Op **zetmeel gebaseerde grondstoffen** zijn granen, zoals maïs of tarwe, en knollen zoals (zoete) aardappelen en cassave. Deze grondstoffen bevatten lange complexe ketens van suikermoleculen. Het zetmeel is gemakkelijk om te zetten in fermenteerbare suikers. De suiker kan vervolgens worden omgezet in ethanol of alternatieve brandstoffen (drop-in fuels). Het vezelachtige deel van de planten (bijv. tarwestro of maïsstro) kan worden omgezet in geavanceerde biobrandstoffen. In Europa is tarwe momenteel het belangrijkste zetmeelgewas voor de productie van bio-ethanol (ETIP Bioenergy, 2019).

**Suikergewassen**, zoals suikerriet, suikerbiet en kafferkoren, kunnen worden gebruikt als grondstof voor zowel traditionele biobrandstoffen (ethanol via vergisting van suiker) als/of verder ontwikkelde biobrandstoffen. Restbietenpulp en bagasse (het vezelmateriaal dat overblijft na suikerextractie uit riet of kafferkoren) kunnen worden gebruikt om cellulose-ethanol te produceren. Vergistbare suikers kunnen ook worden omgezet in alternatieve brandstoffen (drop-in fuels) via biotechnologie of chemische katalyse (ETIP Bioenergy, 2019).

**Lignocellulose biomassa** omvat hout afkomstig uit de bosbouw, bosbouw met een korte omlooptijd en lignocellulose energiegewassen, zoals energiegras en riet (bijv. Miscanthus). Lignocellulose biomassa kan over het algemeen niet worden gebruikt als voedsel of diervoeding, wat betekent dat er geen of beperkte concurrentie is met eindgebruik van voedsel/diervoeding. Lignocellulose materialen kunnen worden gebruikt als grondstof voor verder ontwikkelde diesel- en alternatieve biobrandstoffen (via thermochemische conversie) en voor de productie van cellulose-ethanol (via biochemische conversie). Het marktaandeel van deze technologieën is tot dusver echter relatief beperkt. Lignocellulosische gewassen hebben over het algemeen een hogere BKG-efficiëntie dan meerjarige akkerbouwgewassen omdat ze lagere grondstofvereisten hebben en de energieopbrengst per hectare veel hoger is (ETIP Bioenergy, 2019).

### 3.3 Logistieke waardeketens

De logistiek van biomassa is sterk afhankelijk van het type biomassa en hoe deze is voorbehandeld (in het geval van bijvoorbeeld oliën, pellets, etc.). Biomassa heeft vaak een **laag stortgewicht** (bijv. houtsnippers, stro) en daardoor zijn grote volumes nodig. Een doorsnee biomassa voor de energievoorzieningsketen bestaat uit de volgende processtappen: aanplant, teelt, oogst, behandeling, opslag, akker/bos transport, wegtransport en gebruik van de brandstof bij de energiecentrale/raffinaderij. De activiteiten die nodig zijn om biomassa vanaf het productiepoint aan een elektriciteitscentrale te leveren, zijn als volgt (Rentizelas et al., 2009):

- **Oogsten**/verzamelen van de biomassa op de akker/in het bos
- Behandeling en **transport** op de akker/in het bos om de biomassa naar een punt te verplaatsen waar voertuigen voor het wegvervoer kunnen worden gebruikt
- **Opslag**. Veel soorten biomassa worden gekenmerkt door seizoensgebonden beschikbaarheid, omdat ze op een specifieke tijd van het jaar worden geoogst, maar het hele jaar door nodig zijn. De opslag kan zich bij een boerderij, in het bos, bij het verwerkingsstation of op een tussenliggende locatie bevinden.
- **Transport** inclusief laden en lossen. Omdat de meeste locaties van biomassabrandstofbronnen (d.w.z. boerderijen of bossen) zijn, is wegtransport vaak de enigste optie. Andere transportmiddelen, zoals per schip of trein, kunnen in aanmerking worden genomen bij het onderzoek naar het transport van biomassa over lange afstanden.
- **Verwerking** van biomassa om de verwerkingsefficiëntie en de hoeveelheid die kan worden vervoerd te verbeteren. Hierbij kan het gaan om het vergroten van de bulkdichtheid van biomassa (bijv. verwerken van boshout of hakhoutstelen tot houtsnippers) of het samenvoegen van de biomassa (bijv. verwerken van stro of Miscanthus tot balen). Verwerking kan in elk stadium van de toeleveringsketen plaatsvinden, maar gaat vaak vooraf aan het wegtransport en is over het algemeen goedkoper wanneer het wordt geïntegreerd bij het oogsten.

De biomassaketens heeft, in tegenstelling tot andere ketens, een aantal zeer specifieke kenmerken. Agrarische biomassasoorten worden meestal gekenmerkt door **seizoensbeschikbaarheid**. Daarom is het nodig om zeer grote hoeveelheden biomassa gedurende een aanzienlijke periode **op te slaan** wanneer het hele jaar door productie van bio-

energie gewenst is. Een ander kenmerk van de toeleveringsketen voor biomassa is dat deze te maken heeft met materialen met een **lage dichtheid**. Als gevolg hiervan is er meer behoefte aan transport- en verwerkingsapparatuur, evenals opslagruimte. Dit probleem wordt versterkt door de **lage verbrandingswaarde**, die mede te wijten is aan het verhoogde vochtgehalte van de meeste agrarische biomassasoorten. De lage dichtheid van biomassa verhoogt de kosten van inzameling, behandeling, transport en opslag van de toeleveringsketen (Rentizelas et al., 2009). Deze kenmerken vormen een **aanzienlijke belemmering voor de aanvoer van biomassa** over lange afstanden. Deze uitdagingen kunnen echter worden aangepakt door ofwel (1) transport-, verwerkings- en opslagsystemen te ontwerpen die geschikt zijn voor de verscheidenheid aan soorten en maten van biomassa of (2) de biomassa te formateren om geschikt te zijn voor de bestaande infrastructuur (Searcy et al., 2014). De vorm waarin de biomassa wordt ingekocht, bepaalt vaak de investerings- en operationele kosten van het betreffende systeem voor de exploitatie van bio-energie, aangezien dit van invloed is op de eisen en het ontwerp van de biomassaketten (Rentizelas et al., 2009).

Naast deze typische waardeketen van geogste biomassa, is de logistiek van biomassa-afval meestal heel anders. Voor gebruikte frituurolie of huishoudelijk afval, is de belangrijke logistieke uitdaging het **afvalbeheer** en hoe het afval moet worden ingezameld. Daarbij speelt de industriële of particuliere bewustwording en het gedrag van consumenten een belangrijke rol om de opzet van een dergelijke biomassa-waardeketen makkelijker te maken. Ten slotte moeten ook veiligheids- en hygiënische aspecten worden overwogen.

### **3.4 Duurzaamheid en certificeringsbeleid**

De **eerste richtlijn hernieuwbare energie** (2009/28/EG) stelde een algemeen beleid vast voor de productie en promotie van energie uit hernieuwbare bronnen in de EU. De EU moet tegen 2020 ten minste 20% van haar totale energiebehoefte met hernieuwbare energiebronnen voorzien - dit moet worden bereikt door het realiseren van afzonderlijke nationale doelstellingen. Alle EU-landen moeten er ook voor zorgen dat tegen 2020 ten minste 10% van hun transportbrandstoffen afkomstig zijn uit hernieuwbare bronnen. In richtlijn 2009/28/EG wordt voor elk land nationale doelstellingen voor hernieuwbare energie voor 2020 vastgesteld, rekening houdend met het uitgangspunt en het algehele potentieel voor hernieuwbare energiebronnen. Deze doelstellingen variëren van 10% voor Malta tot 49% voor Zweden. EU-landen hebben in nationale actieplannen voor hernieuwbare energie uiteengezet hoe zij van plan zijn deze 2020-doelstellingen en de algemene koers van hun beleid voor hernieuwbare energie te halen. De vooruitgang van de nationale doelstellingen wordt om de twee jaar gemeten wanneer de EU-landen nationale voortgangsverslagen over hernieuwbare energie publiceren (Europese Commissie, 2019b).

In december 2018 is de **herziene richtlijn hernieuwbare energie** 2018/2001/EU in werking getreden, als onderdeel van het pakket "Schone energie voor alle Europeanen", dat tot doel heeft de EU een wereldleider op het gebied van hernieuwbare energie te houden en, meer in het algemeen, de EU te helpen haar emissiereductieverplichtingen in het kader van de Overeenkomst van Parijs na te komen. In de nieuwe richtlijn is voor de EU een nieuw streefcijfer voor hernieuwbare energie vastgesteld voor 2030 van ten minste 32%, met een clausule voor een mogelijke bijstelling tegen 2023 (Europese Commissie, 2019b).

De RED II definieert ook een reeks **duurzaamheids- en BKG-emissiecriteria** waaraan vloeibare biomassa die in transport wordt gebruikt, moet voldoen. Sommige van deze criteria zijn hetzelfde als in de oorspronkelijke RED, terwijl andere nieuw of opnieuw geformuleerd zijn. Daarnaast introduceert de RED II criteria voor duurzaamheid en BKG-emissiereductie voor vaste en gasvormige biomassabrandstoffen, evenals specifieke vereisten voor elektriciteit uit biomassabrandstoffen (Europese Commissie, 2019b).

Biobrandstoffen, vloeibare biomassa en biomassabrandstoffen uit agrarische biomassa mogen niet worden geproduceerd uit grondstoffen afkomstig van (Europese Commissie, 2019b):



- **Gebieden met een hoge biodiversiteit** (vanaf januari 2008), inclusief oerbossen; gebieden die zijn aangewezen voor natuurbescherming of voor de bescherming van zeldzame en bedreigde ecosystemen of soorten; en zeer biodiverse graslanden;
- **Koolstofrijke gebieden** die na 2008 van gebruik zijn veranderd van moerasland, continu beboste gebieden of andere beboste gebieden met bomen die hoger zijn dan vijf meter en een kroonlaag van 10% tot 30%;
- Gebieden die in januari 2008 **veengebied** waren.

De duurzaamheidscriteria zijn van toepassing op installaties met een totaal nominaal thermisch ingangsvermogen van meer dan 20 MW die elektriciteit, warmte, koude, of brandstoffen produceren uit vaste biomassa-brandstoffen en op installaties met een totaal nominaal thermisch ingangsvermogen gelijk aan of groter dan 2 MW die gasvormige biomassa-brandstoffen gebruiken (Europese Commissie, 2019b).

De RED II introduceerde nieuwe duurzaamheidscriteria voor bosgrondstoffen dat oogsten plaatsvindt met wettelijke vergunningen, het oogstniveau niet hoger is dan de groeisnelheid van het bos en dat bosherstel plaatsvindt. Bovendien moeten biobrandstoffen en bio-energie uit bosmaterialen voldoen aan eisen die de principes weerspiegelen van de EU-verordening over **landgebruik, verandering in landgebruik en bosbouw** (LULUCF). De "bosbouw"-criteria gelden, hetzij op het niveau van het betreffende land, hetzij op het niveau van het bosgebied: de Commissie zal uiterlijk op 31 januari 2021 uitvoeringsrichtlijnen vaststellen (Europese Commissie, 2019b).

Binnen de 14%-subdoelstelling voor transport is er een specifieke doelstelling voor geavanceerde biobrandstoffen die geproduceerd zijn op basis van specifieke grondstoffen. Deze brandstoffen moeten in 2022 voor ten minste 0,2% van de transportenergie zorgen, in 2025 voor 1% en in 2030 voor ten minste 3,5%. Biobrandstoffen en bio-energie geproduceerd uit afval en residuen hoeven alleen maar te voldoen aan het duurzaamheids criterium voor BKG-emissies (Europese Commissie, 2019b).

De maximale bijdrage van biobrandstoffen die worden geproduceerd uit voedsel- en voedergewassen zal worden vastgelegd op het niveau van het verbruik in 2020, met een extra 1%, en een maximum van 7% van de brandstof voor het weg- en spoorvervoer in elke lidstaat. Als het totale aandeel van traditionele biobrandstoffen in 2020 in een lidstaat minder dan 1% is, zal de limiet voor die landen in 2030 nog steeds 2% zijn. Bovendien kan een land met een limiet voor voedsel- en voedergewassen van minder dan 7% de transportdoelstelling met dezelfde hoeveelheid verlagen (een land met een limiet voor voedsel- en voedergewassen van 5% zou bijvoorbeeld een transportdoelstelling van slechts 12% kunnen vaststellen). "Tussentijdse oogsten", zoals vang- en dekgewassen, zijn vrijgesteld van deze limiet. Brandstoffen die worden geproduceerd uit grondstoffen met een "hoog indirect risico op veranderingen in landgebruik" zullen worden beperkt door een strengere limiet op het consumptieniveau van 2019, en zullen dan geleidelijk worden afgebouwd tot 0% in 2030, tenzij specifieke grondstoffen zijn gecertificeerd als "laag indirect risico van verandering in landgebruik". Tot deze grondstoffen behoren ook de grondstoffen die worden geproduceerd op land dat niet eerder is bebouwd. Brandstoffen die in de luchtvaart- en maritieme sector worden gebruikt, kunnen wel bijdragen aan de 14%-transportdoelstelling, maar zijn niet verplicht (Europese Commissie, 2019b).

Bovendien beïnvloeden een aantal andere regelingen op EU-niveau (richtlijnen en verordeningen) indirect de duurzaamheid van een aantal soorten biomassa die relevant zijn voor de productie van bio-energie, omdat ze betrekking hebben op relevante gebieden zoals bosbouw, landbouw, bescherming van leefgebieden, milieubehoud, etc. en vormen zo een algemeen beleidskader. Een van de belangrijkste regelingen die relevant zijn voor nationale wetgeving zijn (ENERGY BARGE, 2017):

- Diverse verordeningen en richtlijnen in het kader van het **gemeenschappelijk landbouwbeleid**. Het gemeenschappelijk landbouwbeleid (GLB) is het EU-beleid in

de landbouwsector en werd ingevoerd in 1962. Sindsdien is het meerdere keren gewijzigd. De doelstellingen van het GLB zijn het verhogen van de productiviteit in de landbouwsector en het waarborgen van een redelijke levensstandaard voor de boeren. Verder is het gericht op het stabiliseren van de markten en het waarborgen van de beschikbaarheid van voorraden en redelijke prijzen voor consumenten. De GLB-hervorming van 2013 heeft tot doel het concurrentievermogen van de EU-landbouw te verbeteren, meer duurzaamheid te bieden en de milieuprestaties ervan te verbeteren.

- **EU-habitatrichtlijn** (92/43/EG)
- **Wet natuurbescherming**, vooral NATURA 2000
- **EU-biodiversiteitsstrategie 2020**
- **EU-houtverordening** (995/2010 EG)

In het kader van het **bosbeleid**, is in 2013 een nieuwe EU-bosstrategie voor bossen en de bosbouwsector uitgewerkt (COM(2013) 659). Hoewel de EU via haar beleid al lange tijd bijdraagt aan de implementatie van duurzaam beheerde bossen in de respectieve lidstaten, bestaat er geen uniform beleid op EU-niveau voor bossen en de bossector. Er is vastgesteld dat er behoefte is aan een gemeenschappelijk beleidskader om de samenhang van bos gerelateerd beleid in de EU te waarborgen en te coördineren. Daarom moet een gemeenschappelijk kader op EU-niveau onder meer de duurzaamheid van het bosbeheer garanderen, de toenemende vraag naar grondstoffen en hernieuwbare energie beheren en de bossen en de biodiversiteit beschermen (Europese Commissie, 2013).

De **richtlijn brandstofkwaliteit** (FQD) (2009) verplicht de lidstaten om de BKG-emissies in verband met het verbruik van transportbrandstoffen tegen 2020 met 10% te verminderen (Europese Commissie, 2009).

In 2015 is de **richtlijn ter vermindering van indirecte veranderingen in landgebruik voor biobrandstoffen en vloeibare biomassa** ((EU)2015/1513) in werking getreden. Deze zogenaamde iLUC-richtlijn wijzigde de wetgeving over biobrandstoffen -met name de RED en FQD- om het risico van indirecte veranderingen in landgebruik te verminderen en om de transitie naar geavanceerde brandstoffen mogelijk te maken

De richtlijn beperkt onder meer het aandeel biobrandstoffen van gewassen die op landbouwgrond zijn geteeld die kunnen worden meegeteld voor de doelstellingen voor hernieuwbare energie voor 2020 tot 7%. Het trekt de lijst van grondstoffen in de hele EU, waarvan de bijdrage dubbel zou meetellen voor de doelstelling voor 2020 van 10% voor hernieuwbare energie in het vervoer, gelijk. En vereist dat biobrandstoffen die in nieuwe installaties worden geproduceerd, minstens 60% minder BKG uitstoten dan fossiele brandstoffen.

De **richtlijn over energie-efficiëntie** (Richtlijn 2012/27/EU) stelt een kader vast om de energie-efficiëntie in de EU te verhogen om de 20% energie-efficiëntie doelstelling tegen 2020 te halen. Alle lidstaten zijn verplicht om energie efficiënter te gebruiken in alle stadia van de energieketen, van productie tot eindverbruik.

Om te voldoen aan de eisen voor verschillende biomassa-grondstoffen, die wettelijk zijn geïmplementeerd, zijn certificatieschema's een nuttig instrument. In de EU gebruikte biobrandstoffen en vloeibare biomassa moeten voldoen aan de eisen van duurzaamheid. Om dit te garanderen, kunnen bedrijven deelnemen aan **vrijwillige duurzaamheidsregelingen** die de naleving van de duurzaamheidscriteria van de EU controleren. Voor het certificeringsproces wordt de hele productieketen beoordeeld door onafhankelijke auditors. De meeste verificatieschema's worden particulier beheerd, maar zijn als geldig goedgekeurd door de Europese Commissie. Erkenningen kunnen vijf jaar duren (ENERGY Barge, 2017b). Het

Sustainable Biomass Program (SBP)<sup>9</sup> is een voorbeeld van een duurzaamheidscertificeringsschema, voornamelijk voor houtpellets en houtsnippers die worden gebruikt voor industriële, grootschalige energieopwekking. De SBP-regeling heeft als doel na te gaan of dergelijke houtachtige biomassafracties afkomstig zijn uit duurzame en legale bronnen.

De certificeringsregelingen voor de brandstofkwaliteit zijn bedoeld om vertrouwen in de eigenschappen van biomassabrandstoffen te geven aan kleine en middelgrote verbruikers, die zelf geen uitgebreid toezicht op de brandstofeigenschappen kunnen uitvoeren. Het bekendste voorbeeld is **ENplus**<sup>10</sup>, dat als doel heeft de kwaliteit van de houtpellets te controleren in de hele leveringsketen, vanaf de productie tot aan de levering aan de eindklant. Op dit moment is **ENplus**<sup>®</sup> het wereldwijd toonaangevende certificeringssysteem voor houtpelletkwaliteit, met naar schatting 11,6 miljoen ton gecertificeerde pellets die in 2019 werden geproduceerd. Andere certificeringssystemen voor brandstofkwaliteit zijn **GoodChips**<sup>11</sup> voor houtsnippers en gehakseld hout en **BIOMasud**<sup>12</sup>, voor verschillende soorten mediterrane vaste biobrandstoffen (bijv. olijfpitten, notendoppen, etc.).

---

<sup>9</sup> [www.sbp-cert.org](http://www.sbp-cert.org)

<sup>10</sup> [www.enplus-pellets.eu](http://www.enplus-pellets.eu)

<sup>11</sup> [www.goodchips.eu](http://www.goodchips.eu)

<sup>12</sup> [www.biomassud.eu](http://www.biomassud.eu)

## 4 Overzicht van de biomassa conversieroutes

Biomassa conversieroutes worden gekenmerkt door het soort grondstof, de conversietechnologieën en de eindproducten. Na de oogst kan de biomassa direct worden gebruikt voor de conversie naar energie, of verder verwerkt worden. De FAO (2019)<sup>13</sup> spreekt over twee belangrijke soorten (of vormen) biobrandstoffen: primaire (onbewerkte) biomassa en secundaire (verwerkte) biomassa, terwijl biobrandstoffen hier niet gedefinieerd zijn.

- **Primaire** (onbewerkte) biomassa is de biomassa waarbij het organisch materiaal grotendeels in zijn natuurlijke vorm wordt gebruikt (zoals geoogst; bijv. houtsnippers, stamhout). Dit soort biomassa wordt direct verbrand, meestal om energie op te wekken voor ruimteverwarming, elektriciteitsopwekking, stoom en proceswarmte.
- **Secundaire** (verwerkte) biomassa in de vorm van vaste stoffen (bijv. houtskool, getorrificeerde biomassa, pellets), vloeistoffen (bijv. ethanol, plantaardige olie) of gassen (bijv. biogas, biomethaan, bio-H<sub>2</sub>), kan worden gebruikt voor een breder scala van toepassingen, waaronder transport en industriële hogetemperatuurprocessen.

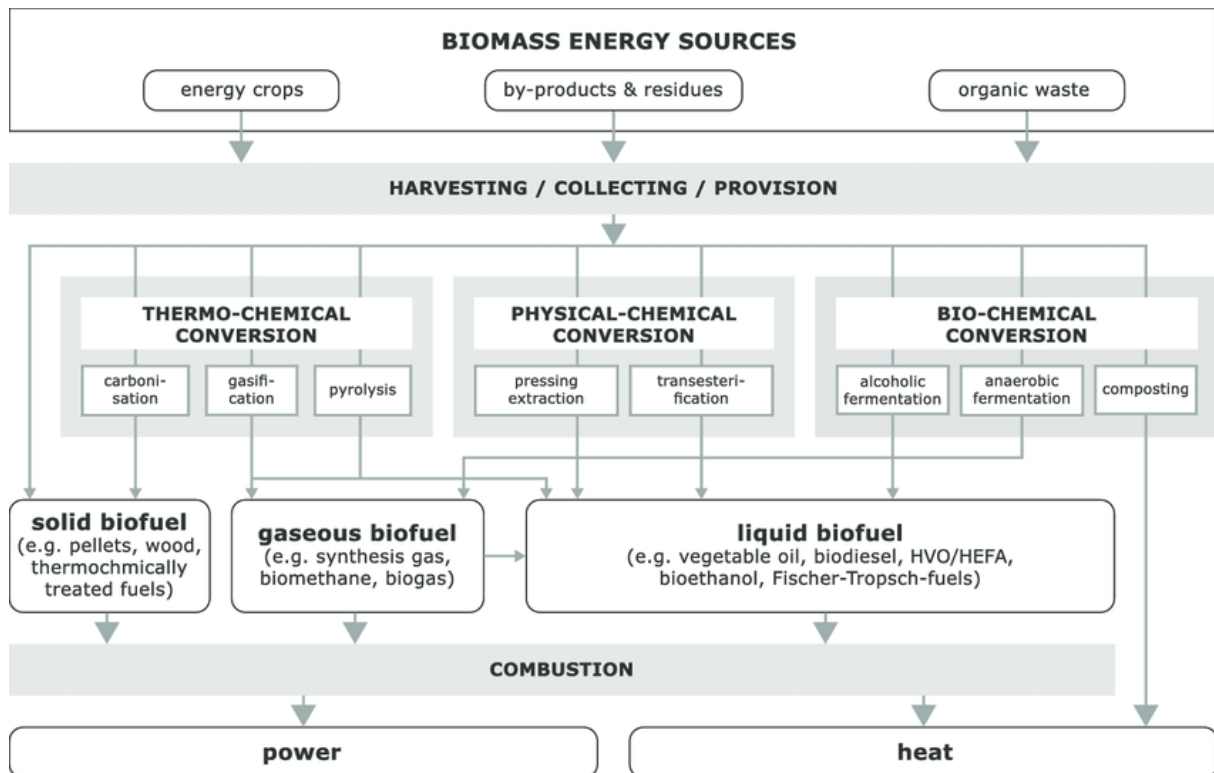
Daarnaast is onlangs een relatief nieuwe term voor sommige secundaire biomassa geïntroduceerd, namelijk de zogenaamde **intermediaire bio-energie dragers** (IBC). Deze worden gevormd wanneer de biomassa wordt verwerkt tot energetisch dichtere, opslag- en transporteerbare tussenproducten, gelijk aan steenkool, olie en gasvormige fossiele energiedragers. Deze IBC's kunnen verder worden geraffineerd tot uiteindelijke bio-energie of biobased producten of direct worden gebruikt voor warmte- en elektriciteitsproductie. Voorbeelden van IBC's zijn pyrolyse-olie of getorrificeerde biomassa. De term IBC is echter niet officieel gedefinieerd en sommige biomassa, zoals bijvoorbeeld pellets, kunnen al dan niet als IBC worden beschouwd.

De verwerking van biomassa heeft als doel de biomassa te voorzien van duidelijk afgebakende eigenschappen. Dit zorgt voor een technisch eenvoudige en milieuvriendelijke conversie in nuttige energie. Hierdoor kan de genormaliseerde biomassa met minder problemen worden gebruikt om de aanvoer op een efficiënte en gemakkelijke manier uit te voeren. De conversieroutes kunnen worden onderverdeeld in drie belangrijke processen:

- **Thermochemische conversie** omvat alle conversieprocessen van biomassa op basis van thermische energie samen: verbranding, vergassing, pyrolyse, torrefactie en carbonisatie
- **Fysisch-chemische conversieprocessen** zetten biomassa om op basis van fysische (bijv. persen, malen, etc.) en chemische processen (bijv. verestering, hydrothermische behandeling). Dit omvat bijvoorbeeld het persen van pellets, maar ook het persen van oliehoudende zaden, inclusief oliewinning en transesterificatie van deze olie tot vetzuurmethylester. Verder zijn er verschillende voorbehandelingsmethoden voor het omzetten van lignocellulosische biomassa in tweede generatie biobrandstoffen.
- **Biochemische conversies** zijn conversies waarbij gebruik wordt gemaakt van biologische processen met behulp van micro-organismen. Dit kan anaerobe vergisting zijn voor de productie van biogas of vergisting voor de productie van ethanol.

---

<sup>13</sup> <http://www.fao.org/3/j4504E/j4504e06.htm> Hoewel de FAO het woord "biobrandstoffen" gebruikt in plaats van "bio-energie".



**Figuur 12: Biomassa conversieroutes (Bron: Thrän et al. 2015)**

Er zijn vele redenen waarom een specifieke technologie de voorkeur heeft boven andere, maar een belangrijk verschil is het vochtgehalte van de biomassa. Wanneer de biomassa 'droog' is, hebben thermochemische technologieën over het algemeen de voorkeur, omdat er minder water opgewarmd hoeft te worden. Wanneer de biomassa 'nat' is -en veel vocht bevat- kunnen biochemische conversietechnologieën zoals anaerobe vergisting of fermentatie geschikter zijn.

In de volgende hoofdstukken worden de belangrijkste conversietechnologieën voorgesteld die relevant zijn voor de BIOFIT-industrieën.

## 5 *Retrofitten (aanpassen) van de eerste generatie biobrandstof installaties*

### 5.1 *Overzicht van de sector*

De **eerste generatie** (1G) biobrandstoffen in Europa betreft de productie van biodiesel (vetzuurmethylesters, FAME), gehydrogeneerde plantaardige olie (HVO) en bioethanol uit diverse voedselgewassen. FAME en HVO worden geproduceerd uit oliehoudende gewassen zoals koolzaad. Bioethanol wordt geproduceerd uit suiker- of zetmeel houdende gewassen, zoals suikerbieten, granen en tarwe. Het belangrijkste voordeel van deze brandstoffen is dat ze kunnen worden gemengd met reguliere transportbrandstoffen.

Voor Europa is de productie van **biodiesel** belangrijker dan de productie van **bioethanol**, met een productie van 11,5 miljoen ton per jaar biodiesel in 2015, tegenover 1,9 miljoen m<sup>3</sup> per jaar voor bioethanol. Deze hoeveelheden worden geproduceerd door gespecialiseerde fabrieken die over heel Europa verspreid zijn. Het productievolume van biobrandstoffen, voornamelijk biodiesel en bioethanol, is de laatste jaren in de Europese Unie stabiel gebleven, na een stijging tot 2013. De steun voor biobrandstoffen van de overheid is de afgelopen jaren afgenomen (zo is in Spanje de behoefte aan bijmenging gedaald). De onzekerheden met betrekking tot de duurzaamheid zijn aangepakt door de invoering van duurzaamheidscertificeringssystemen voor biobrandstoffen, die ook voor andere sectoren als voorbeeld modellen kunnen worden gezien. Toch blijven er onzekerheden bestaan over de wisselwerking tussen de productie van 1G-biobrandstoffen en de voedselproductie en de beschikbaarheid van land. Een aanvulling en toekomstige vervanging van 1G biobrandstoffen door 2G (**tweede generatie**) biobrandstoffen is politiek gewenst, omdat het bij deze biobrandstoffen gaat om niet-voedingsgewassen, zoals lignocellulosehoudende grondstoffen en afgewerkte olie. In veel gevallen hebben ze een betere BKG-balans en zijn ze niet onderworpen aan de limiet voor biobrandstoffen uit voedingsgewassen, die door de herziene richtlijn voor hernieuwbare energie (RED II) zal worden opgelegd.

Naast de algemene doelstelling, met betrekking tot hernieuwbare energie in de vervoerssector, heeft de RED II ook een aantal duurzaamheidscriteria herzien om ervoor te zorgen dat de gebruikte biobrandstoffen de CO<sub>2</sub>-intensiteit ook daadwerkelijk verminderen. In de RED II zijn er nu ook duurzaamheidscriteria voor bosbiomassa en BKG-criteria voor biomassabrandstoffen opgenomen. Voor transportbrandstoffen is de minimale BKG-reductie afhankelijk van de levensduur van de installaties voor de productie van biobrandstoffen:

**Tabel 3: Minimum BKG-drempel voor biobrandstoffen in de RED II**

Installatie startdatum	BKG-besparingsdrempel in RED II
<b>Voor oktober 2015</b>	50%
<b>Na oktober 2015</b>	60%
<b>Na januari 2021</b>	65%
<b>Na januari 2026</b>	65%

Andere belangrijke aspecten van de RED II zijn:

- Verbod op de ondersteuning van biobrandstoffen die worden geproduceerd op bepaalde **hooggewaardeerde soorten grond**, zoals grond met een hoge biodiversiteit, met een hoge koolstofvoorraad en veengrond.
- Een specifieke doelstelling voor zogenaamde **geavanceerde biobrandstoffen**, dat wil zeggen biobrandstoffen die zijn geproduceerd uit (gedefinieerde) residuen. Dit

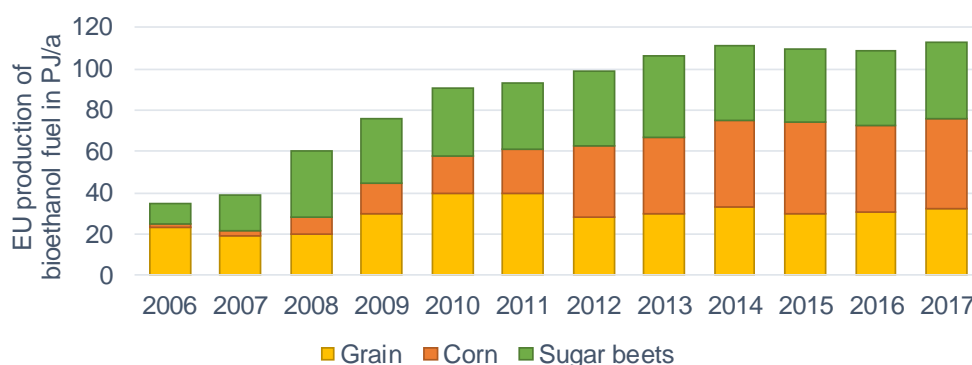
streefcijfer stijgt van 0,2% van de transportenergie in 2022, naar 1% in 2025 en ten slotte naar minstens 3,5% in 2030.

Voor de EU is het RED II-pakket bedoeld om de rol van de EU als wereldleider op het gebied van hernieuwbare energie te behouden en tegelijkertijd de EU te helpen haar emissiereductieverplichtingen in het kader van het Parijs-akkoord na te komen<sup>14</sup>.

Mogelijkheden voor retrofitting zijn de omschakeling van 1G-biobrandstofinstallaties naar de productie van meer of uitsluitend 2G-biobrandstoffen, door (bijvoorbeeld) toevoeging van cellulose-ethanol, biodieseladditieven of biogasadditieven. Praktijkvoorbeelden zijn de retrofit van een biodieselinstallatie van plantaardige olie naar dierlijke vetten en bak- en braadolie in Volos, Griekenland, in opdracht van BDI uit Oostenrijk en een biogas toevoeging aan een ethanolinstallatie op basis van suikerbieten in Anklam, Duitsland door Suiker Unie. Andere retrofit-opties zijn het verbeteren van de BKG-balans (bijvoorbeeld door biogas uit afvalstromen te produceren) of meer geavanceerde verbeteringen van de elektrobrandstoffen.

## 5.2 Toevoeging van cellulose-ethanol aan eerste generatie bioethanol

Bioethanol wordt geproduceerd door fermentatie van gist uit suiker bevattende biomassa. Uit **suikergewassen**, zoals suikerbieten en suikerriet, worden de fermenteerbare suikersappen makkelijk geëxtraheerd in een proces dat vergelijkbaar is met de eerste stappen van de suikerproductie. Het is ook mogelijk om een fermenteerbare suikeroplossing te verkrijgen uit **zetmeelgewassen**, zoals tarwe of maïs. Zetmeel is een biopolymeer dat wordt gevormd door glucosemoleculen die worden afgebroken tot fermenteerbare suikers door een hitte- en enzymatische behandeling genaamd versuikering. De pitten worden gemalen om bloem te verkrijgen, die gemengd wordt met water en enzymen en behandeld wordt bij temperaturen van ongeveer 90°C. Figuur 13 toont het productievolume van bioethanol. Daarnaast wordt bioethanol tegenwoordig voornamelijk geproduceerd uit maïs, suikerbieten en granen (vooral tarwe).



**Figuur 13: EU-productie van bioethanolbrandstof in PJ/jaar (Naumann et al., 2019)**

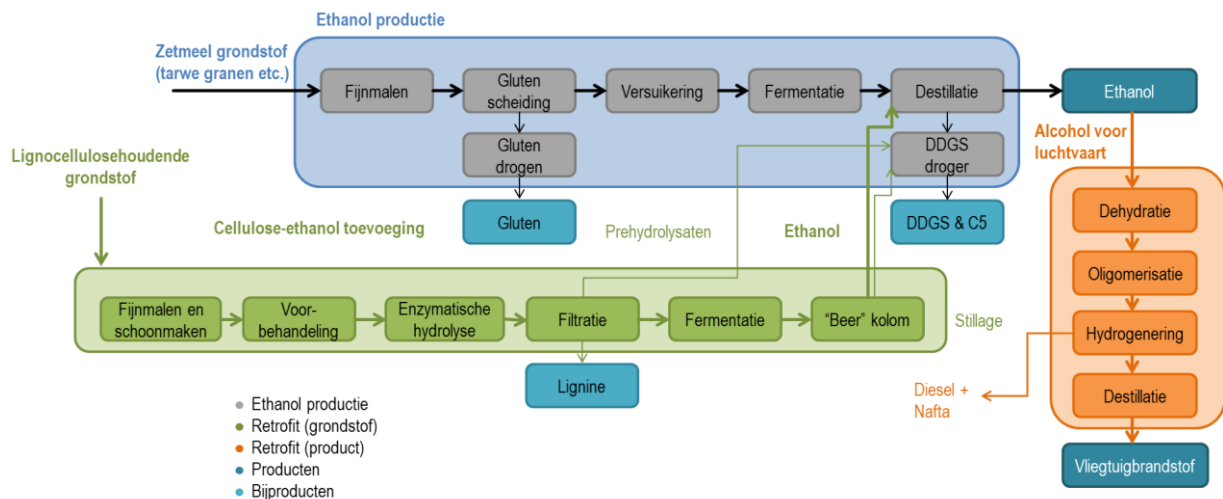
De geproduceerde suikeroplossingen worden gefermenteerd door gist om een pulp te krijgen van 12-16% ethanol in een proces dat vergelijkbaar is met industrieel brouwen. Om zuivere ethanol (>99,5%) uit de pulp te krijgen, worden destillatie en andere zuiveringsmethoden toegepast. Naast ethanol ontstaan er residuen van de fermentaties. Bij processen waarbij zetmeel- of suikergewassen als grondstof worden gebruikt, worden deze residuen stillage of vinasse genoemd. Vooral stillage dat gedroogd wordt tot **gedistilleerde gedroogde granen en oplosmiddelen** (DDGS) is een belangrijk bijproduct en geeft extra opbrengst voor eerste generatie ethanolafabrieken.

Verdere biomassapotentiëlen kunnen worden gebruikt voor de productie van ethanol met de 2G-technologieën die gebruik maken van **lignocellulosehoudende grondstoffen** (Figuur 14). Lignocellulosehoudende biomassa zoals hout of stro bestaat voornamelijk uit cellulose,

<sup>14</sup> <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>

hemicellulose en ligninebestanddelen. De cellulose is ook een biopolymeer op basis van glucosemonomeren. Cellulose is echter moeilijker te versuikeren om een vergistbare suikeroplossing te verkrijgen. De huidige technologieën voor de productie van 2G-bioethanol maken meestal gebruik van een thermisch voorbehandelingsproces zoals een stoom explosie om de lignine - cellulose - hemicellulose composiet te ontleden. Deze voorbehandeling heeft als doel de daaropvolgende enzymatische versuikering van de cellulose te bevorderen. Ook hier wordt ethanol uit de suikeroplossing gefermenteerd en gezuiverd zoals bij het proces in de waardeketen van de 1G-ethanolproductie.

Aangezien de economische haalbaarheid van 2G-ethanoltechnologieën nog steeds onzeker is, zouden **aanvullende oplossingen** voor 1G-ethanolproductie kunnen leiden tot synergiën en kostenbesparingen (Macrelli et al. 2014, Watanabe et al. 2015). Er kunnen verschillende concepten voor de integratie van 2G-ethanol in bestaande fabrieken worden ontwikkeld. Synergiën kunnen voortvloeien uit het gebruik van lignocellulosehoudende delen van de zetmeelgewassen (bijv. tarwezemelen), het samenvoegen van delen van het proces, het aanpassen van het suikergehalte van de fermentatie door het mengen van de pulp, het delen van de algemene infrastructuur op het fabrieksterrein of het gebruik van lignine als hernieuwbare brandstof voor de warmtelevering.



**Figuur 14: Voorbeeldconcept van gecombineerde 1G- en 2G-ethanolproductie met extra vliegtuigbrandstofproductie**

De activiteiten met het oog op een **marktintroductie** van lignocellulose-ethanol hebben onlangs met name plaatsgevonden in de VS en Brazilië. De nadruk lag daarbij op de integratie in de bestaande productielocaties. Zo zijn er plannen ontwikkeld om een Patriot Renewable Fuels site in Annawan, Illinois (nu CHS Inc.) uit te breiden met Inbicon lignocellulose-ethanoltechnologie. De fabriek, die ongeveer 380.000 t/jaar ethanol uit graan produceert, werd uitgebreid met 75.000 - 90.000 t/jaar extra ethanol uit maïsstro (Lane, 2019). Een bestaande POET-bioraffinaderij in Emmetsburg, Iowa, werd eveneens uitgebreid met een lignocellulose-ethanolinstallatie in een samenwerkingsverband tussen POET en Royal-DSM. Het nieuwe deel van de fabriek is ontworpen om 300.000 t/jaar maïsstro om te zetten in ongeveer 60.000 t/jaar ethanol (DSM; 2013). Aan de bioethanolproductie van Quad County Corn Processors is het zogenaamde "cellerate process" toegepast waarin maïsvezel omgezet wordt in ethanol.

In Brazilië, bijvoorbeeld, heeft Raízen in 2014 de eerste van acht geplande fabrieksuitbreidingen in gebruik genomen door een samenwerkingsverband aan te gaan tussen de suikerproducent Cosan en de Koninklijke Nederlandse Shell. Als gevolg van de uitbreiding kan op de locatie Piracicaba, São Paulo, nog eens 32.000 t/jaar ethanol worden geproduceerd uit suikerrietbagasse en stro. Grote installaties (voorbehandeling, enzymatische hydrolyse en fermentatie) werden geleverd door logen Energy. De belangrijkste voordelen van



de integratie in de bestaande suikerfabriek zijn de toegang tot goedkope bagasse en stro, lagere investeringskosten door het gebruik van bestaande apparatuur en lagere bedrijfskosten. Een tweede uitbreiding van de fabriek met een productiecapaciteit van ongeveer 95.000 t/jaar ethanol is gepland.

Het concept is om bagasse te gebruiken als grondstof voor 2G-ethanol en de lignineresiduen terug te brengen naar de eigen ketel voor de energievoorziening. Er worden belangrijke integratiemogelijkheden gezien door samenwerking met een lokale suikerrietfabriek aan te gaan, waardoor er:

- Toegang is tot bagasse tegen lage kosten, klaar voor gebruik en in constante toevoer.
- Toegang is tot het suikerrietstro dat momenteel op het veld ligt
- Aanzienlijke kapitaalkostenbesparingen zijn door gebruik te maken van bestaande apparatuur en andere terreininfrastructuur.
- Besparingen op de bedrijfskosten zijn door het delen van de kosten over de bestaande locatie.

Er zijn weinig studies bekend over de toevoeging van cellulose-ethanol voor de Europese ethanolindustrie. In het kader van het onderzoeksproject "Biorefinery2021 - Energy from Biomass - New Paths to the Integrated Biorefinery" werden verschillende benaderingen voor de optimalisatie van ethanolinstallaties onderzocht. Er werden concepten ontwikkeld die zowel op zichzelf staande als gecombineerde productie van lignocellulose-ethanol beschouwen (Gröngröft et al., 2011). Ook werden oorspronkelijke installatieconcepten voor de gecombineerde verwerking van tarwe en tarwestro ontwikkeld. Er werd vastgesteld dat de specifieke investeringen voor de bouw van lignocellulose-ethanolinstallaties kunnen worden gereduceerd door ze te integreren in bestaande installaties (Gröngröft et al., 2011).

Studies naar de integratie van lignocellulose-ethanol in bestaande Europese productielocaties en de grondstoffen daarvoor zijn tot nu toe dan ook nauwelijks te vinden. Met name de combinatie van lignocellulose-ethanol met bietenethanol en de suikerproductie is nog niet onderzocht.

Binnen het BIOFIT-project onderzoeken de projectpartners Biocarburantes de Castilla y Leon en CIEMAT de integratie van het produceren van 30 miljoen liter/jaar 2G-ethanol uit de onbenutte componenten van de grondstoffen die worden gebruikt in de bestaande ethanolfabriek (op basis van ontbijtgranen) in Bibilafuente, Spanje.

### **5.3 Alcoholen voor de luchtvaart**

Een andere toepassing van bioethanol, is door productie van luchtvaartbrandstoffen uit alcoholen door middel van het zogenoemde **alcohol-to-yet** (ATJ) proces (Figuur 14). Binnen dit proces worden kleine alcoholen (ethanol, propanol of butanol) omgezet in lange-keten koolwaterstoffen en daarna gescheiden in verschillende brandstoffracties.

Het ATJ-proces begint met de gezuiverde alcoholen. Ethanol wordt geproduceerd zoals hierboven is beschreven, maar met verschillende micro-organismen en downstreaming technologieën. Er zijn verschillende processen voor de productie van ATJ, die enigszins verschillen. De kenmerkende stappen worden weergegeven in Figuur 14. Bij hoge temperaturen en onder hoge druk worden de OH-groepen van de alcoholmoleculen gedehydrateerd (verwijdering van OH-groepen) en vervolgens omgezet in langere koolwaterstoffen (oligomerisatie). Het verkregen mengsel van koolwaterstoffen van verschillende lengtes wordt gedestilleerd tot de gewenste fracties en de resterende dubbele bindingen worden verzadigd met behulp van waterstof (Diederichs et al., 2016).

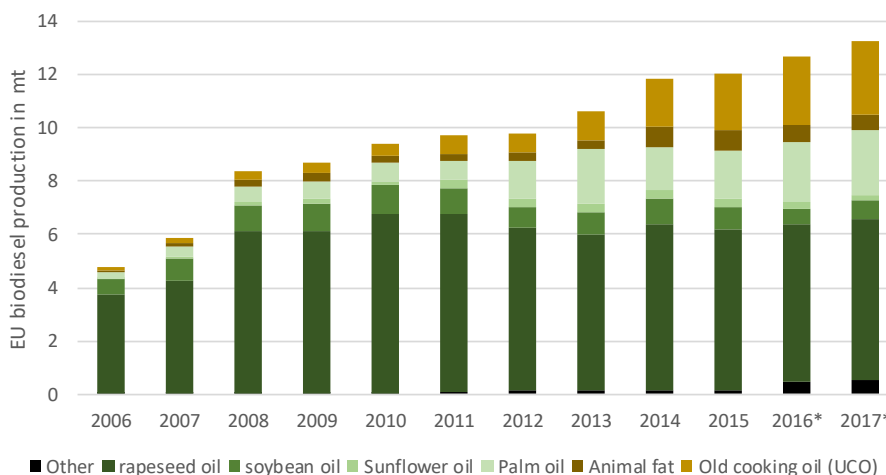
Afhankelijk van de verwerkingsparameters in het ATJ-proces kunnen kerosinefracties met en zonder aromaten worden geproduceerd. Tijdens de destillatie ontstaan meestal biodiesel- en naftafracties als bijproducten.

De omzetting van alcoholen tot kerosine door middel van het ATJ-proces wordt nog niet op commerciële schaal gebruikt, maar er worden momenteel demonstratie-installaties gebouwd en testvluchten gedaan. Naar verwachting zal ATJ een belangrijk proces worden voor de toekomstige productie van alternatieve luchtvaartbrandstoffen. Binnen het BIOFIT-project wordt door DBFZ en Swedish Biofuels een casestudy uitgevoerd over de voordelen van de integratie van de ATJ-technologie in bestaande 1G-bioethanolfabrieken. Naar schatting kan de aanpassing van alle ethanolfabrieken wereldwijd met de ATJ-technologie ongeveer 20% van de jaarlijkse vraag naar luchtvaartbrandstoffen in de industrie opleveren (Reals, 2012).

Een aantrekkelijk alternatief voor het gebruik van 1G-ethanol voor het ATJ-proces zou het gebruik van hogere alcoholen zoals **isobutanol** kunnen zijn, omdat die bij oligomerisatie sneller langere moleculen maken. Een mogelijk productieproces is de vervaardiging van isobutanol met behulp van speciale gisten zoals die door GEVO Inc. wordt toegepast. De uitdaging is om tot een stabiel fermentatieproces te komen met behulp van de genetisch gemodificeerde gisten. Ook andere innovatieve technologieën voor de productie van alcohol worden in het kader van ATJ besproken. Zo heeft LanzaTech bijvoorbeeld een geschikt fermentatieproces ontwikkeld op basis van gasfermentatie, waarbij ethanol geproduceerd wordt uit afvalgasen (Geleynse, 2018).

#### 5.4 Multi-feedstock biodiesel toevoeging

Tot 2010 was de EU-productie van biodiesel voornamelijk op basis van koolzaad. Sindsdien is het aandeel van andere oliegewassen zoals sojabonen, zonnebloemen en palmen toegenomen. Toch is de totale biodieselproductie op basis van olieзaden niet significant gestegen sinds 2010. De stijging van de productie in de laatste jaren was vooral gebaseerd op de extra productie van biodiesel uit oude bak- en braadolie (UCO), dierlijk vet en andere producten. Figuur 15 toont deze ontwikkeling voor de productie van biodiesel (FAME) en HVO in Europa sinds 2006 (Naumann et al. 2019).



**Figuur 15: EU-biodieselproductie in miljoen ton (\*voorspelling) (Naumann et al., 2019, gegevens: Flach et al., 2016)**

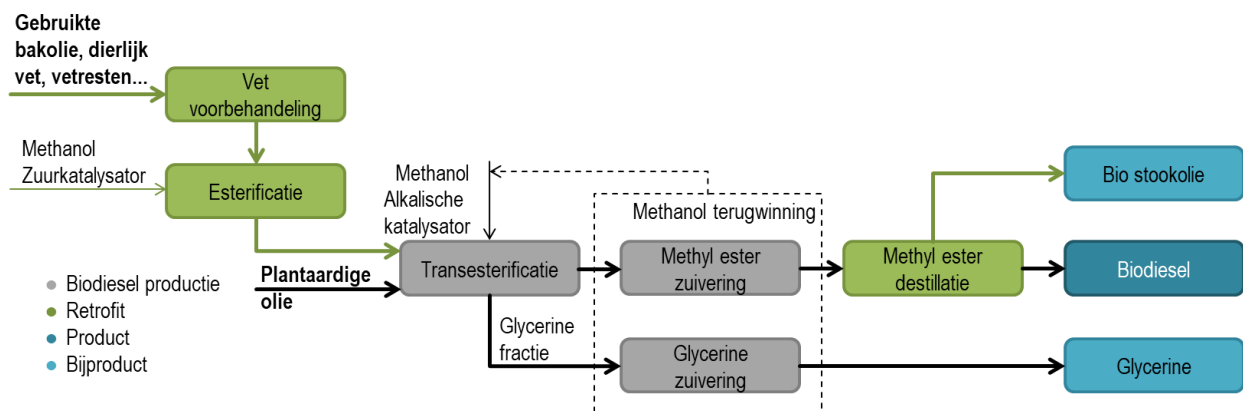
Oliën of vetten (uit oliehoudende planten) worden gebruikt als grondstof voor de productie van biodiesel. Deze worden onderverdeeld in oliehoudende vruchten met vruchtvlees (oliepalm of olijfboom) en oliehoudende zaden (koolzaad, zonnebloem, vlas of soja).

De olie moet eerst worden geëxtraheerd uit het oliezaad, dat in verschillende soorten oliemolens wordt verwerkt. Deze kunnen worden onderverdeeld in koude persing, warme

persing en extractiepersing. Bij de verwerking van de oliezaden wordt eiwitrijke perskoek geproduceerd, die als hoogwaardig diervoeder op de markt kan worden gebracht.

De daaropvolgende **transesterificatieprocessen** van de olie verschillen vooral wat betreft de gebruikte katalysatoren en de procescondities (temperatuur, druk en tijd). Na de transesterificatie moet de biodiesel worden gewassen en gedroogd. Het bijproduct glycerol wordt verwerkt en afhankelijk van de gebruikte katalysator wordt een zout verkregen. Methanol, dat in overmaat wordt toegevoegd, kan worden teruggewonnen door middel van een rectificatiekolom.

Biodieselininstallaties die zijn gebouwd voor de verwerking van plantaardige oliën kunnen worden omgebouwd tot **multi-feedstock biodieselfabrieken** die ook **gebruikte bak- en braadolie (UCO)** en **dierlijke vetten** kunnen verwerken. Vergeleken met raapzaadolie hebben deze grondstofsoorten een ongelijkere samenstelling met variërende gehalten aan triglyceriden, een hoger aandeel vrije vetzuren (FFA), evenals verhoogde gehalten aan onzuiverheden zoals kunststoffen, fosfor-, stikstof- en zwavelcomponenten. Om deze reden is het onmogelijk om UCO en dierlijke vetten te verwerken in biodieselininstallaties die gebouwd zijn voor plantaardige oliën zonder de componenten te veranderen. Daarom moeten er voorbehandelingsstappen voor het scheiden van onzuiverheden in deze soorten afvalvetgrondstoffen worden toegevoegd aan het proces (Figuur 16). Bovendien moeten extra veresteringsreactoren, bijvoorbeeld die gebruik maken van een zure katalysator zoals zwavelzuur, die het hoge gehalte aan FFA verlagen, in het biodieselproductiesysteem worden geïntegreerd. Na de veresteringsreactie wordt de scheiding van de ruwe biodiesel en de glycerolfase uitgevoerd door bezinking of centrifugering. De gescheiden fasen kunnen dan worden geïntegreerd in het bestaande proces. Het kan ook nodig zijn om achteraf distillatiekolommen aan te brengen om te kunnen voldoen aan de kwaliteitscriteria van de EN14214 (Europese norm voor de kwaliteit van biodieselbrandstof).



**Figuur 16: Proces van multi-feedstock gebruik bij de productie van biodiesel.**

Een ander specifiek probleem met UCO en afval van dierlijke vetten uit het verwerkingsproces is **polymeerverontreiniging**. De reden hiervoor is, in het geval van UCO, het proces van inzameling. UCO wordt meestal ingezameld in polyethyleen- of polypropyleencontainers. Delen van deze polymeren lossen op in de UCO en kunnen niet door filtratie worden verwijderd. In het geval van dierlijk vet vervuilen kunststoffen van bijvoorbeeld oormerkplaatjes van vee het dierlijk vet tijdens het verwerkingsproces.

Het resultaat van deze polymeerverontreinigingen is afzettingen op warmtewisselaars en kolombodems, en een verhoogd gehalte aan polymeren in de biodiesel- of de glycerolfase. Door verschillende aanvullende proces technische methoden, zoals het gebruik van een hydrogel met aansluitende filtratie, het gebruik van poreuze membranen, of de toevoeging van bleekarde en actieve kool, kan de polymeerconcentratie in de UCO en het dierlijk vetafval worden verminderd (Braune, 2016).



Figuur 17: Biodiesel, biodieselmengsel en fossiele diesel (Bron: DBFZ)

### 5.5 Glycerol omzetting in methanol

**Glycerol** is een kleurloze, reukloze en stroperige vloeistof, die aanwezig is in alle natuurlijke vetten en vetoliën zoals vetzureesters (triglyceriden). Het is een bijproduct van de productie van vetzuren of biodiesel en kan veelzijdig worden gebruikt, bijvoorbeeld in de cosmetische industrie, als levensmiddelenadditief en voor de productie van kunststoffen of biogas.<sup>15</sup>

**Methanol** is de eenvoudigste alcohol en een lichte, vluchtige, kleurloze en ontvlambare vloeistof. Momenteel wordt de meeste methanol geproduceerd door de katalytische omzetting van syngas uit fossiele bronnen. Het gebruik van glycerol als grondstof maakt de productie van biomethanol<sup>16</sup> mogelijk.

Tijdens het productieproces van biodiesel wordt glycerol geproduceerd als bijproduct in dezelfde hoeveelheden als methanol nodig is voor de productie. Door de toenemende vraag naar biodiesel zal ook de productie van glycerol en de vraag naar methanol toenemen. Om dit probleem aan te pakken wordt overwogen glycerol om te zetten in methanol (van Bennekom, Venderbosch, & Heeres, 2012).

#### Procesbeschrijving

Er zijn verschillende manieren om glycerol om te zetten om methanol te produceren. In de volgende paragrafen worden twee manieren kort beschreven.

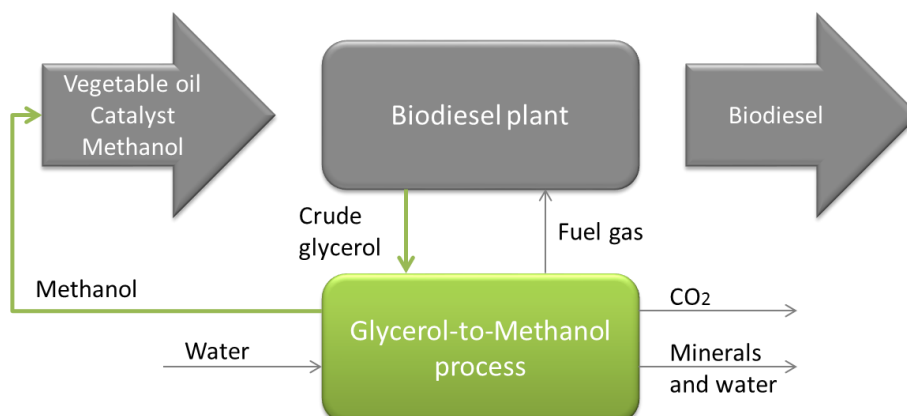
De productie van methanol uit glycerol is al op industriële schaal aangetoond door een bedrijf uit Nederland, **BioMCN** genaamd. Daarbij wordt de ruwe glycerol gezuiverd en door stoomhervorming geleid. Het geproduceerde syngas wordt omgezet in methanol in een conventionele verpakte methanolsynthesereactor. BioMCN brengt industriële hoeveelheden biomethanol op de markt en verkoopt deze. De fabriek gebruikt hiervoor geen glycerol meer als grondstof, maar methaan.

In het tweede proces, het glycerol-naar-methanol (GtM) proces, wordt een natte biomassastroom (glycerol) omgezet in syngas door hervorming in superkritisch water (RSCW). Vervolgens wordt het omgezet in methanol door een hogedruk methanolsynthese. Het project **Supermethanol** onderzoekt het GtM-proces en voerde verschillende experimenten uit met de integratie van een biodieselfabriek (van Bennekom, Venderbosch, & Heeres, 2012). Figuur 18 illustreert dit GtM-proces met de relevante stappen voor de biodieselproductie in het grijs, en die voor het GtM-proces in het groen. De methanolproductie is geïntegreerd in de

<sup>15</sup> <https://www.chemie.de/lexikon/Glycerin.html>

<sup>16</sup> <http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/products-end-use/products/methanol>

biodieselfabriek om methanol te produceren uit het ruwe glycerolproduct van de biodieselproductie en deze te hergebruiken in de fabriek.



**Figuur 18: Glycerol naar methanol proces**

Zoals hierboven vermeld, is één van de **toepassingen van methanol** de productie van biodiesel. Daarnaast is methanol belangrijk voor de chemische industrie, voor de productie van formaldehyde, azijnzuur, polymeren en verven. Het kan ook worden gebruikt als energiedrager of in kleine percentages in benzinemengsels (van Bennekom, Venderbosch, & Heeres, 2012).

De methanol die wordt geproduceerd met een biomassa-grondstof heeft voordelen voor het milieu en kan op de lange termijn ook leiden tot kostenverlaging als de olieprijs stijgt. Een integratie in een biodieselfabriek zou de energiebalans, de koolstofprestaties, de duurzaamheid en de algemene economische aspecten van de biodieselproductie kunnen verbeteren. Producenten zijn minder afhankelijk van de prijs van methanol, er is een (gedeeltelijke) leveringszekerheid van methanol en het bijproduct wordt gebruikt als groene, duurzame grondstof (van Bennekom, Venderbosch, & Heeres, 2012). De technologie is met succes getest op pilotschaal, maar er zijn nog geen complete demonstratie-units gebouwd.

Zoals weergegeven in Figuur 18 kunnen de bestaande installaties voor de productie van biodiesel worden aangepast door de integratie van een glycerol-naar-methanolunit, waardoor het grootste deel van de methanol weer in het biodieselproces wordt hergebruikt.

## 5.6 Biomethaan als vervanger van aardgas

**Biogas** kan worden geproduceerd door anaerobe vergisting van verteerbaar grondstofmateriaal. Biogas bestaat uit ongeveer 50-60% methaan (CH<sub>4</sub>) en 40-50% koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) en kleine hoeveelheden waterstofsulfide (H<sub>2</sub>S), water en siloxanen.

Door middel van **biogasupgradetechnologie** kan het grootste deel van de CO<sub>2</sub> worden verwijderd. Het verkregen gas wordt biomethaan genoemd, dat volgens dezelfde normen als fossiel aardgas wordt gebruikt en vervolgens in het aardgasnet wordt geïnjecteerd. Het kan worden gebruikt als aardgasvervanger voor transporttoepassingen.

Er zijn veel verschillende technologieën voor het upgraden van biogas op de markt, waaronder aminewassing, drukschommelabsorptie, waterwassing, organische fysische reiniging, cryogene destillatie en membraanscheiding.

Volgens de European Biogas Association (2019) waren er eind 2017 in Europa 17.783 biogasinstallaties en 540 biomethaaninstallaties in bedrijf. De totale geïnstalleerde elektrische capaciteit (IEC) in Europa nam in 2017 verder toe met 5% tot 10.532 MW, terwijl de uit biogas geproduceerde elektriciteit een Europese omvang had van 65.179 GWh. Ook de productie van biomethaan steeg tot een totaal van 19.352 GWh of 1,94 bcm in 2017.

Zoals de FNR aangeeft (2013), is het upgraden van biogas tot biomethaan de afgelopen jaren aanzienlijk toegenomen. In tegenstelling tot de opwekking van WKK op productielocatie zijn er verschillende voordelen verbonden aan het upgraden van biogas tot biomethaan, om vervolgens in het aardgasnet te gebruiken. Door het gebruik van biomethaan op een plaats met een grote vraag naar verwarming, draagt het upgraden van biogas tot biomethaan bij aan een aanzienlijk toenemend aandeel van extern bruikbare warmte-energie; dit leidt op zijn beurt tot een verhoging van de totale efficiëntie van het gebruik van biogas.

De moderniseringstechnologieën zijn de laatste jaren goedkoper geworden. Dit zou een mogelijkheid voor de eigenaren van biogasinstallaties kunnen zijn om hun biogasinstallaties te retrofitten, door bijvoorbeeld een verbeterde installatie voor de productie van biomethaan te installeren. Biomethaaninstallaties kunnen ook worden beschouwd als retrofit-oplossingen voor vele andere biobased industrieën (bijv. landbouw, voedselverwerking, pulp en papier), omdat ze op een grote verscheidenheid aan natte biobased residuen kunnen worden toegepast.

## 5.7 Elektrobrandstoffen

Elektrobrandstoffen zijn brandstoffen geproduceerd uit **waterstof** uit elektrolyse. Andere termen die voor dit soort brandstoffen en voor de omzettingsprocessen worden gebruikt zijn power-to-gas (PtG), power-to-liquid (PtL), **power-to-x** (PtX) en e-brandstoffen. De door middel van elektrolyse geproduceerde waterstof wordt dan gebruikt voor de reactie met CO of CO<sub>2</sub> om gasvormige of vloeibare koolwaterstoffen te vormen. Elektrobrandstoffen zijn vergelijkbaar met brandstoffen die door andere conversieroutes worden geproduceerd waarbij geen elektrolyse wordt toegepast. Tabel 4 toont verschillende soorten elektrobrandstoffen (Philibert, 2018).

Tabel 4: Overzicht van elektrobrandstoffen

	Zonder koolstof	Met koolstof (elektrobrandstoffen op basis van koolstof)
<b>Gasvorming</b>	Waterstof (H <sub>2</sub> )	Methaan (CH <sub>4</sub> )
<b>Vloeistof</b>	Geen	Methanol (CH <sub>3</sub> OH) FT-brandstoffen (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> )

De duurzaamheid van deze elektrobrandstoffen wordt bepaald door de herkomst van de gebruikte elektriciteit (hernieuwbaar of niet). Bovendien is de BKG-emissie van de op koolstof gebaseerde elektrobrandstoffen afhankelijk van de herkomst van de koolstof:

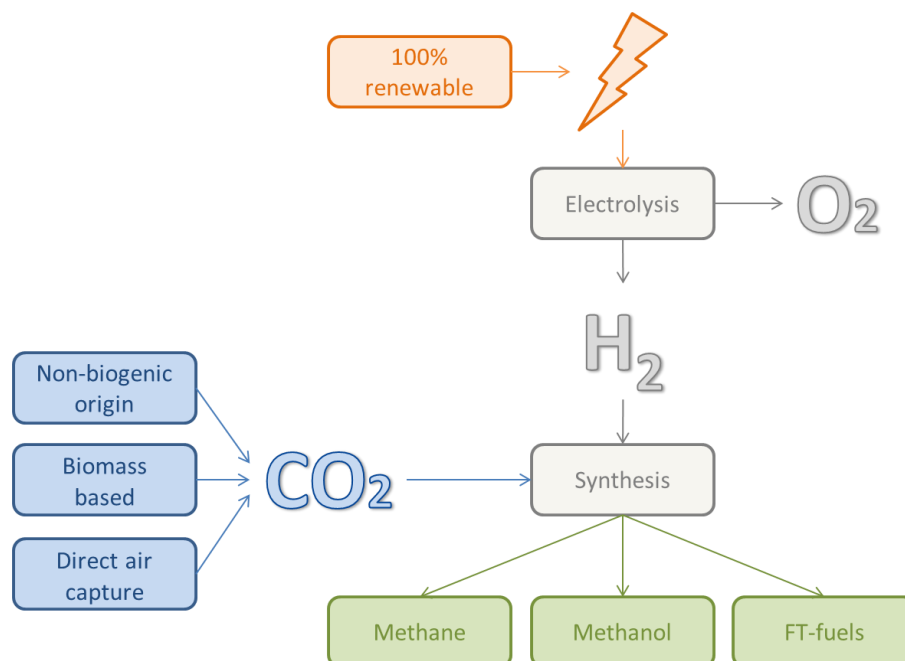
- Koolstof wordt hergebruikt na verbranding van fossiele brandstoffen of bij de uitstoot van processen. In dat geval wordt CO<sub>2</sub>, dat anders zou zijn uitgestoten, afgevangen en hergebruikt. Deze brandstof wordt **elektrobrandstof uit niet-biogene CO<sub>2</sub>** genoemd.
- Koolstof wordt afgevangen uit een installatie die biomassa verwerkt en CO<sub>2</sub> produceert als onderdeel van het product of als bijproduct. Deze elektrobrandstoffen worden beschouwd als koolstofneutraal en ze worden **elektrobrandstoffen op basis van biomassa** genoemd.
- Koolstof wordt rechtstreeks uit de lucht afgevangen (**directe luchtvangst - DAC**). Dit proces vereist elektriciteit en warmte en is, door de lage CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer, energie-intensiever dan het afvangen van koolstof uit de uitstoot van de fabriek. Deze elektrobrandstoffen worden beschouwd als koolstofneutraal (Philibert, 2018).

De mate waarin elektrobrandstoffen met betrekking tot de richtlijn inzake hernieuwbare energie (RED-II) als hernieuwbare brandstoffen kunnen worden beschouwd, hangt af van het aandeel

hernieuwbare energiebronnen die gebruikt zijn voor de productie van de elektriciteit en waterstof. Tenzij er rechtstreekse verbinding is tussen een volledig hernieuwbare elektriciteitsopwekking en de installatie voor de productie van elektrobrandstoffen, wordt rekening gehouden met de nationale energiemix.

Voor de productie van elektrobrandstoffen op basis van koolstof zijn elektriciteit en CO<sub>2</sub> nodig. Figuur 19 toont de omzettingroutes van deze elektrobrandstoffen. Tijdens de elektrolyse wordt elektriciteit gebruikt om water te splitsen in zuurstof en waterstof. De waterstof kan worden gebruikt als elektrobrandstof of kan worden gecombineerd met de afgevangen CO<sub>2</sub> om de waterstof om te zetten in koolwaterstoffen via syntheseprocessen. Afhankelijk van het gewenste product gebruiken deze syntheseprocessen verschillende katalysatoren om methaan, methanol of Fischer-Tropsch (FT) vloeistoffen te produceren.

Een andere optie voor methaanproductie is het gebruik van gasmengsels als CO<sub>2</sub>-bron. Wanneer syngas wordt gebruikt en waterstof wordt toegevoegd, is de brandstofopbrengst (methaan, methanol, FT-vloeistoffen) hoger. Wanneer ruwe biogas wordt gebruikt en waterstof wordt toegevoegd, voeren de micro-organismen uit het biogasproces (hydrogenotrofe methanogenen) biologische methanisering uit en produceren ze meer methaan.



**Figuur 19: Elektrobrandstofprocessen**

Aangezien de term "elektrobrandstoffen" verschillende soorten brandstoffen omvat, zijn de mogelijkheden voor het **eindgebruik** veelzijdig. Enkele toepassingen voor het eindgebruik zijn:

- Om andere technologieën voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit aan te vullen, wordt het gebruik van elektrobrandstoffen (waterstof) vaak toegepast in installaties op eilanden (bijv. in Japan) waar de kosten voor de levering van fossiele brandstoffen hoog zijn.
- Om het gebruik van waterstof in kleinere industrieën en gebouwen te vergemakkelijken, kan het in het gasnet worden geïnjecteerd door het te mengen met aardgas of methaan. Er bestaat ook een mogelijkheid om zuivere waterstof in gasnetten te gebruiken, maar dit brengt nog steeds problemen met zich mee, zoals hoge kosten of efficiëntieproblemen.
- Het gebruik van elektrobrandstoffen in het vervoer (weg, zee, luchtvaart) maakt een bijna emissievrije mobiliteit mogelijk. Voor wegvoertuigen zijn er verschillende opties, zoals het gebruik van FT-brandstoffen als instapbrandstof in conventionele voertuigen, het gebruik van methaan of methanol in aangepaste voertuigen, of het

gebruik van waterstof in brandstofcelvoertuigen. In de maritieme sector wordt waterstof overwogen voor kortere reizen, maar niet voor lange afstanden. Voor de luchtvaart kunnen FT-brandstoffen worden gebruikt in mengsels tot 50%.

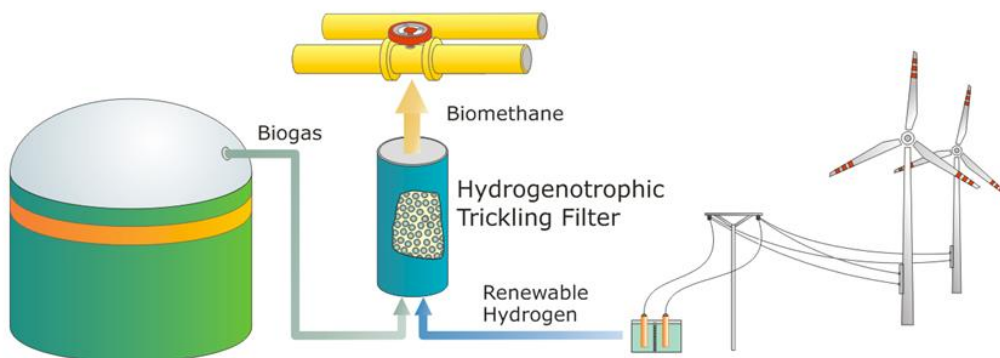
Elektrobrandstoffen zijn zowel vloeibare als gasvormige brandstoffen en daarom is de toepassing veelzijdig. **Voordelen** van elektrobrandstoffen zijn onder andere de mogelijkheid voor langdurige opslag, mogelijk lage BKG-uitstoot en de toepasbaarheid in conventionele voertuigen. Hoge omzettingsverliezen en hoge transport- en distributiekosten maken elektrobrandstoffen echter vrij duur (Philibert, 2018).

### **Retrofitmogelijkheden**

Bestaande installaties voor de productie van ethanol of biogas kunnen worden aangepast (uitgebreid) door **CO<sub>2</sub> af te vangen** van het fermentatieproces en te combineren met waterstof die door een elektrolyseapparaat wordt geproduceerd. De daaropvolgende synthese produceert methaan, methanol of FT-vloeistoffen.

Bestaande biomassavergassingsinstallaties kunnen worden aangepast door **waterstof toe te voegen aan syngas**. Hierbij wordt de waterstof/CO-verhouding veranderd, waardoor de watergasreactie geheel of gedeeltelijk wordt vervangen. Hierdoor kunnen er meer brandstoffen geproduceerd worden uit de koolstof uit de biomassa.

Bestaande biogasinstallaties kunnen worden aangepast met een tweede reactor die wordt gevoed met waterstof en biogas. Door **biologische methanisering** kan het grootste deel van de CO<sub>2</sub> in het biogas worden omgezet in extra methaan.



**Figuur 20: Biologische methanisering (Bron: Rachbauer et al. 2016)**

## **5.8 Conclusie**

Door het vergelijken van de doelstellingen voor emissiereducties in de transportsector met de ontwikkeling van duurzame alternatieven wordt duidelijk dat veel productiecapaciteit moet worden opgebouwd. Daarbij kan een retrofit vooral zinvol zijn wanneer extra brandstof wordt geproduceerd of wanneer de efficiëntie van de processen kan worden verhoogd. Het overstappen van de ene biobased grondstof (1G) naar een andere biobased grondstof (2G) kan leiden tot de productie van een biobrandstof die als duurzamer wordt beschouwd, maar niet significant bijdraagt aan de reductie van fossiele brandstoffen in de transportsector.

In het algemeen zijn de Europese biobrandstofinstallaties vrij nieuw, aangezien de meeste ervan na 2005 zijn gebouwd. Daarom kunnen dure investeringen in de aanpassing van de bestaande infrastructuur vanuit het oogpunt van een eigenaar van de installatie te vroeg lijken.

Enkele andere aanbevelingen zijn specifiek:

- De biobrandstoffensector wordt sterk beïnvloed door de **regelgeving**. Deze regelgeving heeft ook een grote invloed op de economische aspecten van investeringen in retrofitting. Wijzigingen in de regelgeving moeten daarom met de



nodige voorzichtigheid worden doorgevoerd om het vertrouwen van de eigenaar van de installatie in zijn bedrijfsplannen te behouden. Het risico op een wijziging van de regelgeving lijkt zeer groot te zijn, en dat belemmert blijkbaar de investeringen in de biobrandstofsector.

- Om gebruik te kunnen maken van biomethaan als hernieuwbare transportbrandstof moet de ontwikkeling van de **infrastructuur** voor het gebruik ervan worden bevorderd en ondersteund. Een groter aandeel van voertuigen op CNG zou het mogelijk maken biomethaan te gebruiken afkomstig van duizenden biogasinstallaties, waarvan een groot aantal biobased residuen als grondstof worden gebruikt.
- Producenten van biobrandstoffen hebben momenteel geen directe **toegang tot de klanten** en weinig mogelijkheden om de voordelen van hun producten te promoten. Het zou helpen om gespecialiseerde biobrandstoffen aan te bieden bij tankstations, zodat klanten kunnen kiezen uit duurzame brandstoffen.
- De **CO<sub>2</sub>-uitstoot** van de verschillende brandstoffen (fossiel en biobrandstoffen) moet zichtbaar zijn voor klanten bij tankstations.

## 6 *Retrofitten van fossiele raffinaderijen*

### 6.1 *Sector overzicht*

Fossiele brandstofraffinaderijen zetten ruwe olie om in eindproducten door ze af te breken en te verwerken tot nieuwe producten, zoals transportbrandstoffen.

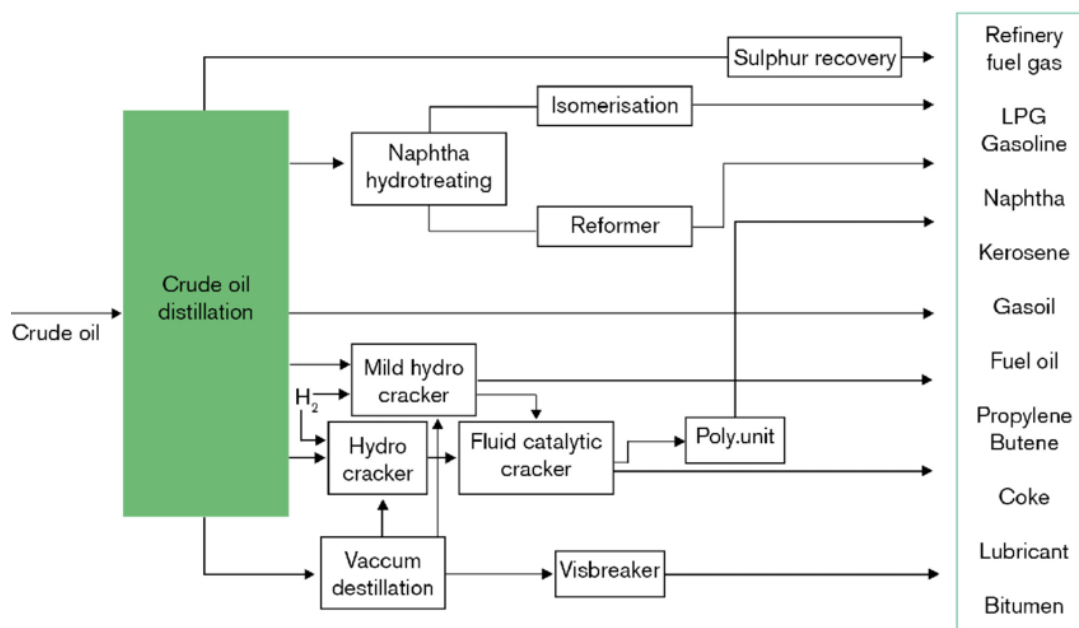
**Ruwe olie** wordt uit de aarde gewonnen. Er zijn vele soorten ruwe olie, met veel verschillende componenten. De meeste van deze componenten zijn koolwaterstoffen (moleculen die uit de elementen koolstof en waterstof bestaan). Andere componenten in ruwe olie bestaan uit een combinatie van koolwaterstoffen en andere elementen, zoals zwavel, stikstof en metalen, in kleinere hoeveelheden.

Raffinaderijen zijn grote en kapitaalintensieve installaties die ruwe olie omzetten in **eindproducten**. In Europese raffinaderijen bestaan ongeveer 65% van de producten uit transportbrandstoffen, zoals diesel, benzine, kerosine, zware olie en vloeibaar gas. 25% van de producten wordt gemaakt voor andere toepassingen, zoals bitumen, smeermiddelen, stookolie en petroleumcokes. 10% van de producten zijn petrochemische grondstoffen die worden gebruikt in de chemie, als synthetisch rubber en als diverse kunststoffen.



**Figuur 21: Fossiele raffinaderijen zijn grote industriële complexen waar een groot aantal verschillende fossiele brandstoffen en andere producten geproduceerd worden. (Foto: Thessaloniki Refinery, Hellenic Petroleum)**

**Kernprocessen** in een raffinaderij zijn 1) het scheiden van de ruwe olie in verschillende fracties, en 2) het verwerken van deze fracties tot verschillende producten. In Figuur 22 worden enkele basisprocessen van een raffinaderij weergegeven. Het 'hart' van een raffinaderij is de atmosferische destillatie. In deze destillatiekolom wordt de ruwe olie opgewarmd en wordt, op basis van het kookpunt, gescheiden. Gasvormige producten (met het laagste kookpunt) verlaten de kolom van bovenaf, en de zware fracties (met een hoog kookpunt) verlaten de kolom van onderaf.



**Figuur 22: Basisprocessen in een raffinaderij**

Elke raffinaderij is uniek, vanwege de verschillen in geografische ligging, specificaties van de ruwe olie, markten, productspecificaties, etc. Raffinaderijen produceren een verscheidenheid aan producten, op basis van hun input en marktbehoeften. Raffinaderijen kunnen en wijzigen productsamenstellingen en -hoeveelheden voortdurend op basis van factoren die binnen de fysieke beperkingen van de raffinageprocessen vallen. Vanwege de complexiteit, de werkzaamheden en de onderlinge verbindingen tussen de verschillende processen worden wiskundige modellen gebruikt om de parameters van de raffinaderij aan te passen, zodat producten in de juiste hoeveelheden en met de juiste specificaties kunnen worden geproduceerd.

Raffinaderijen kunnen worden ingedeeld op basis van de **Nelson complexiteit index**. Dit is een numerieke waarde die aangeeft hoeveel verwerkingseenheden een raffinaderij na de ruwe destillatie-eenheid heeft. De destillatie-eenheid heeft een complexiteit van 1. De complexiteit wordt onderverdeeld in de volgende categorieën:

**Tabel 5: Nelson complexiteit index indeling van fossiele brandstofraffinaderijen**

Indeling	Soort proces
<b>Basis en eenvoudig</b>	Geen omzettingseenheden buiten de destillatie van ruwe olie
<b>Indeling 1</b> (complexiteit <2), ook wel <b>topping refineries</b> genoemd	Eenvoudigste type olieraffinaderij, bestaande uit een destillatie-eenheid, een naftareformer en een aantal noodzakelijke processen
<b>Indeling 2</b> (complexiteit 2 – 6), ook wel <b>Hydro skimming refineries</b> genoemd	Zoals indeling 1, maar met een vacuümdestillatie-eenheid en een katalytische kraker
<b>Indeling 3</b> (complexiteit 6 – 12), ook wel <b>conversion refineries</b> genoemd	Uitgerust met een hydro cracker, waardoor de productie van benzine en middendestillaten wordt vergroot
<b>Indeling 4</b> (complexiteit >12), ook wel <b>Deep Conversion refineries</b> genoemd	Omvat zowel hydrocracking als katalytische kraakinstallaties en cokesinstallaties om de zwaarste fracties ruwe olie om te zetten in lichtere producten

Veel raffinaderijen in de EU hebben een relatief lage complexiteit (indeling 1 en 2), terwijl veel raffinaderijen in de VS, India en de Perzische Golf veel complexer zijn. Een hogere complexiteit betekent hogere kapitaalkosten, maar ook meer flexibiliteit en de mogelijkheid om hoogwaardige producten te maken.

Met een ruwe raffinagecapaciteit van ongeveer 13,2 miljoen vaten per dag<sup>17</sup>, wat neerkomt op 13% van de totale wereldwijde capaciteit<sup>18</sup>, is de EU na de VS<sup>19</sup> de grootste producent van aardolieproducten ter wereld. In de 90 raffinaderijen van de EU werken 120.000 mensen. Indirect werken er in totaal 1,2 miljoen mensen. De vervoerssector in de EU wordt momenteel voor 95% voorzien van vloeibare (fossiele) brandstoffen<sup>20</sup> en is verantwoordelijk voor meer dan 25% van de BKG-emissies in de EU<sup>21</sup>.

In het afgelopen decennium, ongeveer vanaf 2007, heeft de raffinagesector in de EU een krimpende markt gekend, als gevolg van de veranderende marktvaart en de concurrentie van modernere raffinaderijen buiten Europa. In totaal zijn ongeveer 20 raffinaderijen gesloten of omgebouwd tot bioraffinaderijen, en een aantal raffinaderijen hebben de capaciteit verminderd. Dit heeft geleid tot een daling van het aantal raffinaderijen van 110 naar 90.

Vanaf 2015 zijn de winsten toegenomen, waardoor de sluiting van de Europese raffinaderijen werd vertraagd. De modernisering van de Europese raffinaderijen heeft het mogelijk gemaakt om zwaardere en meer vervuilde ruwe olie te verwerken.

## 6.2 Koolstofreductie in fossiele raffinaderijen

Vanwege de noodzaak om de koolstofuitstoot in het milieu te verminderen, zoals overeengekomen in het Parijsakkoord van 2016, heeft de EU gestreefd naar de ontwikkeling van hernieuwbare alternatieven voor fossiele transportbrandstoffen, zoals biobrandstoffen. Biobrandstoffen zijn vloeibare of gasvormige transportbrandstoffen, zoals biodiesel en bio-ethanol, die uit biomassa worden gemaakt. Ze dienen als een hernieuwbaar alternatief voor fossiele brandstoffen in de vervoerssector van de EU en dragen zo bij tot de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen en de verbetering van de voorzieningszekerheid van de EU.

In de richtlijn hernieuwbare energie (RED, 2009/28/EG) is bepaald dat de EU tegen 2020 10% van de transportbrandstof van elk EU-land uit hernieuwbare bronnen, zoals biobrandstoffen, moet halen. De brandstofleveranciers moeten ook de BKG-intensiteit van de brandstofmix van de EU tegen 2020 met 6% verminderen ten opzichte van 2010.

De oorspronkelijke RED werd in 2018 bijgewerkt tot de herziene richtlijn inzake hernieuwbare energie (RED II, 2018/2001/EU)<sup>22</sup>, die werd gepubliceerd als onderdeel van het pakket "Schone energie voor alle Europeanen". In de RED II is bepaald dat elke lidstaat de brandstofleveranciers moet verplichten ervoor te zorgen dat het aandeel hernieuwbare energie van het totale eindverbruik in de transportsector ten minste 14% bedraagt voor 2030.

Het is -ook binnen de sector zelf- aanvaard dat een **belangrijke uitdaging van de raffinagesector** is hoe de overgang naar een koolstofarme economie moet worden geregeld<sup>23</sup>. De Europese platformorganisatie van raffinaderijen, FuelsEurope, heeft in 2018

<sup>17</sup> <https://www.concawe.eu/refineries-map/>

<sup>18</sup> [https://www.eni.com/docs/it\\_IT/eni-com/azienda/fuel-cafe/WORLD-OIL-REVIEW-2018-Volume-1.pdf](https://www.eni.com/docs/it_IT/eni-com/azienda/fuel-cafe/WORLD-OIL-REVIEW-2018-Volume-1.pdf)

<sup>19</sup> <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/oil-gas-and-coal/oil-refining>

<sup>20</sup> [www.fuelseurope.eu](http://www.fuelseurope.eu)

<sup>21</sup> <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-10>

<sup>22</sup> [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC)

<sup>23</sup> <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Highlights%20%26%20summary%20of%20the%206th%20EU%20Refining%20Forum%20FINAL.pdf>

haar eigen visiedocument "Vision 2050"<sup>24</sup> uitgebracht, waarin zij haar visie op een koolstofarme toekomst voor de raffinage-industrie toelicht. De belangrijkste punten van deze visie zijn:

- De raffinage-industrie in de EU verklaart dat zij vastbesloten is een bijdrage te leveren aan de doelstelling van de EU om wereldwijd het voortouw te nemen bij het aanpakken van de problemen in verband met de klimaatverandering. Dit zal gebeuren door de CO<sub>2</sub>-uitstoot te blijven verminderen en de economie en de consumenten te voorzien van koolstofarme brandstoffen en andere producten waar de samenleving behoefte aan heeft.
- Op langere termijn wordt verwacht dat hernieuwbare koolwaterstoffen essentieel zullen blijven voor chemische grondstoffen, scheepvaart, luchtvaart en een deel van de zware vrachtvoertuigen.
- Er wordt een toename verwacht van het gebruik van nieuwe grondstoffen, zoals hernieuwbare energiebronnen, afval en afgevangen CO<sub>2</sub>, in een zeer efficiënt industriecomplex in synergie met andere sectoren, zoals de chemie, de stadsverwarming, etc.
- Er zullen veel technologieën nodig zijn voor de productie van koolstofarme vloeistoffen met het potentieel om in alle vervoerssegmenten een lage uitstoot te realiseren, zoals duurzame biobrandstoffen, CCS/CCU, hernieuwbare waterstof en power-to-liquids.
- Er wordt verwacht dat in 2050 vloeibare brandstoffen met een laag koolstofgehalte de netto BKG-uitstoot van personenauto's en bestelwagens met 87% kunnen verminderen ten opzichte van 2015.

Uit deze punten blijkt dat de Europese raffinagesector zijn koolstofuitstoot aanzienlijk wil verminderen en dat bio-energie en biobrandstoffen als onderdeel van deze oplossing worden gezien.

### ***Retrofitmogelijkheden***

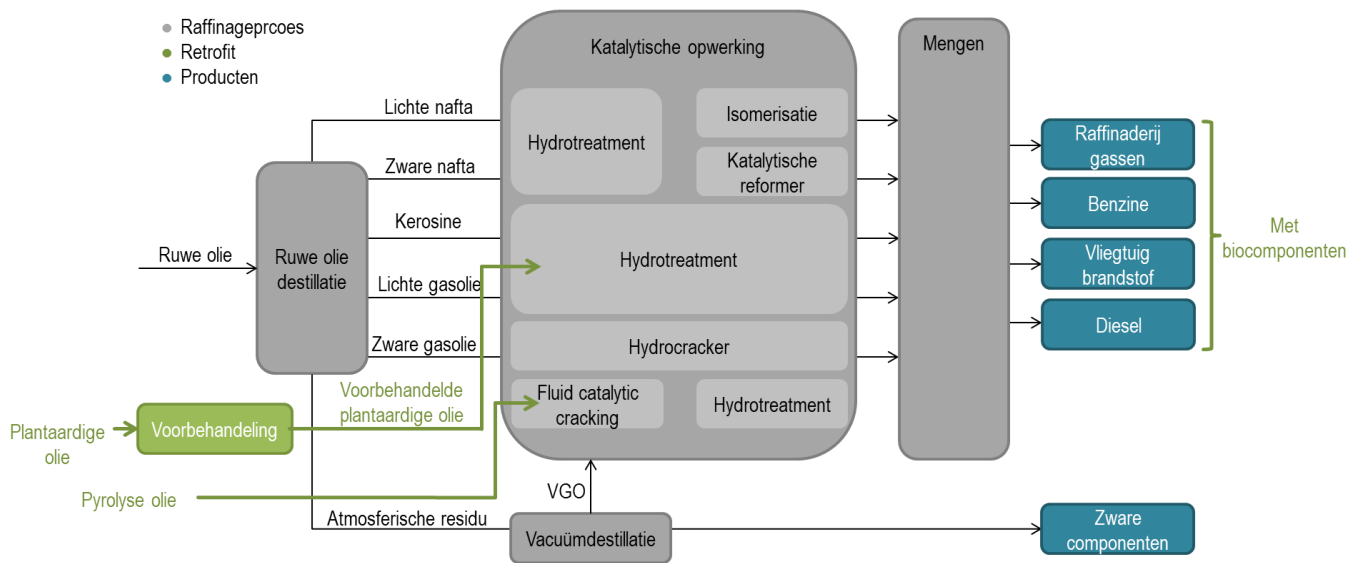
Zoals de raffinaderijsector erkent, is het retrofitten van bio-energie een manier om de productie van hernieuwbare transportbrandstoffen in deze sector te verhogen. De belangrijkste technologie om dit doel te bereiken is de **hydroverwerking** van hernieuwbare vloeibare oliën, zoals palmolie en gebruikte bak- en braadolie, en deze op te waarderen tot hernieuwbare transportbrandstoffen in raffinaderijen. Deze 'groene biobrandstoffen' worden ook wel HVO (Hydrogenated Vegetable Oils) genoemd. Er zijn al verschillende raffinaderijen aangepast om HVO te produceren.

Andere technologieën zijn minder goed ontwikkeld. De belangrijkste routes voor de omzetting van lignocellulosehoudende materialen in brandstoffen omvatten verschillende vormen van thermochemische omzettingen zoals thermische pyrolyse, katalytische pyrolyse, hydrolyse, hydrothermische liquefactie en liquefactie in koolwaterstofoplosmiddelen (Perkins et al. 2019). Een van de meest veelbelovende manieren om het aandeel van hernieuwbare brandstoffen te vergroten is **co-feeding van de hernieuwbare biovloeistof pyrolyse-olie** in raffinaderijen.

Deze technologieën worden uitgelegd in de volgende paragrafen en zijn weergegeven in Figuur 23.

---

<sup>24</sup> <https://www.fuelseurope.eu/vision-2050/>



**Figuur 23: Integratie van plantaardige olie en pyrolyse-olie in een raffinageproces.**

### 6.3 HVO-integratie

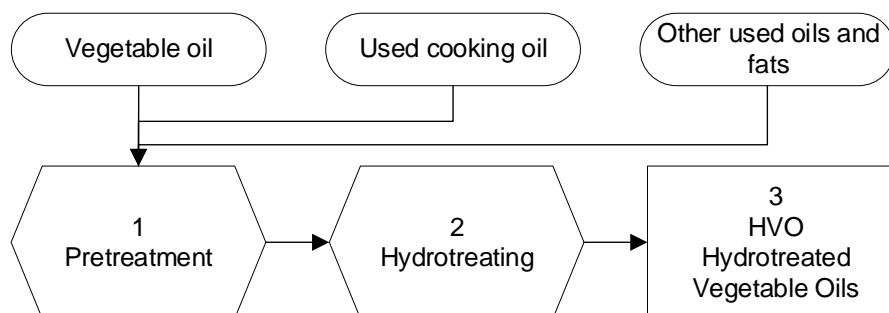
Een synoniem voor **HVO** (gehydrogeneerde plantaardige oliën) is **HEFA** (hydro-verwerkte esters en vetzuren). HVO/HEFA worden anders geproduceerd dan 'traditionele biodiesel', die ook wel **FAME** (Fatty Acid Methyl Esters) wordt genoemd. Het traditionele biodieselproductieproces omvat een chemische reactie (transesterificatie) van vetten of oliën met methanol in speciale installaties voor de productie van biodiesel. Deze transesterificatie resulteert in biodiesel (de FAME) en een bijproduct, glycerol.

Het productieproces van het HVO is vereenvoudigd weergegeven in Figuur 24. Grondstoffen zijn plantaardige oliën, gebruikte bak- en braadoliën of andere gebruikte oliën en vetten. Na een voorbehandeling om onzuiverheden te verwijderen, vindt de HVO-productie plaats in twee **processtappen**<sup>25</sup>.

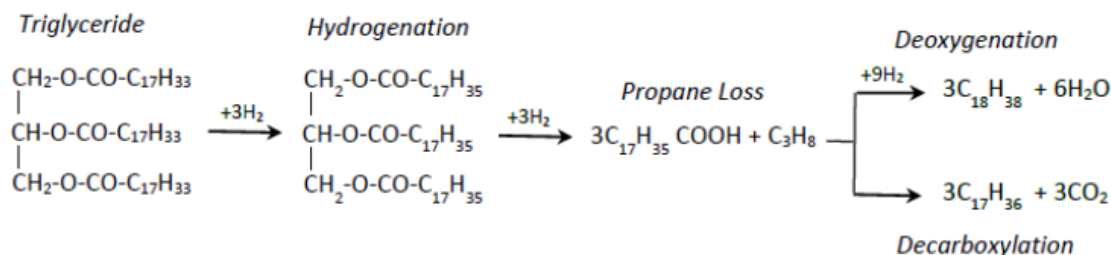
In de eerste stap (Figuur 25), de zogenaamde **hydroverwerking**, worden de oliën en vetten omgezet in paraffinen. Paraffinen zijn eenvoudige koolwaterstofketens, ook wel alkanen genoemd. Alkanen zijn relatief eenvoudige moleculen, bestaande uit verzadigde koolstof- en waterstofmoleculen, vandaar de naam koolwaterstoffen. Dit proces vindt plaats bij reactietemperaturen van 300°C en 390°C. Waterstof wordt toegevoegd aan de oliën en vetten, bijvoorbeeld aan triglyceriden, om de dubbele bindingen te verwijderen. Vervolgens wordt waterstof gebruikt om het molecuul te splitsen in een eenvoudige keten, met als bijproduct propaan (ook wel bioLPG genoemd). Zuurstof wordt dan verwijderd als water (deoxygenatie) of als CO<sub>2</sub> (decarboxylering).

In de tweede stap, de **isomerisatie**, worden de paraffinen gekraakt en geïsomeriseerd zodat de groene diesel (hoofdproduct) voldoet aan de vereiste koude-eigenschaps-eisen. Bijproducten zijn groene nafta en groene luchtvaartbrandstof. HVO's lijken veel meer op de dieselfractie bij de destillatie van ruwe olie dan FAME. HVO bevat geen zuurstof, geen dubbele bindingen, geen aromaten en geen zwavel (Forschungszentrum Jülich, 2019). Er is aangetoond dat grondstoffen met een hoge verzadigingsgraad gunstiger zijn, omdat er tijdens de hydrogenering minder waterstof nodig is (Mittelbach, 2015).

<sup>25</sup><http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/conventional-technologies/hydrotreatment-to-hvo>



**Figuur 24: Vereenvoudigde weergave van het HVO-proces**



**Figuur 25: Hydroverwerking van oliën en vetten; stap één van het tweestapsproces voor de productie van HVO**

De productie van HVO is commercieel bewezen en er zijn verschillende bedrijven die de technologie een licentie geven<sup>26</sup>, zoals Axens IFP (Vegan), Honeywell UOP (Green Diesel), Neste (NextBTL), Haldor Topsoe (Hydroflex) en ENI (Ecofining).

Een breed scala aan oliën en vetten kunnen gebruikt worden voor de productie van HVO:

- Plantaardige oliën, waaronder olie van voedingsgewassen zoals koolzaad, zonnebloemolie, soja, palmolie, maar ook niet-eetbare oliën zoals jatropa- en tabaksolie.
- Dierlijke vetten, zoals talg, wit vet en kippenvet
- Afgewerkte oliën, zoals gebruikte kook- en bakolie (UCO)
- Microbiële oliën

De meeste van deze grondstoffen zijn tryglyceriden, wat betekent dat de HVO-productie als bijproduct bioLPG oplevert. Sommige grondstoffen, zoals palmvetzuurdistillaat (PFAD) en tall olie zijn enkelvoudige vetzuren en leveren geen bioLPG op als bijproduct<sup>27</sup>.

De HVO-productie kan stand-alone worden toegepast, maar kan ook in omgebouwde fossiele raffinaderijen worden gebruikt (retrofit). Tabel 6 geeft een overzicht van de lopende en geplande projecten voor HVO-productie<sup>28</sup>:

**Tabel 6: Huidige en geplande HVO-productie in Europa**

Exploitant	Locatie	Type	Status	Capaciteit (t/jaar)
<b>PREEM</b>	Gothenburg (Zweden)	stand-alone	Operationeel	100.000
<b>ST1</b>	Gothenburg (Zweden)	stand-alone	Gepland	100.000
<b>Sunpine</b>	Pitea (Zweden)	stand-alone	Operationeel	100.000
<b>UPM</b>	Lappeenranta	stand-alone	Operationeel	100.000
<b>UPM</b>	Kotka (Finland)	stand-alone	Gepland	500.000

<sup>26</sup> [https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste\\_renewable\\_diesel\\_handbook.pdf](https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf)

<sup>27</sup> <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/2/250/pdf>

<sup>28</sup> Argus, HVO production and outlook 2019 map, <https://www.argusmedia.com/en/bioenergy/argus-biofuels>

<b>Neste</b>	Porvoo (Finland)	stand-alone	Operationeel	580.000
<b>Neste</b>	Rotterdam (Nederland)	stand-alone	Operationeel	1.000.000
<b>Galp</b>	Sines (Portugal)	stand-alone	Operationeel	72.000
Totale operationele stand-alone productie				<b>1.952.000</b>
<b>BP</b>	Castellon (Spain)	Retrofit	Operationeel	80.000
<b>Repsol</b>	various (Spain)	Retrofit	Operationeel	200.000
<b>Cepsa</b>	La Rabida (Spain)	Retrofit	Operationeel	43.000
<b>Cepsa</b>	San Roque (Spain)	Retrofit	Operationeel	43.000
<b>ENI</b>	Venice (Italy)	Retrofit	Operationeel	300.000
<b>ENI</b>	Gela (Italy)	Retrofit	Gepland	600.000
<b>Total</b>	La Mede (France)	Retrofit	Gepland	500.000
Totale operationele productie in raffinaderijen				<b>666.000</b>
Totale operationele capaciteit				<b>2.618.000</b>
Totale operationele en geplande capaciteit				<b>4.318.000</b>

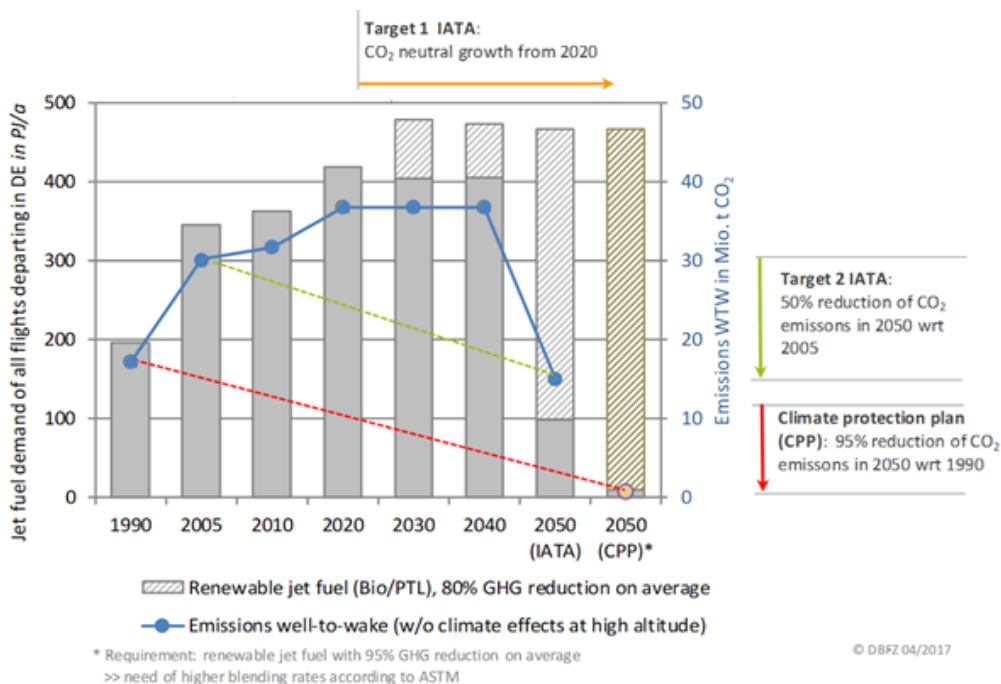
De HVO-eigenschappen kunnen worden beïnvloed door het verbeteren van de reacties met behulp van verschillende katalysatoren en het veranderen van de reactiecondities, zoals temperatuur en druk. Daarom kunnen de **HVO-eigenschappen** worden aangepast aan verschillende industriële behoeften, zodat het mogelijk is om brandstoffen te verkrijgen die voldoen aan de specificaties van luchtvaartbrandstoffen.

FAME en HVO hebben **verschillende stofeigenschappen**. Omdat FAME een ester is, is de chemische samenstelling ervan anders dan die van fossiele diesel, wat in de praktijk betekent dat het gebruik ervan beperkt is tot een maximumpercentage van 7% in de EU (de "blend wall"). Dit maximum is vastgesteld vanwege mogelijke problemen in motoren, zoals schade aan specifieke onderdelen, koolstofophoping in de motor of absorptie van water, wat zou leiden tot groei van microben in de brandstoftank. Andere problemen met FAME zijn het relatief hoge vriespunt. HVO heeft deze problemen niet, omdat het sterk lijkt op fossiele diesel.

HVO kan zowel voor het **wegvervoer** als voor de **luchtvaart** worden gebruikt. Het gebruik van HVO voor de luchtvaartsector is bewezen door verschillende tests met verschillende vliegtuigen en bedrijven. HVO is al sinds 2011 gecertificeerd door de internationale ASTM-standaard D7566. Volgens deze norm is een mengpercentage van 50% mogelijk (Isfort et al., 2012). Hoewel de technologieën beschikbaar zijn, wordt HVO voor de luchtvaart tot nu toe alleen geproduceerd in batches voor specifieke tests. Een voorbeeld is de test van Neste Renewable Aviation Fuel op grotere schaal met 1.187 vluchten van Lufthansa tussen Frankfurt en Hamburg en één intercontinentale vlucht naar Washington DC in 2011. Binnen deze tests zijn geen complicaties opgetreden en is het commerciële gebruik in de toekomst bewezen (Neste Oil, 2012).

Bij gebrek aan andere alternatieven zullen duurzame luchtvaartbrandstoffen in de toekomst nodig zijn voor klimaatvriendelijk vliegverkeer (Zech et al., 2014). Er wordt gezocht naar kerosineachtige alternatieve brandstoffen met drop-in eigenschappen, omdat deze weinig tot geen aanpassing vergen van de brandstofinfrastructuur en de vliegtuigen. Drop-in biobased luchtvaartbrandstoffen maken het ook mogelijk om fossiele kerosine te mengen met alternatieve brandstoffen. Figuur 26 toont de vraag naar luchtvaartbrandstof van alle vluchten die in Duitsland vertrekken (grijze balken) en de bijbehorende uitstoot van CO<sub>2</sub> (blauwe lijn). Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot bij een toenemende vraag naar luchtvaartbrandstof te verminderen, is het noodzakelijk om met duurzame luchtvaartbrandstoffen te vliegen. Om de ambitieuze doelstellingen van de International Air Transport Association (IATA, groene lijn) en het klimaatbeschermingsplan van de Duitse regering (rode lijn) te halen, zijn in de toekomst grote hoeveelheden duurzame luchtvaartbrandstoffen nodig.





**Figuur 26: Vraag naar luchtvaartbrandstof van alle vluchten vanuit Duitsland (Dietrich et al., 2017)**

De **kosten** voor de productie van HVO's zijn geschat door middel van een breder opgezette studie naar de kosten van biobrandstoffen<sup>29</sup>. In deze studie werd vastgesteld dat de productiekosten van HVO-brandstoffen tussen 600 - 1.100 €/ton liggen, of 14 - 25 €/GJ. De voornaamste kosten, 60% tot 80%, zijn de kosten voor de grondstof. De kosten voor HVO liggen aan de ondergrens van het spectrum in vergelijking met de kosten voor andere biobrandstoffen. De kosten voor biobrandstoffen uit biomethaan zouden lager kunnen zijn (11 - 34 €/GJ), maar alle andere biobrandstoffen, zoals cellulose-ethanol, FT-vloeistoffen, etc., vertonen hogere kostenmarges.

In de komende jaren kan een aanzienlijke uitbreiding van de productie worden verwacht. Redenen hiervoor zijn het lage vriespunt van HVO, geen 'blend wall' en de mogelijkheden om HVO als luchtvaartbrandstof te gebruiken. De apparatuur die nodig is voor de productie van HVO is vergelijkbaar met de apparatuur die wordt gebruikt voor de ontzweving van fossiele ruwe olie. Daarom is deze technologie geschikt voor retrofit in fossiele raffinaderijen.

Momenteel bedraagt het HVO-aandeel van de biodieselpductie in de EU 17% (2018). Uit Tabel 6 blijkt dat de operationele capaciteit van de raffinaderijen momenteel veel kleiner is dan de stand-alone capaciteit, maar dit zal in de toekomst aanzienlijk toenemen.

Een voorbeeld van een **HVO-project** is de Total-raffinaderij La Mède in Frankrijk. Sinds 2015 heeft Total de raffinaderij voor fossiele brandstoffen omgebouwd tot een bioraffinaderij. Tegenwoordig heeft de raffinaderij een capaciteit van 500.000 ton HVO-biodiesel. De start van de productie was in juli 2019. In de toekomst kan ook luchtvaartbrandstof worden geproduceerd (Total, 2019). Een ander voorbeeld is het project van Eni in Gela, Italië. Buiten Europa zijn de HVO-productievolumes kleiner. In Noord-Amerika zal naar verwachting 1.155.000 ton geproduceerd worden in 2020, wat een vergelijkbare hoeveelheid is als in Azië. In Azië wordt het grootste volume (800.000 ton/jaar) geproduceerd in de Neste NExBTL-fabriek in Singapore<sup>30</sup>.

<sup>29</sup> EU DG Mobility and Transport, „Building up the future – Cost of Biofuels“ (2018) <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/13e27082-67a2-11e8-ab9c-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>

<sup>30</sup> <https://www.chemicals-technology.com/projects/neste-oil-plant/>

De aanvoer van grondstoffen zal echter een uitdaging vormen, aangezien de RED II-richtlijn de eerste generatie biobrandstoffen, op basis van gewassen, aan een limiet stelt en bovendien verschillende lidstaten, met name Frankrijk en Noorwegen, vanaf 2020 geen brandstoffen op basis van palmolie meer als biobrandstof mogen gebruiken. Tweede generatie grondstoffen op basis van afval bevinden zich niet in landen met een groot aanbod en de landen buiten Europa (China, VS, India) waar veel afval wordt ingezameld, kunnen de lokale consumptie van biodiesel op basis van afval verhogen.

Een meer algemene uitdaging is de veranderende brandstofmix in Europa. Terwijl het kerosineverbruik de komende 10 jaar zal toenemen, zal het dieselverbruik gestaag afnemen, van 53% tegenwoordig tot 33% in 2050 <sup>31</sup>.

#### 6.4 Integratie van pyrolyse-olie in raffinaderijen

Pyrolyse is een proces waarbij biomassa wordt verhit in afwezigheid van lucht/zuurstof. Onder deze omstandigheden ontleedt het organisch materiaal en vormt het dampen, gassen en houtskool. De dampen kunnen worden gecondenseerd tot het hoofdproduct: pyrolyse-olie. Om de vloeistofproductie te maximaliseren moet de verwarming van de biomassa en de condensatie van de damp snel gebeuren. Vandaar de naam snelle pyrolyse. Als alternatief kan de biomassaconversie worden gericht op de productie van houtskool. In dit geval is de verwarming minder snel en wordt het proces langzame pyrolyse of carbonisatie genoemd. Dit laatste gebeurt meestal bij temperaturen onder 400° C.

Snelle pyrolyse is bedoeld om de biomassa om te zetten in een maximale hoeveelheid vloeistof van ongeveer 60 tot 70 wt.% van de grondstof. Op die manier wordt een uniform, stabiel en schoner brandend product verkregen, dat kan dienen als tussenliggende energiedrager en grondstof voor verdere verwerking. De **essentiële procesvoorwaarden** voor snelle pyrolyse voor de productie van pyrolyse-olie zijn:

- een zeer snelle opwarming van relatief kleine biomassa-deeltjes (seconden),
- de temperatuur van de pyrolyse-reactor te houden op ongeveer 500°C,
- een korte dampverblijfsduur om het kraken van gassen te voorkomen,
- snelle afkoeling van alle dampen om de gewenste pyrolyse-olie te vormen.

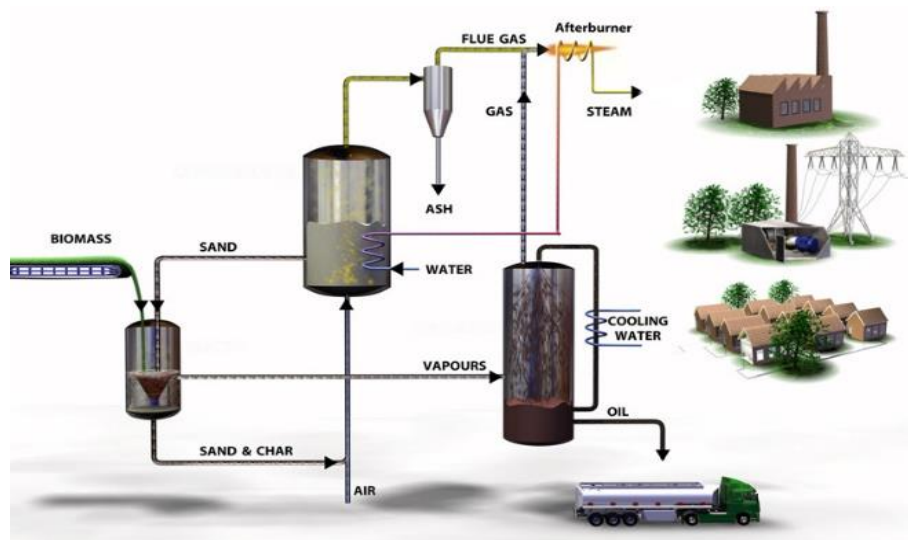
Verschillende **soorten reactoren** zijn getest in Europese en Amerikaanse laboratoria. Zo zijn er de vortex reactor, 'rotating blades' reactor, roterende conus reactor, 'cyclone' reactor, 'transported bed' reactor, vacuüm reactor en de gefluïdiseerde bed reactor. In de jaren '80 en '90 van de vorige eeuw zijn veel proefinstallaties opgezet. Om verschillende redenen zijn de meeste proeffabrieken echter niet meer in bedrijf. Aan de andere kant zijn er ook enkele succesvolle voorbeelden te vinden. Een daarvan is het circulerend gefluïdiseerde bed proces van Ensyn dat al jaren wordt gebruikt om "liquid smoke" te produceren. De samenwerking tussen Ensyn en UOP resulteerde in de start van Envergent, dat zich richt op de productie van biobrandstoffen. Een ander succesvol voorbeeld is het proces dat bij BTG is ontwikkeld met behulp van een roterende conus (Figuur 28).



Figuur 27: Pyrolyse olie

<sup>31</sup> Greenea Conference presentation, May 2019, Denver, USA, <https://www.greenea.com/en/publications/>

De technologie op basis van de roterende conus is met succes toegepast op de pyrolyse van lege trossen fruit en in Nederland op de pyrolyse van houtachtige restbiomassa (EMPYRO). De EMPYRO-installatie is in 2015 in gebruik genomen, waarbij het grootste deel van de pyrolyse-olie naar Friesland Campina wordt getransporteerd voor het opwekken van industriële warmte. Na drie jaar succesvolle ingebruikname draait de EMPYRO-fabriek nu op volle capaciteit en is deze overgenomen door Twence.



**Figuur 28: Artistieke impressie van het pyrolyseproces op basis van de roterende conus techniek (Bron: BTG)**

Pyrolyse biedt de mogelijkheid om de brandstofproductie los te koppelen van de verwerking van de biomassa wat betreft tijd, plaats en schaal, eenvoudige verwerking van de vloeistoffen, en een meer consistente kwaliteit in vergelijking met vaste biomassa. Met snelle pyrolyse wordt een schone vloeistof geproduceerd (Figuur 27) als tussenproduct dat geschikt is voor een grote verscheidenheid aan toepassingen, waaronder co-feeding in raffinaderijen.

De **eigenschappen van pyrolyse-olie** (Tabel 7) zijn heel anders dan die van minerale olie. De olie bevat meestal een lage hoeveelheid as en een aanzienlijke hoeveelheid water, pyrolyse-olie is tenslotte een emulsie. De volumetrische energiedichtheid is 5 tot 20 keer hoger dan de oorspronkelijke biomassa waaruit het wordt geproduceerd. De dichtheid is hoger dan die van stookolie en aanzienlijk hoger dan die van biomassa. De HHV van pyrolyse-olie is 16-23 MJ/l, wat veel lager is dan stookolie die een typische stookwaarde van 37 MJ/l heeft. Pyrolyse-olie is zuur, met een pH van 3. Het is een roodbruine vloeistof met een geur die lijkt op barbecuesmaak. Door de grote hoeveelheid zuurstofhoudende componenten heeft de olie een polair karakter en mengt zich niet makkelijk met koolwaterstoffen.

**Tabel 7: Eigenschappen van een batch pyrolyse-olie (Bron: BTG)**

Eigenschap	Eenheid	Waarde
<b>C</b>	wt%	46
<b>H</b>	wt%	7
<b>N</b>	wt%	<0,01
<b>O (Balans)</b>	wt%	47
<b>Watergehalte</b>	wt%	25
<b>Asgehalte</b>	wt%	0,02
<b>Vaste stof gehalte</b>	wt%	0,04
<b>Dichtheid</b>	kg/l	1,2

<b>LHV</b>	MJ/kg	16
<b>LHV</b>	MJ/l	19
<b>pH</b>	-	2,9
<b>Kinematische viscositeit (40°C)</b>	cSt	13

Er worden ook **bijproducten** in de vorm van kool en niet-condenseerbare gassen geproduceerd. In een industrieel proces zouden deze twee bijproducten (beide 10 tot 20 wt.%) voornamelijk gebruikt worden als brandstof voor de opwekking van de benodigde proceswarmte (inclusief het drogen van grondstoffen). Soms wordt voorgesteld om de houtskool toe te passen als bodemverbeteraar of als vervanger van metallurgische cokes in de staalindustrie. Ook kan het voor specifieke doeleinden (en redenen) worden hergebruikt met de pyrolyse-olie om een **houtskool-olie** te vormen.

Het gasvormige bijproduct is in principe een mengsel van CO en CO<sub>2</sub>. Afgezien van de rookgasuitstoot en de as als gevolg van verbranding van houtskool zijn er geen afvalstromen. De biomassa-as zal grotendeels geconcentreerd zijn in de houtskool. Het wordt gescheiden wanneer de houtskool in het proces wordt verbrand, dat wil zeggen om warmte voor het drogen en verwarmen van de biomassa te genereren.

Bijna alle soorten biomassa zijn geschikt als **grondstof** voor pyrolyse. De belangrijkste eisen voor het snelle pyrolyseproces is dat de biomassa relatief droog is (minder dan 6-8% vochtgehalte) en een relatief kleine omvang heeft van enkele millimeters.

Hout en houtresten zijn zeer geschikt voor pyrolyse, maar ook veel andere soorten biomassa zoals rijstschil, bagasse, slib, tabak, energiegewassen, palmolieresiduen, stro, olijfsteenresten, kippenmest en vele andere kunnen worden gebruikt. Het type biomassa/residu beïnvloedt de opbrengst en kwaliteit van de pyrolyse-olie. Meestal geeft houtachtige biomassa de hoogste opbrengst.

Aangezien slechts weinig soorten biomassa bij de oogst voldoen aan de twee criteria grootte en vochtgehalte voor de productie van pyrolyse-olie in commerciële fabrieken, is een voorbehandeling van de biomassa vereist. Deze voorbehandeling kan worden voorzien van stroom door middel van de overmaat aan warmte en elektriciteit van de pyrolyse-installatie, zolang het vochtgehalte niet boven een bepaalde grenswaarde van ongeveer 55-60 wt.% uitkomt.

De productie van pyrolyse-olie wordt momenteel op verschillende plaatsen in Europa uitgevoerd:

- De EMPYRO-pyrolyse-installatie in Hengelo zet 5 ton per uur droge houtachtige biomassa om in pyrolyse-olie. De fabriek is in 2015 gebouwd en heeft in 2018 de volledige productie - 24.000 ton pyrolyse-olie per jaar - behaald. De pyrolyse-olie wordt momenteel verbrand met aardgas voor de productie van stoom in de nabijgelegen zuivelfabriek van FrieslandCampina in Borculo (Nederland). Momenteel (2019) bouwt het consortium achter de Empyro-fabriek, een samenwerking tussen de bedrijven BTG-BTL en TechnipFMC<sup>32</sup>, een tweede grootschalige fabriek in Finland<sup>33</sup>.
- Fortum en Valmet hebben een installatie voor de productie van pyrolyse-olie van 50.000 ton gerealiseerd, die geïntegreerd is met de WKK-installatie van Joensuu in Finland. De pyrolyse-installatie is in 2013 in gebruik genomen. De grondstoffen omvatten bosresiduen en andere soorten biomassa op basis van hout. De handelsnaam van de pyrolyse-olie van Fortum is Fortum Otso<sup>34</sup>.

<sup>32</sup> <https://www.btg-btl.com/en/technology>

<sup>33</sup> <https://bioenergyinternational.com/biofuels-oils/finland-first-for-dutch-pyrolysis-technology-developers>

<sup>34</sup> <https://www.fortum.com/products-and-services/power-plant-services/fortum-otso-bio-oil>

- Naast deze twee fabrieken zijn er verschillende fabrieken operationeel buiten Europa, gebaseerd op het Ensyn/Honeywell UOP-platform. Er zijn drie pyrolysefabrieken voor de productie van hernieuwbare brandstoffen gebouwd, namelijk in Ontario (Canada), de pyrolysefabriek Red Arrow Products in Wisconsin (VS) en het recente AE Cote-Nord-project in Montreal (Canada).



**Figuur 29: De Empyro pyrolysefabriek in Hengelo, Nederland**

### **Retrofitmogelijkheden**

Pyrolyse-olie is een relatief homogene vloeistof die uit verschillende soorten vaste biomassa kan worden geproduceerd. Daarom is het in principe geschikt voor co-feeding in raffinaderijen, omdat raffinaderijen geschikt zijn om vloeistoffen te verwerken en omdat raffinaderijen grootschalige installaties zijn die grote hoeveelheden input nodig hebben. Voor normale volumineuze biomassa brengt dit logistieke uitdagingen met zich mee, maar de energiedichtheid van pyrolyse-olie is zodanig dat transport over grotere afstanden voordelig wordt.

Een belangrijke technische barrière met betrekking tot co-feeding van pyrolyse-olie is het zuurstofgehalte. Aangezien pyrolyse-olie wordt geproduceerd door een relatief eenvoudige thermische afbraak van biomassa, is veel van de in de biomassa aanwezige zuurstof ook aanwezig in de pyrolyse-olie. Het moet geheel of gedeeltelijk worden verwijderd om transportbrandstoffen te kunnen produceren.

Er zijn verschillende manieren om pyrolyse-olie te gebruiken in een raffinaderij.

- De pyrolyse-olie kan worden toegevoerd aan de FCC (Fluid Catalytic Cracker) van de raffinaderij. Dit is op pilotschaal uitgevoerd door Petrobras in Brazilië.
- Voorbehandelen van de pyrolyse-olie, zodat een deel van de aanwezige zuurstof wordt verwijderd door een hydrodeoxygenatie stap die wordt uitgevoerd in een katalytisch hydrobehandelingsproces. Hierdoor ontstaat een geavanceerde vorm van pyrolyse-olie die gemakkelijk in een raffinaderij kan worden gebruikt. Omdat voor volledige deoxygenatie veel waterstof nodig is, is een alternatieve aanpak om de pyrolyse-olie slechts gedeeltelijk te de-oxideren en de omzetting naar transportbrandstof in een raffinage-unit voor ruwe olie in een bestaande raffinaderij uit te voeren.

Het bewezen concept voor het toedienen van deze opgewaardeerde pyrolyse-olie aan een FCC werd voor het eerst gedemonstreerd in het EU FP6-project BIOCOP dat in 2010 werd afgesloten. Dit werd verder ontwikkeld in het EU FP7-project FASTCARD, dat gericht was op een efficiëntere omzetting van biomassa in biobrandstoffen door het verbeteren van katalysatoren. Er werd geconcludeerd dat co-FCC van opgewaardeerde pyrolyse-olie technisch mogelijk is. Momenteel (2019) wordt de co-feeding van pyrolyse-olie in raffinaderijen verder onderzocht in het H2020-project 4refinery<sup>35</sup>.

Wat het FCC-productenspectrum betreft, treden er geen onverwachte afwijkingen op. Het hangt alleen af van de mate waarin de pyrolyse-olie is geüpgraded en de co-feeding verhouding. Meestal wordt de cokes- en gasopbrengst hoger. Wat betreft de mate waarin de pyrolyse-olie in een voorafgaande hydrolysestap is voorbereid (druk, temperatuur, tijdsduur), kunnen drie soorten van pyrolyse afgeleide grondstoffen worden onderscheiden: (1) volledig zuurstofarme, (2) gedeeltelijk zuurstofarme en (3) onbehandelde pyrolyse-olie. Volledig zuurstofarme vloeistoffen zouden zich vergelijkbaar moeten gedragen met de gebruikelijke

<sup>35</sup> <https://www.sintef.no/projectweb/4refinery/>

voeding voor FCC (vacuüm gasolie of VGO), terwijl onbehandelde pyrolyse-olie meer cokes en gas oplevert dan VGO. Uiteraard zal ook de aanvoer van VGO ten opzichte van pyrolyse-olie een sterk effect hebben op het eindresultaat.

De **kosten** van de productie van biobrandstoffen uit co-feeding van pyrolyse-olie zijn onlangs berekend<sup>29</sup>. In deze studie werd geschat dat de productiekosten van biobrandstoffen uit pyrolyse-olie tussen 16 en 29 euro/GJ liggen. Er moet worden opgemerkt dat aangezien co-feeding van pyrolyse-olie in raffinaderijen nog niet commercieel wordt toegepast, er grote onzekerheid bestaat over de kosten. De kosten van de grondstoffen zijn lager in vergelijking met de kosten van de grondstoffen voor HVO, omdat pyrolyse-olie uit lignocellulosehoudende residuen kan worden geproduceerd.

De kosten voor biobrandstoffen die uit pyrolyse-olie worden geproduceerd, liggen aan de onderkant van het spectrum in vergelijking met de kosten voor andere biobrandstoffen. De kosten voor biobrandstoffen uit biomethaan en de kosten voor HVO (zie vorige paragraaf) zouden lager kunnen zijn, maar alle andere biobrandstoffen hebben hogere kostenmarges.

De integratie van pyrolyse-olie in fossiele raffinaderijen is nog niet volledig commercieel. Er zijn echter wel ontwikkelingen geweest om deze optie te commercialiseren:

- **Co-feeding van pyrolyse-olie in de Petrobras pilot-fabriek<sup>36</sup>:** Hier werd onbehandelde pyrolyse-olie, geproduceerd uit dennenhoutsnippen, samen met standaard Braziliaanse vacuüm gasolie (VGO) verwerkt en getest in een 200 kg/uur vloeistofkatalysator (FCC) demonstratie-unit, terwijl er een commerciële FCC-katalysator werd gebruikt. Er werd gebruik gemaakt van co-feeding ratio's van 5% en 10%. Er werd aangetoond dat de co-processing van pyrolyse-olie in een FCC technisch haalbaar was. Zowel de VGO als de pyrolyse-olie werden gekraakt tot transportbrandstoffen zoals benzine en diesel. Zuurstof werd verwijderd als water en CO. Het koolstofgehalte was 30%. Via C14-isotopenanalyse werd de aanwezigheid van hernieuwbare koolstof bevestigd.
- **Co-feeding van pyrolyse-olie in de PREEM-raffinaderij in Lysekil<sup>37</sup>:** De eerste grootschalige co-feeding van pyrolyse-olie in een raffinaderij in Europa is aangekondigd door de bedrijven Preem en Setra. Samen hebben ze een joint venture opgericht, Pyrocell AB, om te investeren in een pyrolyse-olie fabriek in Setra's Kastetzagerij buiten Gävle, Zweden. De nieuwe pyrolyse-installatie, die voor het eerst werd bekendgemaakt in juni 2018, zal pyrolyse-olie produceren met behulp van zaagsel als grondstof. De fabriek zal naar verwachting eind 2021 operationeel zijn. De pyrolyse-olie zal worden gebruikt als een hernieuwbare biocrude grondstof voor de productie van biobrandstoffen in de raffinaderij van Preem in Lysekil.

## 6.5 Conclusie

Raffinaderijen tonen steeds meer belangstelling voor het koolstofvrij maken van hun producten door het gebruik van biomassa als grondstof. De productie van HVO in bestaande raffinaderijen is hiervan een voorbeeld. Duurzaamheid is een serieus aandachtspunt, aangezien raffinaderijen grootschalige ondernemingen zijn en altijd aanzienlijke hoeveelheden grondstoffen nodig hebben voor de productie van biobrandstoffen.

<sup>36</sup> „Fast pyrolysis oil from pinewood chips co-processing with vacuum gas oil in an FCC unit for second generation fuel production“, Andrea de Rezende Pinho, Marlon B.B. de Almeida, Fabio Leal Mendes, Luiz Carlos Casavechia, Michael S. Talmadge, Christopher M. Kinchi, Helena L. Chumc, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.032>

<sup>37</sup> <https://bioenergyinternational.com/biofuels-oils/setra-and-preem-first-in-europe-with-renewable-fuel-from-sawdust>

De 'blend wall' wordt steeds minder problematisch omdat het nu mogelijk is om biobrandstoffen te produceren met gelijke of zelfs betere eigenschappen in vergelijking met het fossiele alternatief.

Intermediaire bio-energie dragers kunnen een belangrijke rol spelen bij het leveren van voldoende grondstoffen aan raffinaderijen, omdat het transport beter haalbaar is en vanwege de homogeniteit. Sommige waardeketens zijn al op de markt, zoals co-feeding van pyrolyseolie; andere zijn nog in ontwikkeling. Ondersteuning op pilot- en demoschaal en het stimuleren van de marktintroductie is aan te bevelen.

Er moet nog worden gewerkt aan het bepalen van de duurzaamheidsaspecten van de co-feeding van biomassa in een raffinaderij. De huidige C14-methoden werken misschien niet altijd om de hoeveelheden hernieuwbare koolstof in 'groene' raffinaderijproducten te bepalen.

Aangezien raffinaderijen wereldwijd opereren, is het belangrijk dat er een gelijk speelveld is. De duurzaamheidseisen voor hernieuwbare biobrandstoffen moeten worden gehandhaafd voor alle biobrandstoffen, zowel voor binnen als voor buiten Europa.

## 7 Retrofitten van fossiel gestookte elektriciteits- en warmtekrachtcentrales

### 7.1 Overzicht van de sector

Fossiele brandstoffen droegen in 2016 bij aan 65,1% van de wereldwijde bruto-elektriciteitsproductie; alleen steenkool bedroeg al 38,3% van de totale hoeveelheid (IEA, 2019). Vooral door de enorme groei in China en India heeft de geïnstalleerde capaciteit van kolengestookte centrales de 2.000 GW overschreden, meer dan het dubbele van de capaciteit in 2000 (CarbonBrief, 2019).

Dankzij een reeks beleidsmaatregelen die een brede **decarbonisatie** van de energiesector nastreven, is de situatie in Europa heel anders dan in de rest van de wereld. Toch is 19,2% van de elektriciteitsproductie in de EU-28 afkomstig van steenkool en bruinkool (Agora Energiewende en Sandbag, 2019). In 2018 bedroeg de geïnstalleerde capaciteit van de werkende kolencentrales in de EU-28 bijna 155 GW (CarbonBrief, 2019); het grootste kolencentralepark is gelegen in Duitsland (48 GW), gevolgd door Polen (30 GW). Verscheidene EU-lidstaten, Oostenrijk, Denemarken, Finland, Frankrijk, Griekenland, Hongarije, Ierland, Italië, Nederland, Portugal, Slowakije, Zweden en het Verenigd Koninkrijk, hebben afgesproken dat zij hun kolenproductie uiterlijk in 2030 zullen stopzetten. De decarbonisatie-inspanningen zullen echter een grotere uitdaging vormen in verschillende Europese landen waar steenkool bijdraagt tot meer dan 40% van de totale elektriciteitsproductie. Van de EU zijn dit: Duitsland (41%), Bulgarije (45%), Griekenland (46%), Tsjechië (53%) en Polen (80%). De situatie van de meeste niet-EU-lidstaten in Zuidoost-Europa is vergelijkbaar: Montenegro (45%), Bosnië en Herzegovina (63%), Servië (65%), Noord-Macedonië (70%) en Kosovo (97%) (EURACOAL, 2017).

De kolenindustrie heeft al veel ervaring met het bijstoken van biomassa, vanwege de relatief lage CAPEX-eisen, opschaalbare oplossingen en diverse mogelijkheden tot bijstoken. De IEA Bioenergy Task 32 database<sup>38</sup> bevat honderden industriële voorbeelden van bijstoken in Europa en de rest van de wereld. Figuur 32 toont verschillende concepten van bijstoken.

Soms kan de **motivatie** om biomassa mee te stoken in een kolencentrale tijdelijk en puur economisch zijn. Biomassabrandstoffen kunnen in voldoende grote hoeveelheden beschikbaar zijn en de prijzen kunnen concurrerend zijn met die van steenkool (op energiebasis). Een commercieel voorbeeld hiervan is de centrale Gelderland (Nederland), die in 1992 als een van de oudste bijstookcentrales in Europa werd beschouwd en waarbij de bijstook van afvalhout met een warmte-input van 3 - 4% werd gerealiseerd (Koppejan en van Loo, 2012). Door de ontwikkeling van het EU-beleid is echter een meer structurele reeks principes ontstaan voor de toepassing van bio-energie retrofits in kolengestookte centrales. Het gaat onder andere om de strengere emissiegrenswaarden voor kolencentrales, de regeling voor de handel in emissierechten (ETS), waardoor het concurrentievermogen van steenkoolenergie wordt beperkt door het vaststellen van een prijs voor de uitstoot van CO<sub>2</sub>, en de steunregelingen voor bio-energie. Al deze regelingen hebben positieve of negatieve gevolgen gehad voor nutsbedrijven om over te schakelen van steenkool naar bio-energie. Een relevant voorbeeld is de Drax-centrale (VK), waarschijnlijk de grootste biomassacentrale ter wereld (2,6 GW), die ontstaan is door een retrofit van vier van de zes kolengestookte eenheden naar 100% biomassa.

Dergelijke gevallen van bio-energie retrofits brengen hun eigen niet-technische uitdagingen met zich mee, die voornamelijk zorgen voor een adequate en duurzame biomassabevoorrading voor de exploitatie. Dit handboek richt zich op de technische uitdagingen en opties voor bio-energie retrofits van kolencentrales, zoals bijstoken en het

<sup>38</sup> <http://task32.ieabioenergy.com/database-biomass-cofiring-initiatives/>



hergebruiken van biomassa. De technologische opties die zullen worden beschreven, hebben grotendeels de commerciële status bereikt; er moet echter worden opgemerkt dat er nog enkele opties zijn die verdere onderzoeks- en demonstratiewerkzaamheden nodig hebben om grootschalig in de industrie te kunnen worden toegepast.

**Warmtekrachtkoppelingssystemen** (WKK) produceren tegelijkertijd warmte en elektriciteit, waardoor het totale rendement hoger is en de energiebronnen beter worden benut dan bij installaties die alleen warmte of alleen elektriciteit gebruiken, dankzij de besparing op primaire energie. In de EU-28 werd slechts 26% van de elektriciteit uit conventionele thermische energiebronnen (kolen, gas, olie, kernenergie, etc.) opgewekt in WKK-installaties, terwijl deze waarde voor bio-elektriciteit 60% bedroeg (Bioenergy Europe, 2019).

In verschillende Noordse EU-landen - Zweden, Denemarken en Litouwen - wordt (of is) op grote schaal gebruik gemaakt van met fossiele brandstoffen gestookte WKK's tot (vaste) biomassa-WKK's. De belangrijkste brandstof in Zweedse WKK-installaties is bijvoorbeeld biomassa, en Litouwen zal naar verwachting over enkele jaren volgen. Andere mogelijkheden voor retrofitting zijn de vervanging van fossiele olie door vloeibare biobrandstoffen. Een voorbeeld is de Lantmannen Reppe (Zweden) retrofit. Op kleine schaal helpt de Organic Rankine Cycle (ORC)-technologie om systemen die alleen warmte produceren om te zetten in WKK. Een voorbeeld hiervan is de Ronneby Miljöteknik (Zweden) retrofit<sup>39</sup>.

## 7.2 Gebruikte technologieën in de sector

In elektriciteits- en warmtekrachtcentrales op basis van fossiele vaste brandstoffen (en biomassa) is het primaire proces **verbranding** waarbij de chemische energie, die in de brandstof is opgeslagen, wordt omgezet in warmte. De geproduceerde warmte wordt overgedragen aan een verwarmingsmedium, meestal water, dat in stoom verandert. De stoom wordt gebruikt om een turbine te laten draaien, die is aangesloten op een elektrische generator. In het kader van de bio-energie retrofit bepaalt het verbrandingsproces vooral hoe de biomassa in het opwekkingsproces kan worden geïntegreerd. Daarom wordt in dit hoofdstuk dieper ingegaan op de belangrijkste commerciële technologieën voor de verbranding van vaste brandstoffen: de verbranding van poedervormige brandstoffen, gefluïdiseerd bed- en roosterverbranding.

Een belangrijk verschil tussen verbrandingssystemen die gebruik maken van vaste brandstoffen en systemen die gebruik maken van olie of aardgas is het hogere asgehalte van de brandstoffen. Dit heeft gevolgen voor het ontwerp van de oven (die groter moet zijn in het geval van meer as) en vereist de installatie van subsystemen voor de verwerking van brandstofas en voor de controle van de uitstoot van fijnstof.

**Verbranding met verpulverde brandstof (PF)** betreft het stoken van een suspensie van zeer fijne brandstofdeeltjes, ontstaan door vermaling / verpulvering in molens. De verbranding vindt plaats bij temperaturen tussen 1300 en 1700 °C, terwijl de verblijftijd van de deeltjes in de oven minder dan 5 seconden bedraagt; de vereiste voor de grootte van de fijne deeltjes is nodig om een geschikte brandstofconversie gedurende deze tijd te verkrijgen.

Elektriciteitsproductie-eenheden met verpulverde steenkool gebruiken speciaal voor deze brandstof ontworpen ketels. De vaste brandstof in poedervorm wordt net zo makkelijk verbrand als gasvormige brandstof, waardoor het verbrandingsrendement wordt gemaximaliseerd. In het begin wordt het maalsysteem gevoed met de ruwe steenkool, waar deze wordt verpulverd. Vervolgens wordt de poederbrandstof via een brander pneumatisch in de ketel geïnjecteerd, waar deze wordt gemengd met voorverwarmde lucht. Afhankelijk van de eigenschappen van de brandstof zijn er verschillende varianten van de technologie wat betreft de opstelling van het stookstelsel (voorstoken vs. tangentiaal stoken), asverwijdering (droge bodem vs. 'slag-tap' oven) of andere parameters. Het geproduceerde rookgas transporteert zijn warmte door de buiswanden van de ketel en een aantal warmtewisselaars naar stoom, die de stoomturbines

<sup>39</sup> <http://energikontorsydost.se/sorbyverket-i-ronneby>

aandrijft. Het elektrisch rendement van PF-installaties wordt bepaald door de temperatuur en de druk; er kunnen drie categorieën worden gedefinieerd. In volgorde van verhoogde stoomdruk/temperatuur: subkritisch, superkritisch en ultra-superkritisch. Het rendement van deze categorieën varieert van 35% tot 45% (Massachusetts Institute of Technology, 2007).

De PF-technologie is met succes toegepast voor vrijwel alle steenkoolsoorten, die goed zijn voor 90% of meer van de geïnstalleerde kolengestookte capaciteit in de wereld (IEA Clean Coal Centre, 2018). De technologie wordt over het algemeen toegepast in grootschalige installaties; de grootste voorbeelden hebben een geïnstalleerd vermogen van meer dan 1.000 MW<sub>e</sub>.

PF-systemen worden om twee belangrijke redenen niet op grote schaal gebruikt voor nieuwe biomassacentrales. Ten eerste zijn er grote hoeveelheden biomassa nodig om continu te kunnen werken, die lokaal misschien niet beschikbaar zijn. Ten tweede is het vermalen van biomassa tot fijnstof moeilijker en gebruikt het meer energie dan steenkool. Er zijn enkele uitzonderingen, bijvoorbeeld enkele gespecialiseerde systemen voor de verbranding van zaagsel. Aangezien de technologie echter het meest voorkomt bij de verbranding van kolen, zijn de meeste bio-energie retrofits van kolengestookte elektriciteitscentrales PF-systemen. PF-systemen zijn met succes toegepast voor de verbranding van vaste biobrandstoffen, hetzij door gedeeltelijke vervanging van steenkool (bijstook), hetzij door volledige vervanging ervan, meestal door houtpellets.

**Gefluïdiseerd bed (FB)** wordt sinds het begin van de jaren '80 commercieel toegepast; na belangrijke technologische ontwikkelingen wordt het momenteel beschouwd als een "state-of-the-art" technologie voor de verbranding van vaste brandstoffen.

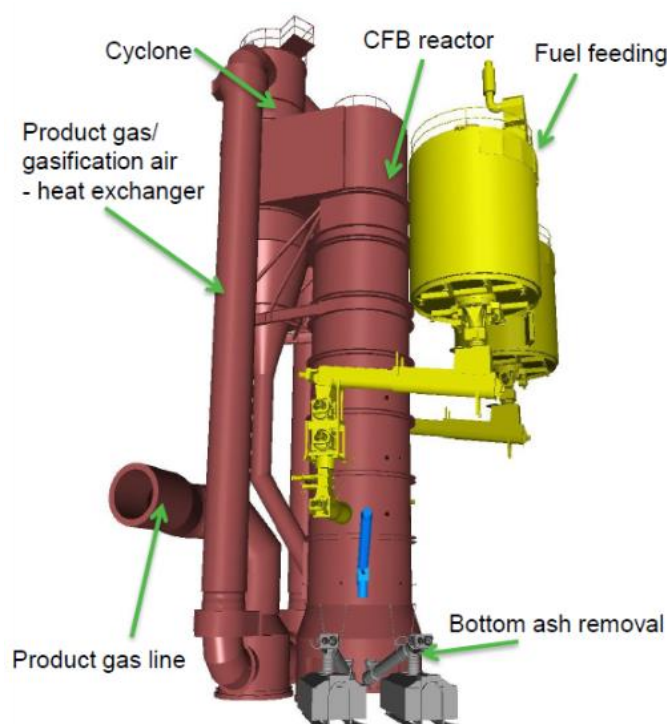
De technologie ontleent zijn naam aan zijn primaire eigenschap: de brandstof wordt samen met een geschikt onbrandbaar vast materiaal, zoals zand, in een oven aangevoerd, terwijl de lucht vanaf de bodem met de juiste snelheid wordt aangevoerd om de deeltjes op te tillen, maar niet genoeg om ze weg te dragen. Hierdoor ontstaat een "fluidized bed", waarin het mengsel van deeltjes en lucht zich gedraagt als in een vloeistoffase. De creatie van het FB zorgt voor een intense menging van de brandstof en de verbrandingslucht, vandaar de zeer hoge omzettingsrendementen, zelfs bij veel lagere verbrandingstemperaturen dan de PF-technologie (ongeveer 800 °C). Door de lage temperaturen wordt minder NO<sub>x</sub>-emissie gegenereerd dan bij andere technologieën. Bovendien kan door het gebruik van een geschikt bedmateriaal, zoals kalksteen of dolomiet, het vrijkomende SO<sub>2</sub> worden opgevangen voordat het in de atmosfeer vrijkomt. Als gevolg daarvan vertonen de FB-systemen een verbeterde emissieprestatie en is het niet nodig om extra de-SO<sub>x</sub>- of de-NO<sub>x</sub>-systemen te installeren (Johnsson, 2007).

Een ander voordeel van FB-systemen is dat ze minder strenge eisen stellen aan de deeltjesgrootte in vergelijking met PF-systemen. Om alle bovengenoemde redenen zijn FB-technologieën vrij populair voor het gebruik van "moeilijke" brandstoffen, zoals sommige laagwaardige kolen en afvalhout.

Een operationeel probleem met FB-systemen is het verlies van de fluïdisatie dit kan bijvoorbeeld gebeuren als de as, die wordt gevormd door de verbranding van brandstof, een lage smelttemperatuur heeft, wat ertoe kan leiden dat materiaaldeeltjes in het bed aan elkaar kleven en een grootte bereiken die niet geschikt is voor de vorming van een gefluïdiseerd bed (het zogenaamde agglomeratieprobleem). Dit is een bekend probleem van de FB-technologie.

Er zijn twee dominante gefluïdiseerd bed varianten op de markt: **Bubbling Fluidized Bed (BFB)** en **Circulating Fluidized Bed (CFB)**. De BFB-systemen zijn eenvoudiger van ontwerp en worden vaak gebruikt in kleinschalige installaties, waarbij gebruik wordt gemaakt van brandstoffen met een hoge vocht-/lage stookwaarde en grotere deeltjes. Kenmerkend voor BFB-systemen is de lagere fluïdisatieluchtsnelheid, waardoor het gefluïdiseerd bed op de bodem van de oven 'stationair' blijft. Aan de andere kant gebruiken CFB-ketels hogere fluïdisatiesnelheden en hebben ze een systeem om het meegevoerde bedmateriaal opnieuw te laten circuleren. CFB-ketels hebben complexere ontwerpen, maar overtreffen de BFB-

varianten op het gebied van zwavelverwijdering, schaalgrootte en verbrandingsefficiëntie (Koorneef et al., 2006). Een schematische tekening van een CFB-systeem is hieronder weergegeven in Figuur 30.



**Figuur 30: CFB geproduceerd door Valmet (Louhimo, 2019)**

Bij de verbranding van een **roosterketel** wordt, zoals de naam al aangeeft, gebruik gemaakt van een rooster. De brandstof bevindt zich op het rooster en in de lucht, de zogenaamde primaire lucht, dat van onder het rooster naar het bed wordt gevoerd. Het rooster kan zowel uit een vlak oppervlak bestaan, met als nadeel dat de as handmatig moet worden verwijderd. De meest voorkomende roosterketels beschikken echter over een aantal stadia. De brandstof wordt in het rooster aan de bovenzijde van de constructie gedaan en passeert verschillende stadia in het verbrandingsproces. Vooral de as bereikt het allerlaatste stadium van het verbrandingsproces. Het tweede stadium is normaal gesproken beweegbaar en duwt de brandstof in een bepaalde richting. Dit wordt ook wel een rijdend rooster of een bewegend rooster genoemd. Het rooster kan worden gekoeld met water wanneer de brandstof droog is. Parameters die de werking van de ketel beïnvloeden zijn bijvoorbeeld de brandstofstroom die in het rooster wordt geduwd, de snelheid van de beweegbare stappen, de stroom van de primaire lucht en het vochtgehalte. Lucht wordt ook op andere manieren aan de ketel toegevoerd, bijvoorbeeld via de wanden van de ketel over het rooster. Dit beïnvloedt het verbrandingsproces.

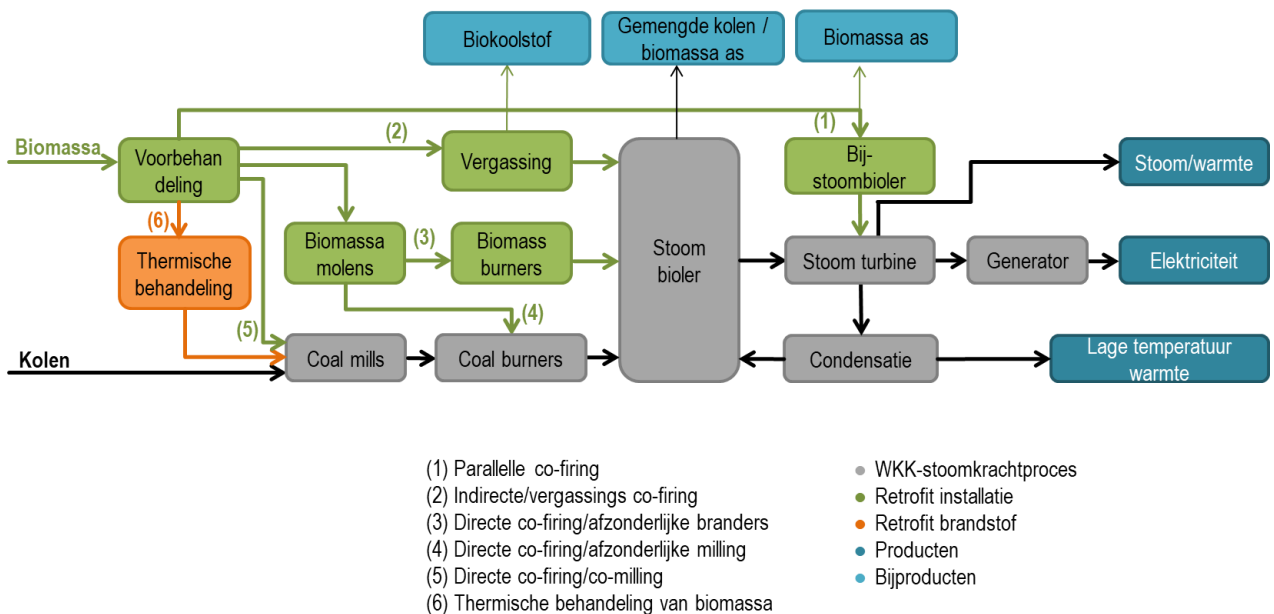
De belangrijkste parameter voor het verbrandingsrendement van een roosteroven is de grootte van de brandstof fractie en de variatie ervan. De fracties van de brandstof moeten een bepaalde grootte overschrijden om tijdens de brandfase op het rooster te blijven liggen. Ze moeten vrij grof zijn. Zaagsel is een voorbeeld van een ongeschikte brandstof voor een roosterketel. Een grote variatie in fractiegrootte en vochtgehalte zijn voorbeelden van parameters waarbij een FB-systeem meer geschikt is in vergelijking met een roosteroven.

Roosterketels worden op grote schaal toegepast voor de verbranding van biomassa in het bereik van enkele MW tot ongeveer 100 MW in termen van brandstofinput. De meeste biobrandstofketels in de energiesector liggen echter in het bereik van 15 - 20 MW. Als de brandstof geschikt is en aan bepaalde criteria voldoet, worden roosterketels gewaardeerd om hun robuustheid, prijs en eenvoudige constructie.

**Biomassa bijstook** kan worden gezien als de gedeeltelijke vervanging van fossiele brandstoffen, meestal steenkool, in elektriciteits- en warmtekrachtcentrales. **Hergebruik** daarentegen heeft betrekking op een bijna volledige vervanging van de belangrijkste fossiele brandstof door biomassa.

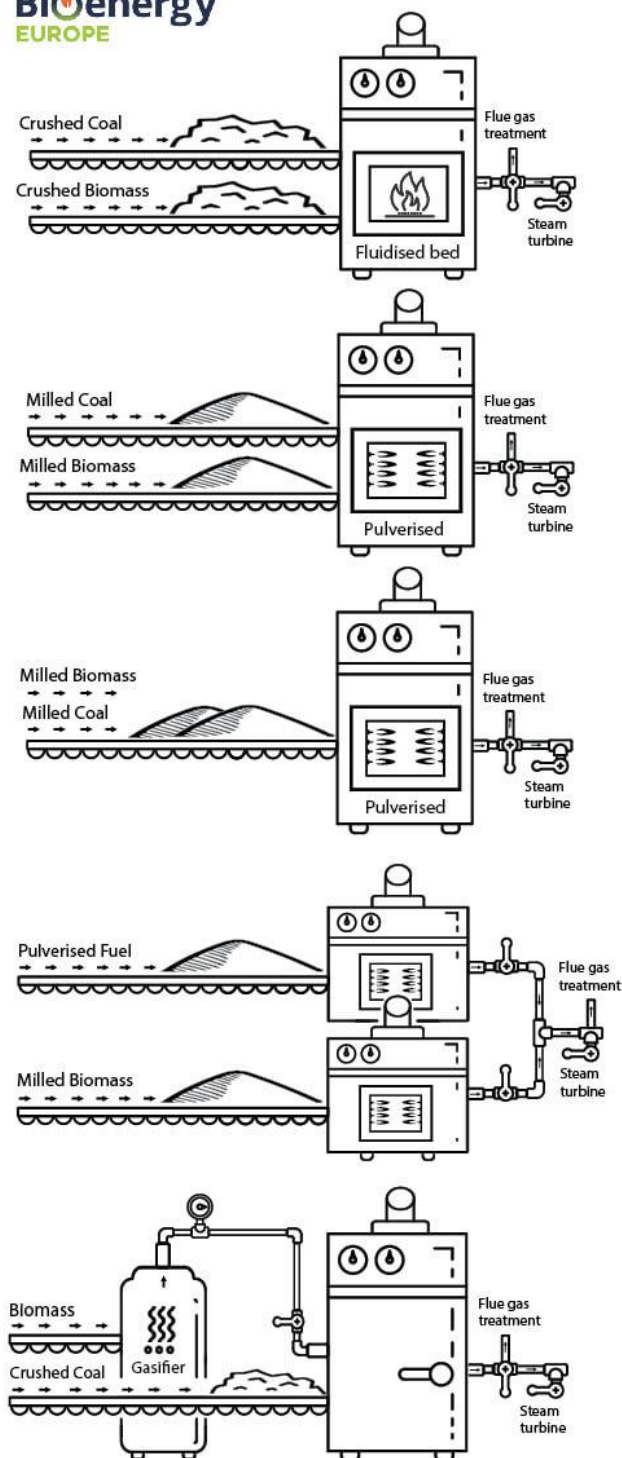
Een breed scala aan biomassamaterialen kan worden overwogen voor bijstooktoepassingen: hout (houtsnippen, houtpellets, bosresiduen, etc.), kruidachtige materialen (stro, miscanthus en andere snelgroeïende energiegewassen, etc.), agro-industriële resten (olijf residuen, palmschalen, koffiedik, etc.) en diverse afvalfracties (bijv. afvalhout, sloophout, Refuse Derived Fuel / RDF, Solid Recovered Fuel / SRF, Tire Derived Fuel / TDF, etc.). Vergeleken met steenkool worden de meeste biomassa-brandstoffen die voor bijstook worden overwogen, gekenmerkt door een hoger vochtgehalte, lagere stookwaarde, een lager asgehalte (maar bevatten meer problematische componenten zoals alkaliën), een hoger chloorgehalte, een lager zwavelgehalte en een lagere energiedichtheid. Rekening houdend met de bovengenoemde kenmerken moet de infrastructuur van een eenheid die de bijstook van fossiele brandstoffen ondersteunt, samen met biomassa, een aantal technische beperkingen in aanmerking nemen met betrekking tot het type elektriciteitscentrale, de gebruikte brandstoffen, het thermische aandeel van biomassa, de gewenste complexiteit en de kosten van de infrastructuur en de werking ervan.

Over het algemeen kan, naarmate de complexiteit van het proces en de investeringskosten toenemen, het thermische aandeel van biomassa worden vergroot en kunnen "moeilijkere" biomassabrandstoffen worden meegestookt. De opties voor bijstooktechnologie kunnen in drie grote categorieën worden ingedeeld (Basu, Butler, & Leon, 2011): directe bijstook, parallelle bijstook en indirecte bijstook/vergassing. Directe bijstoken is de meest voorkomende en economische oplossing. Het stelt echter een aantal beperkingen aan het aanbod van brandstoffen en thermische aandelen. Parallelle en indirecte bijstookregelingen zijn geschikter voor biomassabrandstoffen die problematische verbindingen bevatten of wanneer de askwaliteit van belang is voor de latere verkoop of verwerking. Ten slotte wordt herbevoorrading vooral toegepast voor brandstoffen uit houtbiomassa (bijv. pellets & chips). Verschillende concepten voor de aanpassing van bio-energie in een kolengestookte elektriciteits- of WKK-installatie zijn weergegeven in Figuur 31 en Figuur 32.



**Figuur 31: Verschillende processen van biomassa-integratie in kolencentrales en WKK-installaties**

Co-firing technologies



**Figuur 32: Concepten van co-firing: co-feeding, co-fuelling, co-milling, parallel co-firing, indirect co-firing (Bron: Bioenergy Europe).<sup>40</sup>**

<sup>40</sup> In de Nederlandse context worden alle vormen waarbij biomassa zonder meer in een kolencentrale wordt verwerkt 'meestook' genoemd. Als de biomassa eerst thermisch voorbehandeld wordt, wordt de term 'bijstook' gebruikt (ref: [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/conceptadvies\\_sde\\_2017\\_0.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/conceptadvies_sde_2017_0.pdf), p. 47)

### 7.3 Directe co-firing (gedeeltelijke bio-energie retrofit)

De eenvoudigste en meest kosteneffectieve methode om bio-energie in een bestaande kolencentrale te integreren is de zogenaamde directe co-firing, waarbij het gaat om de **verbranding** van steenkool en biomassa in dezelfde oven. Dit is de eenvoudigste oplossing voor co-firing, aangezien de aanpassingsmaatregelen tot een minimum kunnen worden beperkt en de totale investering op een zeer laag niveau kan worden gehouden. Aan de andere kant is de flexibiliteit en de controle van dergelijke co-firing systemen beperkt. Bovendien levert de verbranding een gemengde steenkool/biomassa-as op, die mogelijk geen commercieel gebruik heeft (in tegenstelling tot steenkoolas). Het maximale biomassa-aandeel in systemen voor directe co-firing ligt meestal rond de 10% van het totale thermische vermogen van de brandstof (Karampinis et al., 2014), maar dit hangt ook af van het type biomassa. Meestal kunnen hogere percentages worden bereikt met houtachtige biomassafracties, terwijl met moeilijke agrobiomassa of afvalfracties lagere percentages kunnen worden bereikt. Er zijn drie belangrijke varianten van directe co-firing, die hieronder worden beschreven in volgorde van toenemende complexiteit (Karampinis et al., 2014):

- De eerste optie, **co-milling**, omvat het vooraf mengen van steenkool en biomassa of het afzonderlijke vervoer ervan naar hetzelfde millingsysteem dat wordt gebruikt voor het verkleinen van de steenkoolmassa. Dit is de eenvoudigste optie. Er is echter een groter risico dat co-milling van vezelachtige biomassadeeltjes ook invloed heeft op de grootte van de steenkooldeeltjes, terwijl de verbrandingsomstandigheden daarvoor niet geoptimaliseerd zijn.
- De tweede optie is de installatie van een **speciaal voorbehandelings-/millingsysteem** voor biomassa (of het retrofitten van bestaande kolenmolens); de twee brandstoffen komen echter via dezelfde, bestaande kolenbranders in de oven terecht. Deze methode geeft betere controle over de grootte van de biomassadeeltjes, maar toch zijn de verbrandingscondities niet geoptimaliseerd. De toepassing ervan kan ook worden belemmerd door ruimtebeperkingen in de buurt van de stookruimte.
- De derde optie is het installeren van een **volledige afzonderlijke biomassalijn**, bijvoorbeeld een speciaal voorbehandelings-/millingsysteem voor biomassa en speciale biomassabranders. Deze optie gaat gepaard met hogere investeringskosten en een hoger technologisch risico, maar geeft de mogelijkheid om de verbrandingscondities beter te controleren en het effect van de biomassa op de ketel te verminderen. Het hergebruik van biomassa (paragraaf 7.6) is in feite de logische uitbreiding van deze retrofit-optie, door alle kolenmolens /-branders te vervangen of aan te passen aan de biomassabranders.

Het BIOFIT-project omvat een casestudy die onder de regeling voor directe co-firing valt: Tuzla eenheid 6 van Electroprivada BiH waarvoor het bijstoken van een breed scala aan lokale biomassa-bronnen (bijv. zaagsel, landbouwresiduen, energiegewassen die worden verbouwd in teruggewonnen mijnbouwgebieden, etc.) zal worden onderzocht voor een massa-invoerbasis tot 30%.

### 7.4 Indirecte co-firing (gedeeltelijke bio-energie retrofit)

Indirecte co-firing, ook wel 'gasification co-firing' genoemd, is een geavanceerdere optie dan directe co-firing. Er wordt een **biomassavergasser** geïnstalleerd, die de benodigde apparatuur voor de voorbehandeling van de biomassa vervangt. Het syngas dat tijdens het vergassingsproces wordt geproduceerd, wordt naar de oven van de kolenketel gestuurd voor verbranding. Door het gebruik van indirecte co-firing worden de meeste negatieve effecten van biomassa op de steenkoolverbranding vermeden en worden de brandstoffen apart verwerkt, waardoor onder andere de as gescheiden kan worden verzameld. Het biomassa-syngas kan worden gebruikt voor het oververhitten van gas en draagt zo bij aan de vermindering van de

NOx-emissie. Aangezien het syngas in veel gevallen rechtstreeks in de oven kan worden geïnjecteerd, gaat de energieomzetting verloren en kan dure syngasreiniging, beide veelvoorkomende problemen bij biomassavergassingstoepassingen, worden vermeden. Toch kan een zekere mate van syngasreiniging nodig zijn, afhankelijk van de aanwezigheid van chloor, alkaliën en andere elementen in de biomassasamenstelling.

De kapitaalinvestering voor indirecte co-firing ligt tussen 300 en 1.100 €/kWe (IEA Bioenergy, 2017), wat hoger is dan directe co-firing. Dit is een beperkende factor voor de verdere invoering van deze technologie. Voorbeelden van commerciële implementatie van indirecte co-firingsystemen zijn te vinden in onderstaande tabel.

**Tabel 8: Commerciële indirecte co-firing installaties (IEA Bioenergy, 2017)**

Centrale	Land	Ingebruikname	Vergassingscapaciteit (MW thermisch)	Co-firing aandeel (aandeel van de warmte-input in de hoofdketel)	Gebruikte brandstoffen
Amergas / Amer 9	Nederland	2000	83	5 %	Afalhout
Kymijärvi II	Finland	2012	45 – 70	15 %	Gerecyclede energiebrandstof (REF), zaagsel, schors, houtsnippers, houtafval
Vaskiluodon Voima	Finland	2012	140	Tot 40 % <sup>1</sup>	Bosresiduen (snippers)
Ruien	België	2003	40 – 80	10 % <sup>2</sup>	Houtsnippers, schors, harde en zachte kartonresten

Bronnen: <sup>1</sup> Valmet; <sup>2</sup> Ryckmans, 2012

### 7.5 Parallel co-firing (gedeeltelijke bio-energie retrofit)

De laatste optie voor een gedeeltelijke retrofit van de biomassa van fossiele centrales is de 'parallel co-firing' van biomassa en steenkool. In deze situatie worden **twee afzonderlijke stookinstallaties en ketels** gebruikt voor de twee brandstoffen. De twee installaties zijn aan de stoomzijde aangesloten, die in de turbine wordt gebruikt voor de stroomopwekking. De verwerking, voorbehandeling en verbranding van de twee brandstoffen zijn volledig onafhankelijk van elkaar. Bovendien worden de biomassa en de kolen apart verbrand waardoor de geproduceerde as, net als bij de 'indirect co-firing', apart wordt verzameld en dus beide op de best mogelijke manier kunnen worden gebruikt. Een ander voordeel van het gescheiden stoken is dat het verbrandingsproces voor beide gevallen kan worden geoptimaliseerd, terwijl de verwerking van relatief moeilijke brandstoffen nu kan worden gerealiseerd, wat tot nu toe niet in alle gevallen mogelijk was (directe en indirecte bijstook). 'Parallel co-firing' kan profiteren van hoge stoomparameters van moderne, state-of-the-art kolencentrales, waardoor een veel hoger elektrisch rendement wordt bereikt dan bij stand-alone biomassacentrales. De kapitaalkosten van het onderzochte scenario zijn echter het hoogst onder de co-firing oplossingen, omdat er samen met de huidige infrastructuur (nieuwe toevoerinstallaties, ketels, verbrandingsruimtes, etc.) een volledig nieuwe infrastructuur moet worden opgezet.

Deze methode maakt een groot deel van het gebruik van de biomassa voor de installatie mogelijk, aangezien er geen technische beperking is met betrekking tot de hoeveelheid steenkool die kan worden vervangen door biomassa. Het enige waar rekening mee moet

worden gehouden is de capaciteit van de geïnstalleerde stoomturbine (Koppejan & van Loo, 2012). Met betrekking tot de aanpassing van een installatie is het niet mogelijk om een aanpassing van de stoomturbine voor te stellen, daarom moet de geïnstalleerde stoomturbine de capaciteit hebben om te functioneren in de cumulatieve stoom die wordt aangevoerd uit zowel de biomassa- als de kolenketel, anders zou de retrofit geen goede oplossing zijn.

Het bekendste voorbeeld van 'parallel co-firing' in eenheid 2 van de centrale van Avedøre in het stadsdeel van Kopenhagen, waar een op strogestookte ketel van 105 MW is geïnstalleerd, samen met de hoofd-, 800 MW, ultra-superkritische ketel die een combinatie van houtpellets, kolen en aardgas gebruikt; de centrale heeft een gerapporteerd totaal rendement van 92% en een elektrisch rendement van 42%, oplopend tot 49% wanneer er geen stadsverwarming nodig is (Sørensen, 2011).

## **7.6 Biomassa hergebruik (volledige bio-energie retrofit)**

Het hergebruik van biomassa is de ontwikkeling van 'directe co-firing' naar een zeer hoog aandeel van biomassa in het brandstofmengsel, vaak tot 100%. Deze optie vereist de omschakeling van het brandstoftoevoer-, maal- en verbrandingssysteem naar een geschikt systeem voor biomassa.

De redenen voor een nutsbedrijf om over te gaan tot het hergebruiken van biomassa kunnen worden gerelateerd aan de wens om steenkool volledig uit te bannen en tegelijkertijd de bestaande activa operationeel te houden. Het kan ook worden ondersteund door beleid dat co-firing met een laag aandeel thermische biomassa niet in aanmerking komt voor financiële steun, terwijl grootschalige elektriciteitsproductie op basis van biomassa wel wordt aanvaard.

Een van de oudste voorbeelden van een 100 % retrofit op biomassa is Rodenhuize 4. De ombouw werd uitgevoerd met een reeks opeenvolgende stappen, te beginnen met de installatie voor het transport, de opslag, de verwerking, het vermalen van de houtpellets en de ombouw van een paar rijen branders in 2005. Het Advanced Green Project leidde tot de omschakeling van twee rijen steenkoolbranders naar de verbranding van houtpellets en ten slotte heeft het Max Green project geleid tot de volledige omschakeling van steenkoolverbranding naar houtpellets, de vervanging van de brander, alsook tot de implementatie van andere retrofit opties, waaronder de installatie van een SCR-unit (Selective Catalytic Reduction) voor de beheersing van de NO<sub>x</sub>-emissie (Savat, 2010).

Er zijn verschillende voorbeelden van kolengestookte centrales of WKK-centrales die van kolen naar biomassa zijn omgeschakeld; in Tabel 9 wordt een overzicht gegeven. De meeste omschakelingen zijn uitgevoerd in verpulverde brandstofketels, waarbij de retrofits betrekking hadden op het maal- en voedingssysteem, samen met de logistieke infrastructuur voor de aanvoer van biomassa (bijv. opslag, havenfaciliteiten, etc.). Er zijn echter voorbeelden van uitgebreidere retrofits, zoals de Polaniec Green Unit in Polen, waar de oudste verpulverde brandstofketel werd vervangen door een state-of-the-art CFB-ketel en waar ook de stoomturbine werd omgebouwd.

Een belangrijke uitdaging bij zulke retrofits is de inkoop van biomassa; de benodigde volumes zijn zeer hoog en in de meeste gevallen moeten ze worden geleverd via de internationale markt. Dit is een van de belangrijkste redenen waarom houtpellets de meest gebruikte biomassabrandstof in dit soort retrofits zijn; door hun relatief hoge energiedichtheid en gestandaardiseerde eigenschappen kunnen ze over grote afstanden worden vervoerd. Een andere reden om te kiezen voor houtpellets boven andere biomassabrandstoffen is hun brandstofeigenschappen; ze hebben een relatief laag asgehalte (< 2-3 % gewichtsprocent op droge basis) en lage concentraties chloor en alkaliën die problemen met corrosie en vervuiling bij elektriciteitsproductietoepassingen kunnen veroorzaken. Ook worden er af en toe houtsnippers gebruikt.



**Tabel 9: Lijst van omschakelingen van steenkool naar biomassa**

Centrale/eenheid	Land	Voltooiing van retrofits	Geïnstalleerd vermogen (MW elektrisch)	Gebruikte brandstoffen	Verbrandings technologie
<b>Les Awirs 4</b>	België	2005	80	Houtpellets	PF
<b>Helsingborg</b>	Zweden	2006	126	Houtpellets	PF
<b>Västhamsverket</b>	Zweden	2006	69	Houtpellets	PF
<b>Herning</b>	Denemarken	2009	75	44 % houtsnippers, 44 % houtpellets, 12 % top-gas	GF (snippers)/ PF (pellets)
<b>Rodenhuize 4</b>	België	2011	180	Houtsnippers	PF
<b>Tilbury*</b>	Verenigd Koninkrijk	2011	750	Houtpellets	PF
<b>Ironbridge*</b>	Verenigd Koninkrijk	2012	740	Houtpellets	PF
<b>Drax 1</b>	Verenigd Koninkrijk	2013	660	Houtpellets	PF
<b>Polaniec Green Unit</b>	Polen	2013	195	80 % houtsnippers, 20 % agrobiomassa	CFB
<b>Drax 2</b>	Verenigd Koninkrijk	2014	645	Houtpellets	PF
<b>Atikokan</b>	Canada	2014	205	Houtpellets	PF
<b>Drax 3</b>	Verenigd Koninkrijk	2015	645	Houtpellets	PF
<b>Thunder Bay 3*</b>	Canada	2015	160	Arbacore houtpellets (stoom explosie)	PF
<b>Avedore 1</b>	Denemarken	2016	258	Houtpellets	PF
<b>Studstrup 3</b>	Denemarken	2016	362	Houtpellets	PF
<b>Yeongdong 1</b>	Zuid-Korea	2017	125	Houtpellets	PF
<b>Drax 4</b>	Verenigd Koninkrijk	2018	645	Houtpellets	PF
<b>Amer 9</b>	Nederland	2019	631	80 % houtpellets, 20 % kolen	PF
<b>Asnæs 6</b>	Denemarken	2019	25	Houtsnippers	BFB
<b>Suzukawa</b>	Japan	2020 (verwacht)	112	Houtpellets	PF
<b>Uskmouth</b>	Verenigd Koninkrijk	2021 (Verwacht)	240	Subcoal® pellets (RDF pellets)	PF

\* Eenheid niet langer in gebruik

BFB: Bubbling Fluidized Bed, CFB: Circulating Fluidized Bed, GF: Grate Fired, PF: Pulverized Fuel

De Drax-elektriciteitscentrale (Figuur 33) is momenteel de grootste biomassaconsument ter wereld, met in vier omgebouwde biomassa-eenheden die in 2018 meer dan 7 miljoen ton houtpellets verbruikten, voornamelijk uit de VS (62,2 %) en Canada (17,3 %), met kleinere volumes afkomstig uit de EU, Brazilië en andere Europese landen (Drax, 2019). De totale kosten voor de omschakeling van de eerste drie eenheden in Drax bedroegen 700.000.000

GBP (ongeveer 416 EUR/kWe); de kosten voor de omschakeling van eenheid 4 bedroeg slechts 30.000.000 GBP (ongeveer 54 EUR/kWe). Dit komt door het gebruik van reserveonderdelen uit de omschakeling van de voorgaande eenheden<sup>41</sup> en doordat er geen extra investeringen in de voorziening van biomassa-brandstof (bijv. haven- en spoorweginfrastructuur, opslag, etc.) zijn gedaan. Het management van het bedrijf heeft ook de ambitie uitgesproken om tegen 2030 koolstofnegatief te worden door het integreren van bio-energie koolstofafvang en -opslag (BECCS) technologieën<sup>42</sup>.



**Figuur 33: De Drax-centrale in Selby, Verenigd Koninkrijk; de opslagkoepels voor biomassa zijn te zien (Bron: Drax Group)**

Het BIOFIT-project omvat twee industriële casestudies die gericht zijn op een volledig hergebruik van biomassa in bestaande steenkoolcentrales:

- Kakanj eenheid 5 (118 MWe) WKK-installatie van Elektroprivreda BiH, die in aanmerking komt voor hergebruik van lokaal beschikbare houtachtige biomassa, zoals houtsnippers, zaagsel, etc.
- Fiume Santo eenheid 4 (320 MWe) elektriciteitscentrale van EP Produzione. De centrale bevindt zich in het noordwesten van Sardinië; samen met de partners van het BIOFIT-project onderzoekt het bedrijf de omschakeling naar een biomassacentrale met geïmporteerde houtpellets als belangrijkste brandstof.

### **7.7 Thermisch behandelde biomassa**

Thermische upgradings is een proces dat bedoeld is om biomassa om te zetten in een koolachtig materiaal dat eenvoudig kan worden gebruikt in de bestaande kolencentrales. De belangrijkste redenen voor het thermisch upgraden van biomassa zijn:

- Het creëren van een eenvoudig te vermalen brandstof, die zonder grote retrofits in bestaande kolenmolens kan worden gebruikt, waardoor de noodzaak van dure retrofits wordt beperkt.

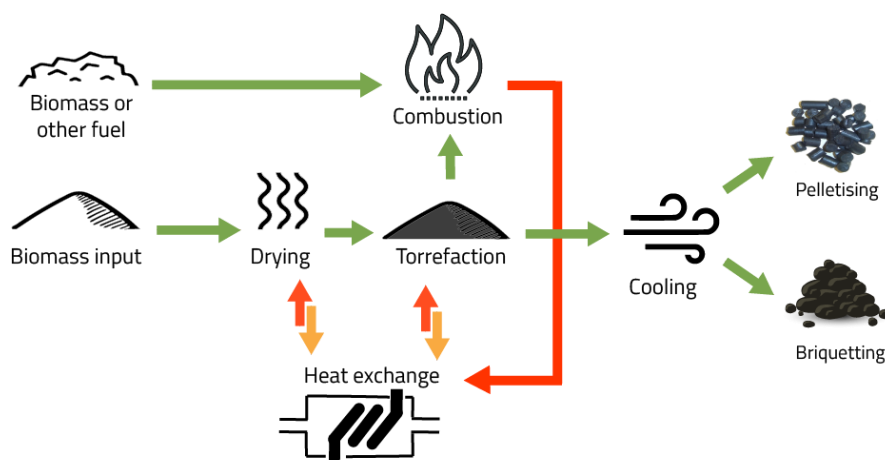
<sup>41</sup> [www.biomassmagazine.com/articles/15532/drax-completes-fourth-biomass-unit-conversion](http://www.biomassmagazine.com/articles/15532/drax-completes-fourth-biomass-unit-conversion)

<sup>42</sup> [www.drax.com/press\\_release/drax-sets-world-first-ambition-to-become-carbon-negative-by-2030/](http://www.drax.com/press_release/drax-sets-world-first-ambition-to-become-carbon-negative-by-2030/)

- Het vergroten van de energiedichtheid van de biomassa (meestal met een densificatiestap, bijvoorbeeld pelletisering na de thermische upgrade), zodat het transport ervan over langere afstanden voordeliger kan zijn.
- Om de biomassa bestand te maken tegen vochtopname (hydrofoob), zodat het kan worden opgeslagen zoals kolen, bijvoorbeeld op open terreinen, waardoor de verwerkingskosten kunnen worden verlaagd.

Er zijn verschillende technologieën ontwikkeld voor de thermische voorbehandeling van biomassa; de bekendste en meest geavanceerde zijn de volgende:

- **Torrefactie** is een thermisch proces waarbij biomassa wordt verhit tot een temperatuur van ca. 250-350 °C, in afwezigheid van zuurstof of bij lage zuurstofconcentraties. Door dit proces komt bijna alle vocht en het grootste deel van de vluchtige fractie van de biomassa vrij, waardoor de vezelstructuur van de biomassa door de afbraak van de hemicellulose wordt afgebroken. Het vaste product is een zwart, houtskoolachtig materiaal dat verder kan worden verwerkt tot pellets (Kofman, 2016). De gasvormige producten kunnen worden verbrand om de warmte voor het proces te behouden; het nettorendement van een geïntegreerd torrefactieproces is ongeveer 70 - 98%, afhankelijk van de reactortechnologie, het concept voor warmte-integratie en het type biomassa<sup>43</sup>.
- **Stoomexplosie** maakt gebruik van stoom onder druk (1 tot 3,5 MPa) en temperatuur (180 tot 240 °C) in een drukvat om de biomassa te impregneren. Het impregneren wordt gevolgd door een explosieve decompressie, waardoor de vezelclusters scheuren en de lignine in een pulp wordt gevormd, die verder kan worden samengeperst tot pellets. De hydrolysesnelheid van hemicellulose kan verder worden verbeterd door zure gassen (bijvoorbeeld SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) te gebruiken als katalysator tijdens de drukfase. Stoomexplosie wordt ook gebruikt als voorbehandelingsstap voor biomassa tijdens de productie van 2G bio-ethanol (Kofman, 2016).
- **Hydrothermische Carbonisatie (HTC)** verschilt van de andere twee technologieën omdat het de directe voorbehandeling van natte biomassa mogelijk maakt, zonder voorafgaande droogstap. In het HTC-proces wordt de biomassa in water gesuspenderd en bij hoge temperaturen (180-300 °C) behandeld. Een verhoogde druk (20 - 100 bar), boven de respectievelijke waterdampdruk, wordt gebruikt om water in de vloeistoffase te houden. Een ander voordeel van het HTC-proces is dat het water bepaalde elementen zoals alkaliën en chloor uit de biomassa kan uitloggen, die normaal gesproken voor aanslagproblemen, vervuiling en corrosie zorgen (Hansen et al., 2018).



**Figuur 34: Overzicht van het torrefactieproces (Bron: IEA Bioenergy Task 32)**

<sup>43</sup> <https://ibtc.bioenergyeurope.org/torrefaction-basics/>

Tot nu toe is de enige commerciële retrofit met thermisch behandelde houtpellets de ombouw van Thunder Bay Generation Station, eenheid 3 van Ontario Power Generation (OPG). De retrofit begon in 2014 en werd eerder dan gepland en onder het budget voltooid in 2015 met een kapitaalinvestering van slechts 3 miljoen Canadese dollar - ongeveer 2 miljoen EUR. Aangezien de capaciteit van de eenheid 160 MWe bedraagt, zijn de ombouwkosten ongeveer 12,50 €/kWe, veel lager dan de kosten die voor andere ombouwprojecten met houtpellets zijn opgegeven<sup>44</sup>. Het project werd uitgevoerd met behulp van stoom geëxplodeerde pellets van Arbaflame.

Door verschillende Europese nutsbedrijven zijn proeven met getorrificeerde en met stoom geëxplodeerde biomassa uitgevoerd die over het algemeen positieve resultaten hebben opgeleverd<sup>45,46</sup>. Bovendien is het Horizon 2020 project ARBAHEAT<sup>47</sup> van plan om de 731 MWe ultra-superkritische kolencentrale Maasvlakte 1 om te vormen tot een biomassa-WKK-centrale waarin de biomassa-stoombehandelingstechnologie van Arbaflame wordt geïntegreerd.

## 7.8 Conclusie

Er zijn verschillende opties voor het retrofitten van fossiele - en met name kolengestookte - elektriciteits- of warmtekrachtcentrales naar biomassa, afhankelijk van het gewenste integratieniveau van de biomassa in de installatie.

De eenvoudigste optie is directe co-firing, maar het is ook de minst ambitieuze, aangezien het vervangingsniveau van fossiele brandstoffen door biomassa meestal laag is en niet meer dan 10 - 20 % bedraagt op basis van het thermisch vermogen van de brandstof. Dit houdt in dat een elektriciteits- of warmtekrachtcentrale met kolen in bedrijf moet blijven. Daarom is deze optie niet langer mogelijk in de EU, hoewel de optie als overgangstechniek relevant kan zijn voor landen die hun kolen opwekkingscapaciteit handhaven of uitbreiden.

Indirecte co-firing en parallel co-firing zijn de meest geavanceerde opties, die het mogelijk maken om een hoger aandeel biomassa te gebruiken. Ook hier geldt echter dat de toepassing ervan de instandhouding van een elektriciteitscentrale met een fossiele brandstof impliceert en dat slechts een gedeeltelijke de-carbonisatie kan worden bereikt.

Het volledig hergebruiken van biomassa, bijvoorbeeld de volledige omschakeling van een kolencentrale of WKK-installatie op biomassa, is in verschillende installaties in Europa of daarbuiten gedemonstreerd. Hoewel er in specifieke gevallen complicaties kunnen optreden, heeft deze optie al een voldoende niveau van technologische volwassenheid bereikt.

Een belangrijk punt dat bij de omschakeling van kolen naar biomassa in aanmerking moet worden genomen, is de beschikbaarheid van biomassa; voor de omschakeling van een grootschalige kolencentrale naar biomassa zijn enorme hoeveelheden materiaal nodig en de logistieke regelingen kunnen gecompliceerd zijn, vooral voor centrales die van oudsher niet afhankelijk zijn van de externe brandstofvoorziening. Dat is het geval met bruinkoolcentrales die in de buurt van bruinkoolmijnen en ver van zeehavens liggen (Karampinis et al., 2014).

Er moet ook worden opgemerkt dat dergelijke voorbeelden van hergebruik alleen commercieel zijn aangetoond met brandstoffen uit houtbiomassa (meestal houtpellets). Agrobiomassa kan de mogelijkheid bieden om lagere brandstofkosten te hebben dan houtpellets, maar de verbranding ervan brengt zijn eigen technische uitdagingen met zich mee, alsook mobilisatie-

---

<sup>44</sup> De installatie werd gemiddeld slechts 2,5 dag/jaar als piekbelastingseenheid gebruikt en in mei 2018 werd aanzienlijke corrosieschade (niet gerelateerd aan het stoken van biomassa) in de ketel aangetroffen. Sindsdien is de installatie buiten bedrijf gesteld.

<sup>45</sup> [www.blackwood-technology.com/company/references/](http://www.blackwood-technology.com/company/references/)

<sup>46</sup> [www.cegeneration.com/ceg-and-tse-trial-1000-tonnes-of-renewable-black-pellets-at-tses-naantali-power-station-in-finland/](http://www.cegeneration.com/ceg-and-tse-trial-1000-tonnes-of-renewable-black-pellets-at-tses-naantali-power-station-in-finland/)

<sup>47</sup> [www.arbaheat.eu](http://www.arbaheat.eu)

en logistieke kwesties, en moet nog steeds worden gedemonstreerd in dergelijke grootschalige systemen.

Tot slot is het gebruik van thermisch behandelde biomassa slechts in één commercieel voorbeeld en in verschillende demonstratiecampagnes gedemonstreerd. Ondanks de verschillende voordelen - met name de zeer lage CAPEX-eisen voor de omschakeling en de belofte voor lagere brandstofkosten - is een van de belangrijkste uitdagingen bij de inzet van deze oplossing de ontwikkeling van de infrastructuur die nodig is om de hoeveelheden thermisch behandelde biomassa te leveren die voor de omschakelingsprojecten nodig zijn.

Ondanks de kritiek van sommige NGO's is de conversie van steenkool naar biomassa de enige optie die momenteel beschikbaar is voor grootschalige, leverbare en duurzame elektriciteitsproductie. Ook moet worden opgemerkt dat de EU, om een duurzaam en doeltreffend gebruik van biomassa bij de elektriciteitsproductie te waarborgen, in RED II een reeks eisen heeft vastgesteld, variërend van duurzaamheidscriteria voor de aankoop van biomassa, tot een minimumniveau van broeikasgasemissiereducties in de hele waardeketen, tot een reeks technische beperkingen (bijvoorbeeld een minimumniveau van 36% netto elektrisch rendement voor installaties met een nominaal thermisch vermogen van meer dan 100 MW). Bovendien bieden dergelijke installaties de mogelijkheid tot integratie van CCS-technologieën (Carbon Capture and Storage), die samen met het gebruik van biomassa zorgen voor negatieve emissies.

## 8 *Retrofitten van de pulp- en papierindustrie*

### 8.1 *Overzicht van de sector*

Het aantal papier- en kartonfabrieken alsook de pulpfabrieken in Europa is sinds de jaren negentig gestaag afgenomen. In 2018 waren er 151 pulpfabrieken en 746 papier- en kartonfabrieken. Toch is de productie van papier en karton in Europa<sup>48</sup> de afgelopen tien jaar relatief stabiel gebleven, met een productie van 92 miljoen ton in 2018. Een vergelijkbare trend is te zien in de totale pulpproductie (geïntegreerde en marktgerichte pulp), die in 2018 38 miljoen ton bedroeg. Opvallend is dat ondanks de stabiele totale productie de pulpproductie op de wereldmarkt een stijgende lijn vertoont (CEPI, 2019). In tegenstelling tot Europa groeien de markten voor de papierindustrie in Azië door de toenemende koopkracht (Suhonen en Amberla, 2014).

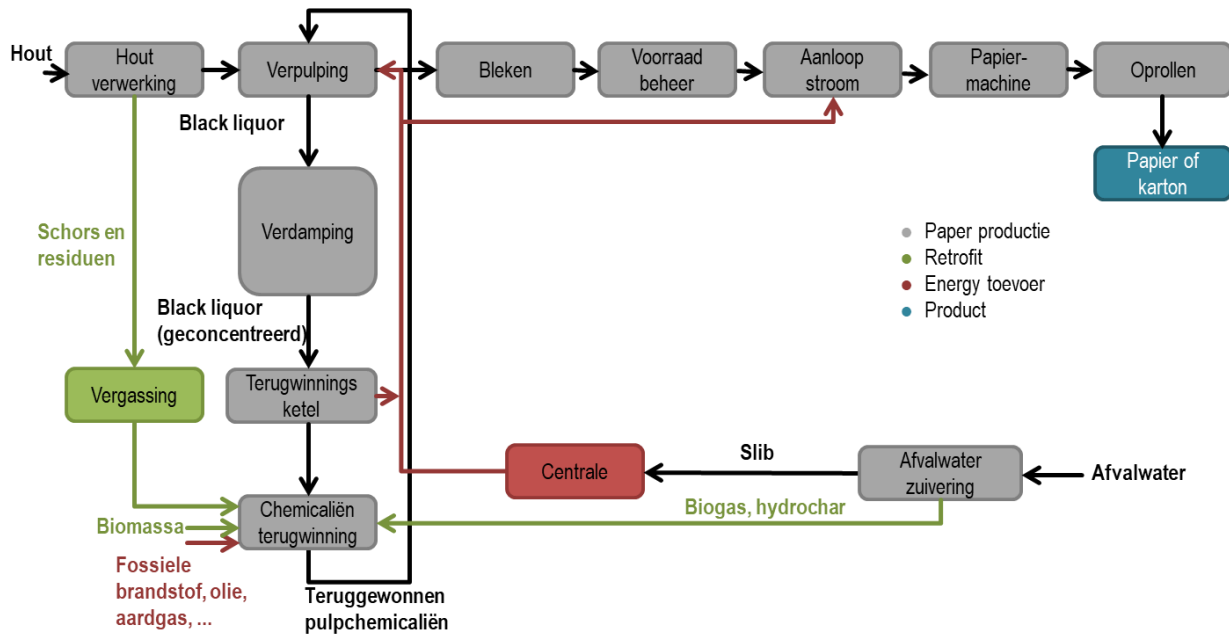
Digitalisering heeft gevolgen gehad voor de eindproducten uit de papierindustrie; het gebruik van grafisch papier neemt af, maar de behoefte aan verpakkingen neemt toe (Suhonen en Amberla, 2014). De pulp- en papierindustrie in Europa heeft een zekere mate van consolidatie doorgemaakt, terwijl er tegelijkertijd veel belangstelling was voor hoogwaardige biobased producten zoals biobrandstoffen, biocomposieten en biobased plastics. Omdat veel pulpfabrieken niet langer geïntegreerd zijn in papierfabrieken, is hun eigen energieverbruik afgenomen, wat de mogelijkheden biedt voor de productie van hoger gewaardeerde bio-energieproducten uit hun reststoffen.

De pulp- en papierindustrie is de vierde grootste industriële energieverbruiker in Europa (Chan and Kantamaneni, 2015). De industrie heeft sinds 2005 haar koolstofuitstoot met 26% weten te verminderen door het gebruik van vaste bijstromen voor energiedoelinden (CEPI, 2018a). De pulp- en papierindustrie in Europa gebruikt nu al voor bijna 60% van het totale brandstofverbruik hernieuwbare energie. Het verbruik van biomassa voor energie in de pulp- en papierindustrie bedroeg 710 PJ in 2017 (CEPI, 2019). De rest van het brandstofverbruik wordt voornamelijk gedekt door gas, dat goed is voor 390 PJ (CEPI, 2019). Landen waar de papierindustrie aardgas als energiebron gebruiken, hebben vaak slechts een kleine bosbouwsector, die de fabrieken zou kunnen voeden met bosresiduen. In deze landen zijn gerecyclede vezels veruit de belangrijkste binnenlandse grondstof voor papier. Hoewel het gebruik van aardgas geen voorwaarde is voor het recyclen van papier, wordt aardgas vaak gebruikt vanwege de kostenefficiëntie, het gebrek aan haalbare alternatieven en het nationale energiebeleid (CEPI, 2018a).

De belangrijkste hernieuwbare energiebron in de pulp- en papiersector is bio-energie uit houtbehandelingsresiduen zoals slib, schors en houtverwerkingsafval. Mogelijkheden voor het retrofitten van bio-energie in de sector zijn het toegenomen gebruik van residuen, zoals schors, voor de opwekking van energie, de productie van biogas uit slib van pulpfabrieken en het verhogen van de efficiëntie van de productie van bio-energie WKK met hoogrendabele apparatuur (bij hoge stoomdruk). Figuur 35 toont een schema voor de retrofit van de energievoorziening van een pulp- en papierfabriek met biomassa. Andere belangrijke retrofitmogelijkheden zijn de productie van secundaire brandstoffen, bijvoorbeeld door het opwaarderen van black liquor.

---

<sup>48</sup> in de landen die lid zijn van het CEPI: België, Duitsland, Finland, Frankrijk, Hongarije, Italië, Nederland, Noorwegen, Oostenrijk, Polen, Portugal, Roemenië, Slovenië, Slowakije, Spanje, Tsjechië, het Verenigd Koninkrijk en Zweden.



**Figuur 35: Overzicht voor het retrofitten van de energievoorziening met biomassa in een pulp- en papierfabriek**

## 8.2 Pulpproces en residuen van de pulp- en papierindustrie

### 8.2.1 Vezelwinning

Pulpvezels kunnen mechanisch of chemisch aan de grondstof (hout) worden onttrokken.

Bij **mechanisch verpulveren** wordt hout behandeld met mechanische schuifkrachten, bijvoorbeeld door het malen om de ligninebindingsvezels te verzachten. Hogere opbrengsten (tot 95%) van het pulphout worden verkregen door mechanische verpulping in vergelijking met chemische verpulping, omdat hierbij het hele houtblok met uitzondering van de schors kan worden gebruikt (CEPI, 2018b). Een opmerkelijk nadeel van mechanische verpulping is de lagere sterkte van het eindproduct in vergelijking met chemische verpulping als gevolg van de verschillende vezellengtes. Bovendien kan de energiebehoefte bij mechanische verpulping slechts gedeeltelijk worden gedekt met de energie-input uit de schorsresten.

Bij het **chemisch verpulveren** worden ronde stammen eerst ontschorst en wordt het hout tot spaanders verwerkt. De overgebleven schors wordt meestal verkocht of verbrand om ter plaatse warmte en kracht te produceren. Het pulpproces is zelfvoorzienend in energie, aangezien de verbranding van bijproducten de energiebehoefte van het proces kan dekken. Na het ontschorsen worden de houtsnippers gekookt in een waterige oplossing samen met de chemicaliën die de lignine oplossen. Het vaste residu dat een laag ligninegehalte heeft, wordt pulp genoemd. Het kan worden verkocht of verder worden verwerkt tot karton- of papierproducten. De opbrengst van het pulphout in chemische verpulping is gemiddeld 45% (CEPI, 2018b).

Bij **semi-chemische verpulping** worden de houtsnippers gekookt met een kleine hoeveelheid chemicaliën, waarna alsnog een mechanische behandeling van het hout wordt toegepast. Zo wordt bij de Neutral Sulphite Semi-chemical (NSSC) verpulping, een chemische voorbehandeling met sulfiet uitgevoerd vóór de ontvezeling.

## 8.2.2 Kookproces

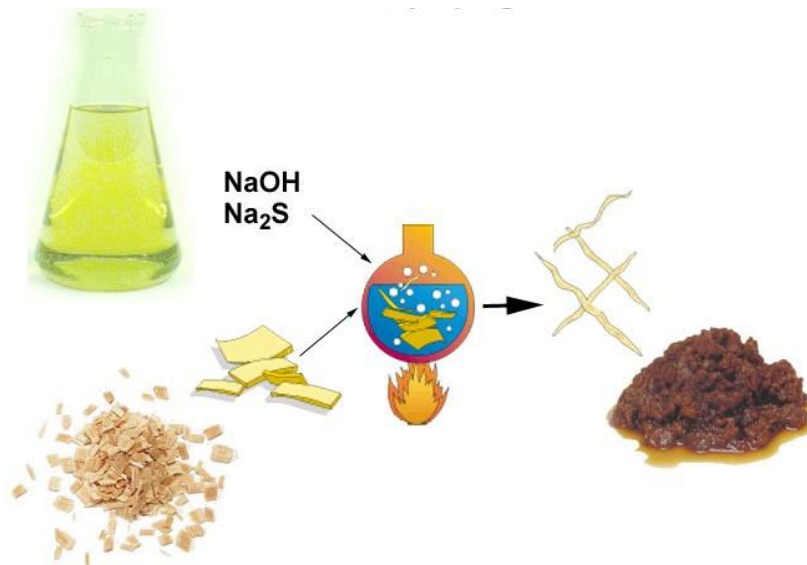
De gangbare kookprocessen zijn onder andere Kraft koken en sulfiet koken. Het type kookproces heeft een aanzienlijke invloed op de valorisatie van de bijproducten.

Het **Kraft-proces** (sulfaatproces) is het belangrijkste proces voor de productie van papier. Het zet hout om in bijna zuivere cellulosevezels. In dit proces worden natriumhydroxide (NaOH) en natriumsulfide ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) gebruikt als chemicaliën om de bindingen tussen lignine, hemicellulose en cellulose te verbreken (Figuur 36). In het Kraftpulpingproces wordt de oplossing alkalisch en bevat het lignine en hemicellulose suikers. Deze afbraakproducten zijn moeilijk om te zetten in biobrandstoffen door gisten of andere micro-organismen.

Na de kookfase wordt de pulp gewassen (Figuur 37). Tijdens het wassen wordt de resterende lignine door middel van zuurstof in een waterige oplossing verwijderd. De pulp wordt vaak ook gebleekt, zodat deze wit wordt en geschikt wordt voor witte papierproducten. De oplossing die de opgeloste lignineresiduen bevat, wordt black liquor genoemd en wordt door verdamping geconcentreerd. De mogelijkheden voor het gebruik van **black liquor** zijn weergegeven in Figuur 38.

In het **sulfiet kookproces** wordt een sulfiet-zoutoplossing (meestal magnesiumsulfiet) gebruikt. Het oplossen van de biomassa-componenten hangt sterk af van de pH-waarde van de oplossing. Het sulfiet kookproces kan worden uitgevoerd bij verschillende pH-waarden, afhankelijk van de grondstof. Het zure calciumbisulfiet proces wordt bijvoorbeeld uitgevoerd bij zeer zure condities, meestal bij een pH van 1-1,5 (Hanhikoski, 2014).

In zure sulfietpulp bevat de zogenaamde **brown liquor** lignine als lignosulfonaten (in wateroplosbare lignine, die als aparte chemische stof kan worden verkocht) en suikers die eenvoudig kunnen worden gefermenteerd tot ethanol of andere biobrandstoffen. De mogelijkheden voor het gebruik van black liquor zijn weergegeven in Figuur 39.

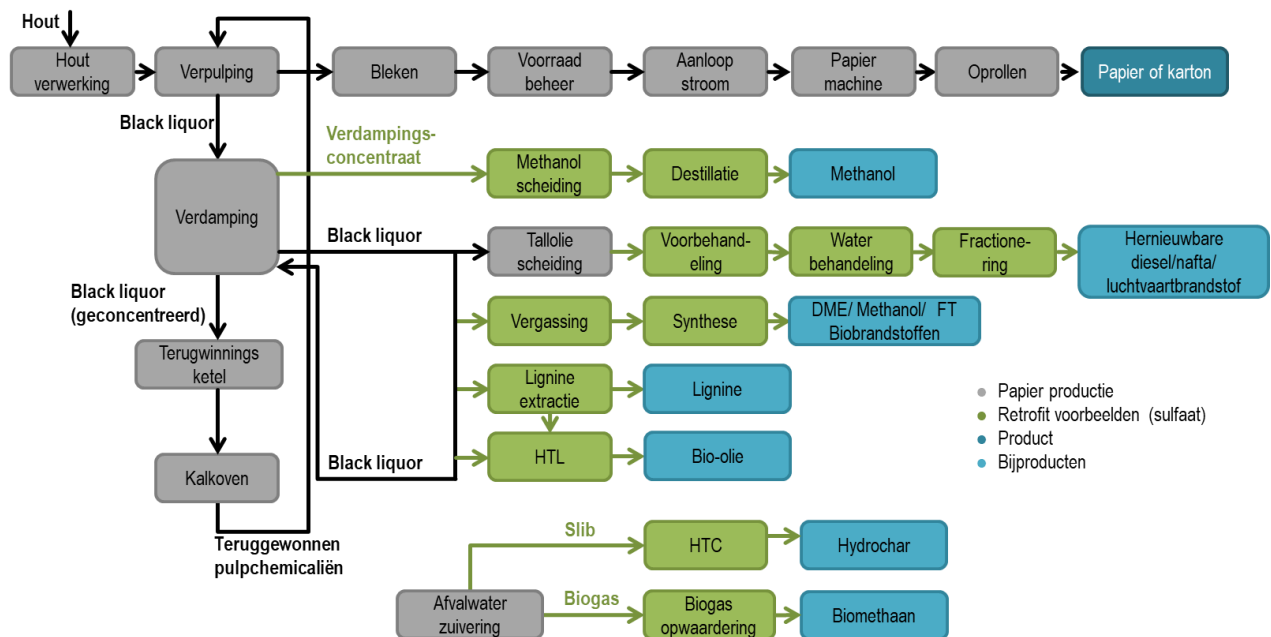


Figuur 36: Schematisch diagram van het Kraft kookproces (KnowPulp, 2019)

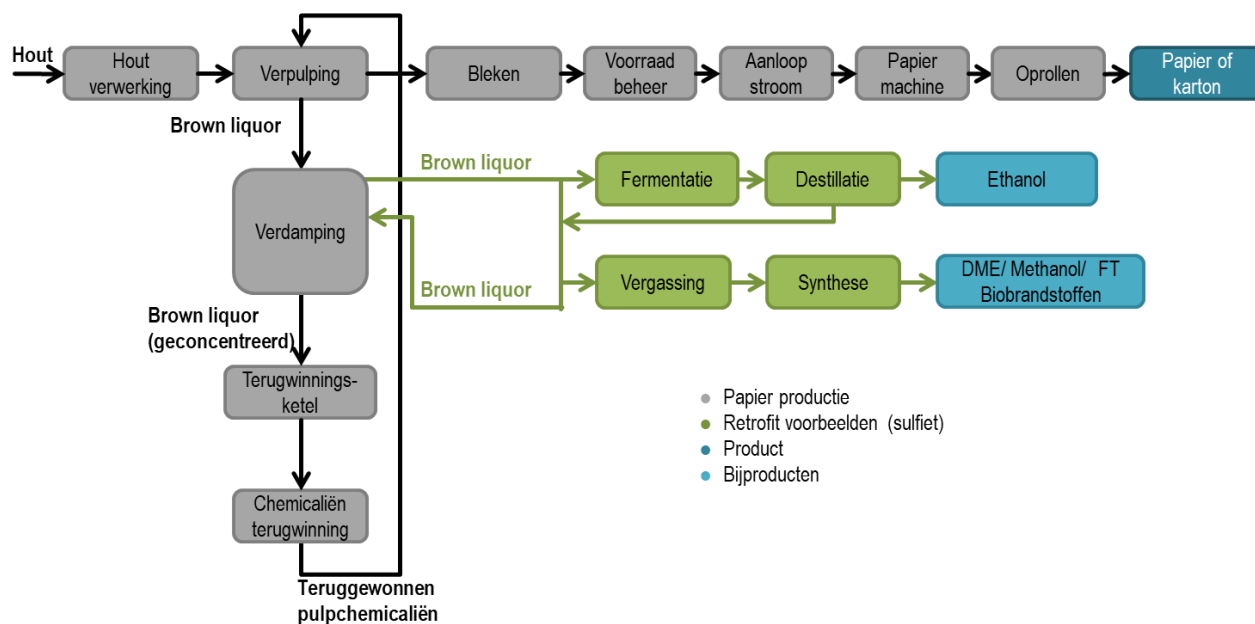




**Figuur 37: Het wassen van vuile pulp levert black liquor en gewassen pulp op (KnowPulp, 2019)**



**Figuur 38: Methoden voor het gebruik van black liquor**



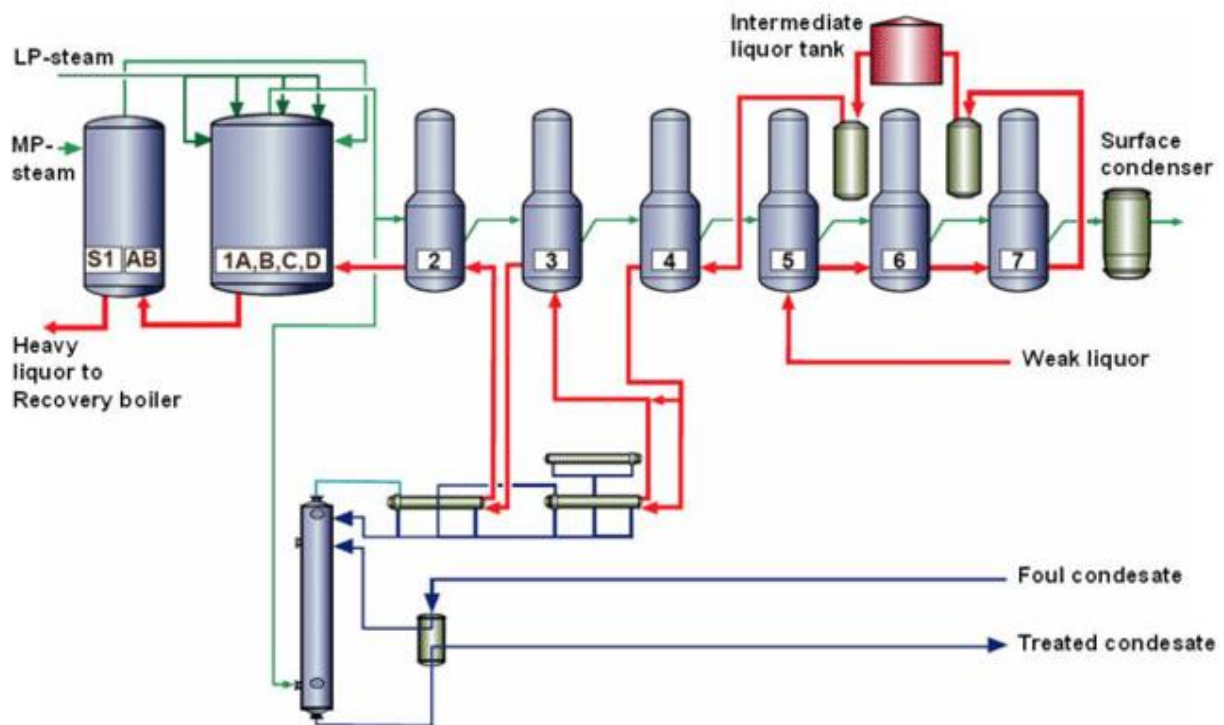
**Figuur 39: Methoden voor het gebruik van brown liquor**

### 8.2.3 Black liquor verdamping

Wanneer de black liquor van het Kraftpulpingsproces door verdamping wordt geconcentreerd, worden verschillende fracties van elkaar gescheiden (Figuur 39). Een van deze fracties, "zeep" genaamd, wordt omgezet in ruwe tallolie door het toevoegen van een zuur. In plaats daarvan worden methanol en terpentijn gescheiden van het condensaat van de verdamping. Methanol en ruwe tallolie kunnen worden gezuiverd en omgezet in biobrandstoffen of andere producten. Dit wordt verder besproken in de paragrafen 8.5 en 8.11.

Moderne pulpfabrieken zijn vaak **zelfvoorzienend** op het gebied van warmtevoorziening en kunnen ook overtollige energie produceren. De overtollige energie wordt vooral geproduceerd als er niet op dezelfde locatie een papierfabriek is die een aanzienlijk deel van de geproduceerde energie gebruikt. Aangezien niet alle organische stoffen hoeven te worden verbrand om voldoende energie op te wekken voor de productie van pulp, kan een deel van de organische stoffen in black liquor worden gewonnen, bijvoorbeeld in de vorm van lignine of andere bioraffinage.

Recentelijk zijn er ook processen ontwikkeld om een deel van de **lignine** te scheiden van Kraft-black likeur. Lignine kan worden neergeslagen door toevoeging van CO<sub>2</sub> of zuren, zoals zwavelzuur. Door het verlagen van de pH-waarde van de black liquor tot onder negen, kan de lignine neerslaan. De neergeslagen lignine kan daarna gebruikt worden als vaste brandstof of verder worden omgezet in biobrandstoffen, chemicaliën of materiële producten. Lignine uit het Kraft-proces bevat echter zwavel, waardoor het gebruik ervan als brandstof wordt beperkt.

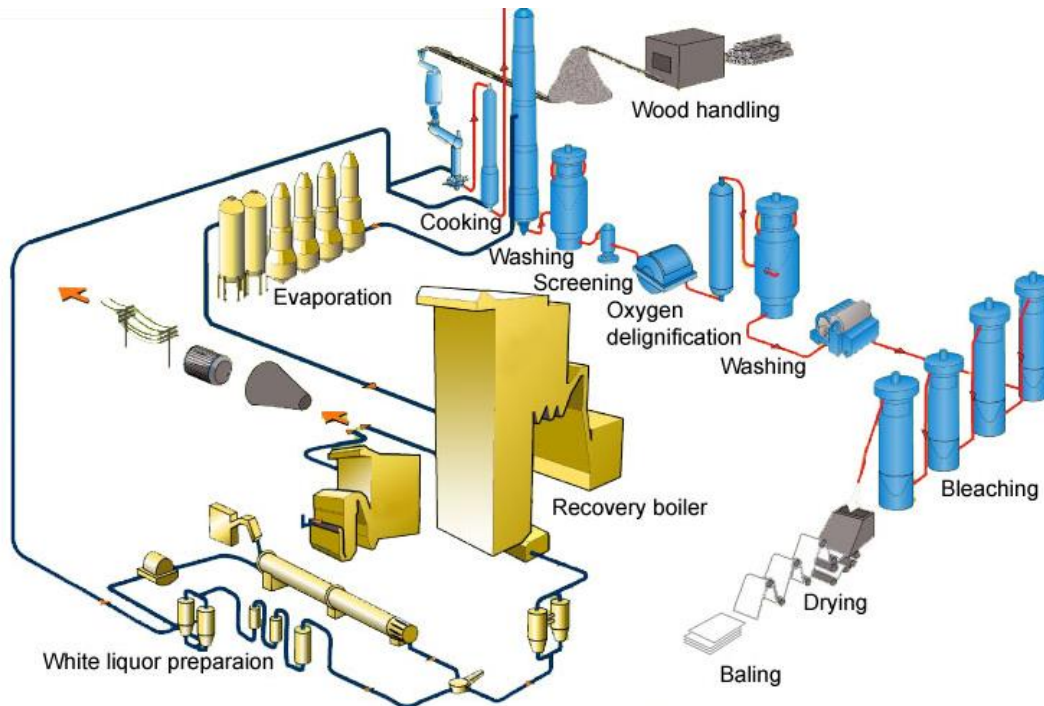


**Figuur 40: Standaard 7-staps black liquor verdampingsinstallatie uitgerust met een superconcentrator (KnowPulp, 2019)**

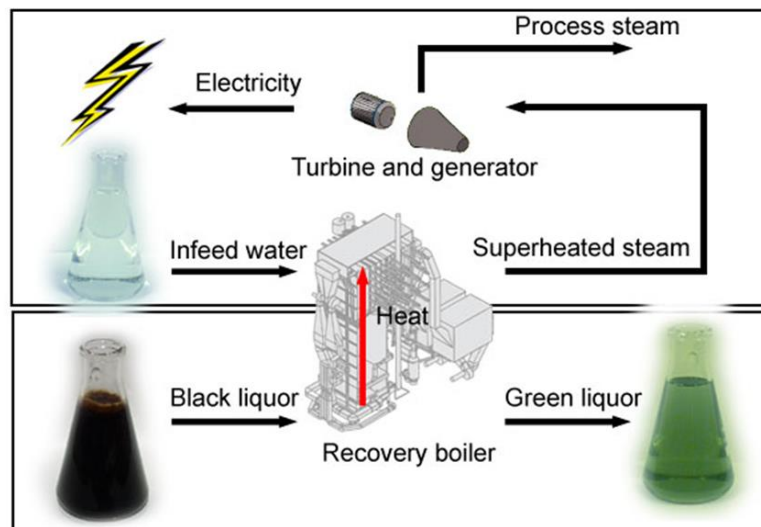
#### 8.2.4 Terugwinningsproces

Na verdamping bevat de sterke black liquor meestal slechts 15-25% water. Het wordt verbrand in de terugwinningsketel (Figuren 41 en 42) om de energie-inhoud volledig te benutten en tegelijkertijd de kookchemicaliën in de vorm van anorganische zouten, ook wel **green liquor** genoemd, terug te winnen. In het Kraft-proces zijn deze anorganische chemische residuen natriumcarbonaat en natriumsulfide. Natriumsulfide, dat in het Kraft-pulpproces nodig is als kookstof, wordt geproduceerd uit natriumsulfaat bij hoge temperatuur en onder zuurstofarme omstandigheden in de terugwinningsketel.

Voordat de chemicaliën weer in het pulpproces worden ingezet, moet natriumcarbonaat worden omgezet in natriumhydroxide wat gedaan kan worden in het recycling proces door het toevoegen van calciumoxide. In dit proces wordt het reactieve calciumoxide omgezet in inactief calciumcarbonaat, terwijl natriumcarbonaat wordt omgezet in natriumhydroxide. Het calciumcarbonaat moet worden geregenereerd tot calciumoxide door het te verhitten tot een hoge temperatuur in een afgescheiden kalkoven om CO<sub>2</sub> vrij te maken. In een kalkoven worden meestal fossiele brandstoffen zoals aardgas en stookolie gebruikt. De laatste tijd worden echter ook biogas, lignine, zaagsel of gas van de biomassa-vergassing voor dit doel gebruikt.



**Figuur 41: Principe van de chemische terugwinning in het Kraftproces (KnowPulp, 2019)**



**Figuur 42: Terugwinning van chemicaliën en energie in de ketel voor de terugwinning van black liquor (Know Pulp, 2019)**

### 8.2.5 Afvalwaterzuivering

Afvalwater van het pulpproces en het ontschorsen van stammen wordt meestal behandeld in een afvalwaterzuiveringsinstallatie van een fabriek. Het resterende organische gehalte in het afvalwater zou schadelijk zijn voor het milieu als het zonder scheiding en behandeling zou worden geloosd. In een actief-slibproces wordt het organische gehalte van het afvalwater gereduceerd door bacteriën en wordt er slib geproduceerd. De uitdaging van dit proces is dat er grote hoeveelheden **nat slib** wordt geproduceerd, wat moeilijk te verwerken is. Het is mogelijk om ofwel de hoeveelheid slib te verminderen door gisting en biogas te produceren, ofwel de wateroplossing van het slib te verwarmen tot meer dan 200°C in een zogenaamd

hydrothermisch carbonisatieproces om het slib om te zetten in een steenkoolachtig product met een laag watergehalte en een waterige fase.



**Figuur 43: Actief slibproces dat organische componenten uit afvalwater verwijdt (KnowPulp, 2019)**

### **8.3 Black/brown liquor ethanol**

In het **zure sulfietpulpingsproces**, waarbij de pulping plaatsvindt bij een lage pH-waarde, wordt het hemicellulosegedeelte van het hout omgezet in eenvoudige suikers, ook wel monomere suikers genoemd. Monomere suikers kunnen direct worden gefermenteerd tot ethanol door middel van gist of worden gefermenteerd om biogas te produceren. Momenteel wordt ethanol geproduceerd in verschillende oude pulpfabrieken die gebaseerd zijn op sulfietpulptechnologie. Het voordeel van deze aanpak is dat de suikers die geschikt zijn voor de productie van ethanol makkelijk kunnen worden verkregen als bijproduct van de pulpproductie uit het hemicellulosegedeelte van hout. Bepaalde soorten suikers, zoals het 5-koolstofatoom dat suikers zoals xylose bevat, worden niet efficiënt omgezet in ethanol en daarom wordt er vaak ook nog biogas geproduceerd. In tegenstelling tot de productie van ethanol uit processen waarbij het cellulose-deel wordt gebruikt, is er geen dure enzymatische hydrolysestap nodig die een lange reactietijd vereist. De meeste pulpfabrieken maken tegenwoordig echter gebruik van het **Kraftpulpingsproces**, wat de mogelijkheden voor ethanolproductie beperkt, aangezien de aanpak alleen kan worden toegepast bij sulfietpulp.

Voorbeelden van sulfietfabrieken die tegenwoordig in bedrijf zijn en ethanol produceren zijn de Domsjö-fabriek in Örnsköldsvik (Zweden) en Borregaard in Sarpsborg (Noorwegen). De Domsjö-fabriek produceert jaarlijks 20.000 ton ethanol en 90 GWh biogas uit de reststromen van het gebruik van 1,4 miljoen m<sup>3</sup> houtgrondstof voor speciale pulp (voornamelijk voor textieltoepassingen) en de productie van lignine (gebruikt als betonadditieven) (Domsjö, 2019). De fabriek maakt gebruik van een tweestaps natriumsulfietpulpproces (Hankikoski, 2007).

De Borregaard-bioraffinaderij in Sarpsborg, die speciale pulp produceert, maakt 20 miljoen liter ethanol per jaar, evenals speciale lignine en een scala aan verschillende producten (Borregaard, 2017). De geproduceerde ethanol wordt gebruikt voor chemische producten of als oplosmiddel, maar wordt ook verkocht aan Statoil voor transport gebruik (European Biofuels Technology Platform, 2016).

### **8.4 Black liquor vergassing tot DME**

Een black liquor bijproduct van verdamping is een dikke liquor die organische componenten, lignine, ongeveer tien procent restwater, en ongeveer voor een derde anorganische zouten

bevat. Black liquor kan worden vergast tot synthese gas (IEA, 2007). Het synthese gas kan verder worden omgezet in biobrandstoffen die geschikt zijn voor transport zoals Fisher Tropsch (FT)-diesel, methanol of Dimethyl ether (DME). Deze producten hebben meestal een hogere waarde dan de warmte en het vermogen dat wordt verkregen door de verbranding van black liquor in een terugwinningsketel. Bovendien kunnen tijdens de vergassing de kookchemicaliën worden teruggewonnen, aangezien organische stoffen uit black liquor worden vergast. Op deze manier wordt natriumsulfaat weer omgezet in natriumsulfide en kan het worden gebruikt als kookchemicalie in de pulpproductie.

DME is een stof met vergelijkbare eigenschappen als LPG. Het kan bij kamertemperatuur onder druk vloeibaar worden gemaakt (Røj, 2017). Het kan ook rechtstreeks of uit methanol worden geproduceerd. Het gebruik van DME als nieuwe dieselbrandstof in auto's en vrachtwagens werd door Volvo bewezen. DME heeft gunstige brandstofeigenschappen, zoals een cetaangetal dat vergelijkbaar is met dieselbrandstof.

De uitdaging bij de black liquor vergassing is het corrosieve karakter bij hoge temperaturen en het smelten van de alkalimetaalzouten in de vergasser (Navqi en Yan, 2010). Bovendien wordt de werking van de pulpfabriek bemoeilijkt wanneer de black liquor vergassing als retrofit in een pulpfabriek wordt gebouwd. In een conventionele installatie die gebruik maakt van een terugwinningsketel, wordt alle zwavel gerecycled als  $\text{Na}_2\text{S}$ , maar in de black liquor vergassing wordt ook waterstofsulfide gevormd. Aangezien er extra natriumhydroxide nodig is om waterstofsulfide terug in  $\text{Na}_2\text{S}$  om te zetten, is een hogere capaciteit van de verdampingsinstallatie nodig (Navqi en Yan, 2010).

LTU Green Fuels, voorheen Chemrec, heeft een installatie voor de vergassing van black liquor in Luleå (Zweden) geëxploiteerd en heeft aangetoond dat de vergassing van black liquor tot dimethyl ether (DME) op een schaal van 4 metrische tonnen per dag kan plaatsvinden. Black liquor wordt in deze vergassingsinstallatie als vloeistof gespoten en het geproduceerde syngas wordt snel afgekoeld door het te blussen (Landälv, 2016).

### **8.5 Methanol uit pulpfabrieken**

Tijdens de verdamping van black liquor in het Kraftpulpproces wordt een kleine hoeveelheid **methanol** (meestal tussen 7-15 kg per oven gedroogde ton pulp) geproduceerd (Jensen et al., 2012). Het kan in vloeibare vorm worden gescheiden van vervuilde condensaten van de verdamping van black liquor met een condensaatbehandelingssysteem. Op die manier kan de stof die anders zou worden beschouwd als een afvalstroom die moet worden verwijderd of behandeld met een waterzuiveringssysteem, worden opgeslagen en gebruikt (Valmet, 2018b). Methanol wordt vaak gebruikt door verbranding in de terugwinningsketel en in de kalkoven. Methanol is ook nuttig als oplosmiddel en bij het maken van chemicaliën, zoals azijnzuur en formaline, en het kan worden gebruikt als brandstof in voertuigen.

De methanol uit het pulpproces bevat zwavelhoudende, prikkelende onzuiverheden, die het gebruik ervan hebben belemmerd. Er zijn verschillende zuiveringssystemen ontwikkeld. Zo heeft Andritz een zuiveringsproces ontwikkeld (Andritz, 2019a) en is in Mörrum in de pulpfabriek van Södra in Zweden (Andritz, 2019b) een fabriek in aanbouw die gericht is op de productie van 5.000 ton methanol.



**Figuur 44: Scheiding van methanol van de pulpfabriek: opslagtanks en vuilcondensaatafvoersysteem (KnowPulp, 2019)**

## **8.6 Benutting van pulp en papierslurry**

In de waterzuiveringssystemen van de pulp- en papierfabrieken worden slurry's geproduceerd die een grote hoeveelheid water bevatten. Ze kunnen niet voldoende worden gedroogd door alleen maar mechanisch te persen. Daarom is het een gebruikelijke manier om het samen met andere gedroogde brandstoffen te verbranden, hoewel het economisch gezien niet erg aantrekkelijk is.

### **8.6.1 Hydrothermische carbonisatie (HTC)**

Hydrothermische carbonisatie (HTC) is een methode om water te scheiden en een steenkoolachtig product (**hydrochar**) te produceren van het slib. Bij hydrothermische carbonisatie wordt de grondstof in een waterige oplossing verhit tot ongeveer 200-250 °C, zodat een koolvormig product ontstaat (Figuur 45), dat zich na afkoeling scheidt van het water in de waterige fase. Aangezien de reacties in het proces in de vloeibare fase plaatsvinden, wordt de druk in het proces hoog genoeg gehouden om de oplossing in vloeibare vorm op procestemperatuur te houden.

Het grootste deel van de energie-inhoud in het slib wordt vastgehouden in het kolenachtige product, terwijl slechts een klein deel van de organische stof naar de waterige fase gaat. Een klein deel komt ook vrij in de gasfase, voornamelijk als CO<sub>2</sub>. De gemiddelde samenstelling van hydrochar uit pulp- en papierslib wordt in Tabel 10 weergegeven.



**Figuur 45: Biochar en hydrochar geproduceerd met het HTC-proces van C-Green (Bron: C-Green)**

**Tabel 10: Samenstelling (kg per ton DS slib) van hydrochar uit de HTC-pilot van C-Green (Bron: C-Green)**

	Raw sludge	Wet- ox	Hydro- char	Off- gas	Filtrate return
<b>C</b>	480	0	275	170	35
<b>H</b>	55	0	25	10	20
<b>O</b>	235	250	95	200	190
<b>S</b>	25	0	10	0	15
<b>N</b>	80	0	25	0	55
<b>Ash</b>	125	0	109	0	16
<b>Total</b>	<b>1000</b>	<b>250</b>	<b>539</b>	<b>380</b>	<b>331</b>

C-Green Technology en Stora Enso bouwen een HTC-demonstratiefabriek bij de semi-chemische kartonfabriek in Heinola (Finland). De geplande HTC-installatie zou 25.000 ton slib van de molen omzetten in biochar. Deze hoeveelheid zou ongeveer 13 GWh bio-energie opleveren en 7.000 ton CO<sub>2</sub>-equivalent besparen (Bioenergy International, 2018).

### 8.6.2 Anaerobe vergisting (AV)

Een andere optie is het behandelen van slib door middel van anaerobe vergisting (AV), zodat er biogas wordt geproduceerd en de hoeveelheid slib wordt verminderd. Deze AV-installaties worden gekenmerkt door de grote hoeveelheden grondstof uit de pulp- en papierindustrie en het hoge organische gehalte van het slib. Bovendien is er een lager risico bij de behandeling van het materiaal dan bij slib uit gemeenschappelijke afvalwaterzuiveringsinstallaties, aangezien slib uit de afvalwaterzuiveringsinstallaties van pulpfabrieken doorgaans geen schadelijke microben bevat. Een nadeel is echter dat het slib remmende bestanddelen voor de gisting kan bevatten.





**Figuur 46: Slib uit de afvalwaterzuivering van een pulpfabriek (KnowPulp, 2019)**

In Äänekoski (Finland), in de Metsä Fibre's Bioproduct Mill, verwerkt een biogasinstallatie het afvalwaterzuiveringsslib met AV waarbij biogas en pellets worden geproduceerd (Biokaasuyhdistys, 2016). In 2017 werd aangekondigd dat een deel van het biogas uit de vergistingsinstallatie van Metsä Fibre wordt opgewaarderd tot biomethaan (Bio-energie, 2017).

Scandinavian Biogas heeft een co-vergistingsconcept ontwikkeld onder de naam Effisludge, waarbij afvalwaterzuiveringsslib wordt vergist met andere complementaire substraten. Zij demonstreren de biogasproductie uit afvalwaterzuiveringsslib van de pulpfabriek in Norske Skog (Noorwegen) (Scandinavian Biogas, 2019).

Biogas kan ook worden geproduceerd uit semi-mechanische pulpproductiecondensaten. Dit werd in 10 dagen tijd onderzocht in batchtesten van het laboratorium bij de kartonfabriek in Heinola in Finland. Verwacht wordt dat de anaerobe behandeling van condensaten de belasting van de afvalwaterzuiveringsinstallatie zal verminderen en de biogasproductie zal verhogen (Lotti, 2013).

### **8.7 Lignine extractie**

Lignine uit black liquor wordt meestal verbrand in een terugwinningsketel. Lignine die van het Kraft-proces wordt gescheiden, kan als energieproduct worden gebruikt, bijvoorbeeld als brandstof in een kalkoven of worden omgezet in een meer geavanceerde biobrandstof door middel van hydrothermische liquefactie. Lignine kan in het Kraft-proces uit de black liquor worden teruggewonnen door eerst de pH te verlagen tot ongeveer 9-10 met behulp van CO<sub>2</sub> om het uit de black liquor oplossing te laten neerslaan en vervolgens de onzuiverheden, zoals natrium, uit te logen in een oplossing met zwavelzuur (Andritz 2019c).

Valmet heeft een technologie ontwikkeld voor ligninescheiding onder de naam LignoBoost (Valmet, 2018a). In dit proces is het mogelijk om de lignine in verschillende kwaliteiten op maat te maken. Het proces is op ware grootte gedemonstreerd in de Stora Enso Sunila fabriek (Finland) (lignineproductie 50.000 t/jaar) en door Domtar in de VS en op proefschaal in Bäckhammar (Zweden).

Andere ligninescheidingsprocessen in ontwikkeling zijn LignoForce van FPInnovations dat wordt gedemonstreerd in de pulpfabriek West Fraser in Canada (Kouisni et al., 2016). In dit proces is een afzonderlijke oxidatiestap opgenomen die stinkende en vluchtige zwavelcomponenten met zuurstof oxideert tot niet-stinkende en niet-vluchtige componenten. Daarnaast is er het Sequential Liquid Lignin Recovery and Purification (SLRP) proces, waarbij

lignine wordt gescheiden door middel van zwaartekracht en niet hoeft te worden gefilterd, zoals bij de andere processen (Velez & Thies, 2015).



**Figuur 47: Lignine gescheiden uit het Kraft-proces (KnowPulp, 2019)**

### **8.8 Hydrothermische liquefactie**

Hydrothermische liquefactie (HTL) is een interessant proces om de energie-inhoud van natte, organische stromen te verhogen tot een biocrude product zonder te hoeven drogen. De waterige fase die in HTL als bijproduct wordt geproduceerd, kan ook in de pulpfabriek worden verwerkt door verdamping en verbranding in de terugwinningsketel.

Black liquor, lignine, zaagslib of andere organische grondstoffen, kunnen door HTL worden omgezet in een zware olie zoals biocrude olie (Figuur 48). Deze geproduceerde olie moet in een olieraffinaderij verder worden opgewerkt om als transportbrandstof gebruikt te kunnen worden. HTL is een proces waarbij de grondstof wordt verwerkt in een waterige oplossing bij een hoge temperatuur, meestal tussen 270-370 °C en een verhoogde druk van 5-30 MPa.

Voorbeelden van bedrijven die bijdragen aan de ontwikkeling van het liquefactieproces door middel van HTL of soortgelijke processen zijn onder andere Renfuels, Suncarbon, SCA, Silva Green energy, Steeper Energy en Licella.

Renfuel produceert een biocrude product genaamd Lignol via een katalysatorproces uit lignine. Ze hebben hun technologie gedemonstreerd in Bäckhammar (Zweden) bij de demofabriek van LignoBoost en momenteel bouwen ze een productiefabriek in Vallvik (Zweden) in samenwerking met de pulpfabriek Rottneros en de olieraffinaderij Preem. De opening van de fabriek is gepland voor het eerste kwartaal van 2021 (Renfuels, 2019).

Suncarbon scheidt lignine door middel van membraanscheiding en zet de afgescheiden lignine om in gedepolymeriseerde lignine via hydrothermische behandeling (Suncarbon, 2019) SCA onderzoekt ook de productie van brandstoffen uit black liquor, waarschijnlijk door middel van HTL (Papnews, 2016).

Silva Green energy bouwt een demonstratie-installatie in Tofte (Noorwegen), waarin bosresiduen worden omgezet in biocrude door middel van HTL (BiofuelsDigest, 2018).



**Figuur 48:** HTL-crude geproduceerd uit black liquor (Bron: VTT)

### ***8.9 Vervanging van fossiele brandstoffen bij de energieproductie van papierfabrieken***

Bestaande papierfabrieken in Midden- en Zuid-Europa zijn sterk afhankelijk van aardgas. Aardgas is in Italië, Nederland, Spanje, het Verenigd Koninkrijk en Duitsland goed voor meer dan 50% van de brandstoffen die voor de papierproductie worden gebruikt (CEPI, 2018a). De fabrieken in Duitsland, Polen, Tsjechië en Hongarije gebruiken daarnaast ook aanzienlijke hoeveelheden steenkool. Een enorm potentieel voor bio-energie retrofitting ligt in het vergroten van het aandeel bio-energie van de Europese papierfabrieken.

Hoewel een verdere verhoging van het aandeel van biomassa technisch gezien een haalbare optie is bij papierfabrieken, hebben deze fabrieken slechts beperkte toegang tot biobased energiebronnen, gebrek aan opslagfaciliteiten en logistieke beperkingen (CEPI, 2018a). Aardgas kan worden vervangen door biogas uit externe bronnen en installaties kunnen efficiënter energie terugwinnen uit slib en afval. Het CEPI (CEPI, 2018a) schat dat tot 10% van het energieverbruik op een papierfabrieksterrein kan worden afgedekt met biogas uit anaerobe afvalwaterzuivering.



**Figuur 49:** Schors is een mogelijke bron van bio-energie in een pulpfabriek (Know Pulp, 2019)

### 8.10 Alternatieve brandstoffen in de kalkoven en de schorsvergassing

In pulpfabrieken wordt de black liquor meestal verbrand in de terugwinningsketel om warmte en kracht te produceren. Schors, als bijproduct van ontschorsing, wordt ook meestal verbrand of vergast. In beide gevallen ontstaan er extra warmte en elektriciteit. Sommige pulpfabrieken verkopen een deel van de geproduceerde warmte aan een gemeenschappelijk stadsverwarmingssysteem. Als alternatief kan schors worden verkocht aan een afzonderlijk energiebedrijf dat warmte en elektriciteit produceert voor de fabriek en/of een nabijgelegen gemeenschap.

Het grootste deel van de energie voor pulpfabrieken wordt geproduceerd uit de grondstof zelf, bijvoorbeeld pulphout. De kalkoven is van oudsher een van de grootste verbruikers van fossiele brandstoffen in de pulpfabriek. De gebruikte fossiele brandstoffen zijn onder andere aardgas of olie. Ook andere brandstoffen zoals biogas, lignine en zaagsel worden in de kalkoven gebruikt. De laatste tijd zijn de fossiele brandstoffen die gewoonlijk in kalkovens worden gebruikt, vervangen door hernieuwbare brandstoffen.

In de vezelfabriek van Metsä in Joutseno (Finland) wordt de schors vergast in een luchtvergasser en wordt het geproduceerde gas verbrand in de kalkoven. In de Metsä's Bioproduct Mill in Äänekoski (Finland) wordt de schors ook vergast voor de productie van brandstofgas voor de kalkoven. Voor een bestaande luchtvergasser die geretrofit in een twee-bedvergasser is ook de productie van synthesegas voorgesteld als een toekomstige optie om de productie van bio-energie- en hoogwaardige producten te verhogen. Het concept zou de productie van transportbiobrandstoffen zoals Fischer-Tropsch-diesel mogelijk maken met minder bijkomende investeringen.



**Figuur 50: Onderdelen van een vergassingsinstallatie (Know pulp, 2019)**

### 8.11 Hernieuwbare diesel uit resten tallolie uit pulpfabrieken

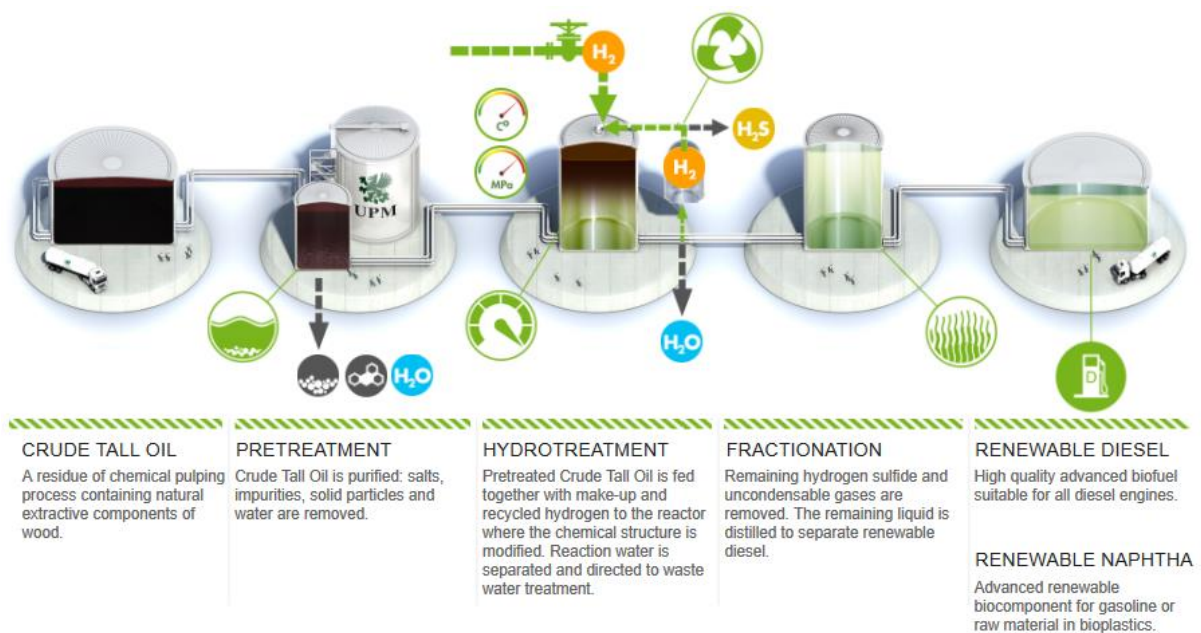
Tall olie (Figuur 51) is een aantrekkelijke grondstof voor de productie van biobrandstoffen vanwege het lage zuurstofgehalte. Het vereist dus minder behandeling dan andere grondstoffen. Ruwe tallolie wordt verkregen door het scheiden van de zeep in een Kraftpulpfabriek. De zeep wordt aangezuurd om de ruwe tallolie te scheiden. Het kan verder worden gezuiverd en geraffineerd tot fracties met verschillende kookpunten.



**Figuur 51: Monsters van ruwe olie en schors in het Pro Nemus Visiting Centre van de Metsä Group**

Een nadeel van het gebruik van tallolie voor de productie van biobrandstoffen is dat deze slechts in beperkte hoeveelheden beschikbaar is en dat een deel ervan voor waardevollere chemicaliën dan biobrandstoffen kan worden gebruikt. Voor tall olie biobrandstoffen worden in Zweden steunmaatregelen genomen ter bevordering van de productie van biobrandstoffen in plaats van chemische stoffen.

Sunpine in Noord-Zweden verestert tallolie met methylester. Het product wordt in de Preem-raffinaderij in Piteå (Zweden) verder omgezet in transportbrandstoffen (Sunpine, 2019). UPM Bioraffinaderij produceert transportbrandstoffen in Lappeenranta (UPM, 2019). De capaciteit van de installatie bedraagt 120 miljoen liter hernieuwbare diesel en nafta per jaar. De verbeterde technologie van UPM voor de productie van biobrandstoffen wordt verder toegelicht in Figuur 52.



**Figuur 52: Stroomdiagram van de duurzame dieselproductie van UPM (Bron: UPM<sup>49</sup>)**

<sup>49</sup> <https://www.upmbiofuels.com/about-upm-biofuels/production/>

## 8.12 Conclusie

Bio-energie-retrofits in de pulp- en papierindustrie kunnen worden gebruikt om fossiele brandstoffen die ter plaatse worden gebruikt voor de productie van energie (aardgas, steenkool en stookolie) te vervangen door hernieuwbare alternatieven of om de productie van hernieuwbare brandstoffen uit procesbijstromen mogelijk te maken.

De mogelijkheden met betrekking tot de vervanging van fossiele brandstoffen door bio-energie in papier- en pulpfabrieken zijn sterk afhankelijk van het terrein-ecosysteem. Pulpfabrieken hebben verschillende exploiteerbare bijstromen. Of deze bijstromen voldoende zijn om het energieverbruik van de fabrieken te dekken, is afhankelijk van de gebruikte pulpproductietechnologie. In het Kraftpulpingsproces kunnen de bijstromen effectief worden benut en vaak produceren de fabrieken overtollige energie die kan worden verkocht, vooral als het niet geïntegreerd is met een papierfabriek. Bij sulfietpulp kan de suiker die in de black/brown liquor achterblijft, worden omgezet in biogas, terwijl lignine, dat wordt omgezet in lignosulfonaten, doorgaans wordt verkocht en niet wordt verbrand. In de pulpindustrie worden fossiele brandstoffen gewoonlijk vervangen door schors (residu van ontschorsing) en biogas (van de anaerobe vergisting van slib of vloeibaar afvalwater van de afvalwaterzuivering van de fabriek). Op zichzelf staande papierfabrieken, die niet samen met een pulpfabriek zijn gevestigd, hebben niet altijd de beschikking over voldoende grondstoffen voor de productie van bio-energie. Biogas en hydrochar uit het afvalwaterzuiveringsslib zou echter ook het bio-energieaandeel van deze installaties kunnen vergroten.

Naast de vervanging van fossiele brandstoffen ter plekke is het ook mogelijk om de faciliteit te retrofitten voor de productie van hernieuwbare brandstoffen voor externe verkoop. Brandstoffen die kunnen worden geproduceerd zijn onder andere biogas, lignine, bio-ethanol, hernieuwbare diesel of biocrudes. Bij het terugwinnen van de chemicaliën in de Kraftpulpfabrieken wordt een overmaat warmte geproduceerd dan er in de fabriek nodig is, zelfs als er op de locatie alleen bijstromen worden gebruikt voor de productie van energie. Deze warmte kan door een turbine worden omgezet in stroom en ter plekke worden gebruikt of verkocht. Het omzetten van de overtollige warmte in stroom is echter niet erg energie-efficiënt. Daarom, is het een aantrekkelijke optie om een deel van de bijstromen en de overtollige warmte te gebruiken voor de productie van bio-energieproducten, zoals lignine en vloeibare biobrandstoffen.

De haalbaarheid van bio-energie-retrofits hangt sterk af van het type pulpproces dat wordt gebruikt. In het sulfiet kookproces is valorisatie van hemicellulose tot bio-ethanol of biogasproductie een optie. In het Kraft-proces is de valorisatie van suikers na het koken uit black liquor echter moeilijk, omdat ze tijdens het proces worden afgebroken. Alleen in het speciale geval waarbij het de pulp voor textieltoepassingen wordt opgelost, kan een bijproductstroom van hemicellulose ook in het Kraft-proces worden gebruikt. Over het algemeen kan in het Kraft-proces lignine van black liquor worden gescheiden en als brandstof direct in de kalkoven worden gebruikt, in plaats van fossiele brandstoffen. Het kan ook worden omgezet in biocrude door hydrothermische liquefactie. Het biocrude product kan in een olieraffinaderij verder worden geraffineerd tot hoogwaardige transportbiobrandstoffen. Het is ook mogelijk om een deel van de black liquor direct om te zetten in biocrude door middel van hydrothermische liquefactie.

In het Kraft-proces worden bijstromen geproduceerd, zoals methanol uit de verdamping van black liquor en tallolie uit de zeep die door verdamping van black liquor wordt gescheiden. Methanol kan worden ontdaan van stinkende onzuiverheden en gebruikt worden als biobrandstof of als chemische stof. De tallolie of de zware fracties uit verdere raffinage, zoals tallolie pitch, kunnen verder worden omgezet in hernieuwbare diesel en benzine brandstoffen. Hernieuwbare brandstoffen zijn echter niet het enige gebruik voor methanol en tallolie, maar kunnen ook worden omgezet in meer waardevolle producten zoals functionele voedingsmiddelen (sterolen) en verven (bindmiddelen). Voor semi-chemische processen,

zoals vrijwel neutrale sulfietpulp, kunnen azijnzuurhoudende condensaten meestal worden gebruikt bij de productie van biogas.

Bij alle pulpprocessen kan schors, die een bijproduct is dat niet verder niet gebruik wordt bij de pulpproductie, voor de productie van warmte en elektriciteit in een aparte ketel worden gebruikt, of tot brandstofgas worden vergast. Het brandstofgas kan worden verbrand in plaats van fossiele brandstof in de kalkproductie bij de chemische terugwinning. Bovendien kan het als zodanig worden verkocht of opgeslagen of geraffineerd worden in een vloeibare vorm of worden omgezet in biomethaan dat aan het gasnet kan worden toegevoegd.

In het algemeen ontstaan in fabrieken ook afvalwater en slib. Deze afvalstromen kunnen worden verwerkt tot biogas, hoewel sommige stromen, zoals water van ontschorsing, stoffen kunnen bevatten die de productie van biogas remmen. Een andere mogelijkheid is om het slib om te zetten in een steenkoolachtig product (hydrochar) door middel van een hydrothermisch carbonisatieproces. Hydrochar, dat een hoge energie-inhoud heeft, kan energetisch worden gebruikt.

De bio-energie-retrofitopties met betrekking tot de pulp- en papierindustrie bevinden zich op verschillende niveaus van technische volwassenheid, wat de exploitatiemogelijkheden belemmert. Het vervangen van fossiele brandstoffen kan een technisch haalbare optie zijn. Er bestaan commerciële processen die gericht zijn op het gebruik van bijstromen, zoals de verbranding of vergassing van schors, de productie van biogas uit afvalproducten van fabrieken, de productie van ethanol uit black liquor, het omzetten van tallolie tot transportbrandstoffen en de scheiding van lignine uit Kraft black liquor. De omzetting van schors en black liquor tot biobrandstoffen via vergassing, de zuivering van methanol, de productie van biocrudes uit lignine en black liquor en de hydrothermische carbonisatie van slib, zijn gedemonstreerd in proeffabrieken of demonstratie-installaties die verbonden zijn met pulpfabrieken.

## Referenties

- Agora Energiewende and Sandbag (2019): The European Power Sector in 2018. Up-to-date analysis on the electricity transition. <https://sandbag.org.uk/wp-content/uploads/2019/01/The-European-Power-Sector-in-2018-1.pdf>
- Andritz (2019a) ANDRITZ methanol plant. - <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/evaporation-plants/methanol-plants> [8.3. 2019]
- Andritz (2019b) ANDRITZ to supply bio-methanol plant for Södra's Mönsterås mill in Sweden. - <https://www.andritz.com/group-en/news-media/pulp-paper/2018-05-18-soedra-group> [8.3. 2019]
- Andritz (2019c) ANDRITZ Lignin Recovery Technology for Kraft Mills - <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/lignin-recovery> [8.3.2019]
- Bartels, J. & Reinders, M.J. (2011) Consumer innovativeness and its correlates: A propositional inventory for future research. Journal of Business Research, 64, 601-609.
- Bioenergy Europe (2017) Statistical Report 2017 Edition
- Bioenergy Europe (2019) Statistical Report 2019 Edition
- BiofuelsDigest (2018) The Silver in Silva: The Story of Steeper Energy and SGF's's \$59M advanced biofuels project in Norway. - <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/01/16/the-silver-in-silva-the-story-of-steeper-energys-59m-advanced-biofuels-project-in-norway/> [8.3.2019]
- Biokaasuyhdistys (2016) Äänekoski Biogas Production. - <http://www.biokaasuyhdistys.net/wp-content/uploads/2018/05/EE-MF-presentation.pdf> accessed [8.3.2019]
- Braune M., Grasemann E., Gröngröft A., Klemm M., Oehmichen K., Zech K., (2016) Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland - Stand der Technik und Optimierungsansätze DBFZ Report Nr. 22; [https://www.dbfz.de/fileadmin/user\\_upload/Referenzen/DBFZ\\_Reports/DBFZ\\_Report\\_22.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_22.pdf)
- CarbonBrief (2019) Mapped: The world's coal power plants. - <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-power-plants> [26.10.2019]
- CEPI (2017) Key Statistics 2017 - European Pulp and Paper Industry. <http://www.cepi.org/keystatistics2017>
- CEPI (2018a). "Summary for Policy Makers - The Challenge : Decarbonising Whilst Being Recycling Pioneer."
- CEPI (2018b) "Types of Pulping Processes." Statistics. - <http://www.cepi.org/node/22334>.
- CEPI (2019) Key Statistics 2018 - European pulp & paper industry. Statistics. - <http://www.cepi.org/system/files/public/documents/publications/Final%20Key%20Statistics%202018.pdf>
- Chan, Y., Kantamaneni, R. (2015) Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry and on Possible Policy Mechanisms. A report submitted by ICF Consulting Limited. <https://ec.europa.eu/energy/en/studies/study-energy-efficiency-and-energy-saving-potential-industry-and-possible-policy-mechanisms>
- Cho, J. (2006) The mechanism of trust and distrust formation and their relational outcomes. Journal of Retailing, 82, 25-35.
- Defra (2008) A framework for proenvironmental behaviours. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Diederichs, Gabriel W., Mohsen Ali Mandegari, Somayeh Farzad, and Johann F. Görgens (2016). Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice. Bioresource technology, 216, 331–39.



- Dietrich, Sebastian, Katja Oehmichen, Konstantin Zech, Franziska Müller-Langer, Stefan Majer, Jasmin Kalcher, Karin Naumann, Ronny Wirkner, Robert Pujan, Maria Braune, Arne Gröngroft, Uwe Albrecht, Tetyana Raksha, Werner Weindorf, Matthias Reichmuth, Johannes Gansler, and Alexander Schiffler (2017). Machbarkeitsanalyse für eine PTG-HEFA-Hybridraffinerie in Deutschland. Leipzig.  
[https://bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/machbarkeitsanalyse-ptg-hefa-hybridraffinerie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/machbarkeitsanalyse-ptg-hefa-hybridraffinerie.pdf?__blob=publicationFile).
- Drax Group plc (2018) Annual report and accounts 2018. <https://www.drax.com/wp-content/uploads/2019/03/Drax-Annual-report-accounts-2018.pdf> [29.10.2019]
- DSM (2013). DSM and POET to make advanced biofuels a reality by 2013.  
<https://www.dsm.com/corporate/media/informationcenter-news/2012/01/01-12-dsm-and-poet-to-make-advanced-biofuels-a-reality-by-2013.html>
- ENERGY BARGE-Building a Green Energy and Logistics Belt, Project Code: DTP1-175-3.2 (2017) National Sustainability Framework Conditions for Bioenergy Feedstock Production.  
<http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/energy-barge> [30.04.2019]
- ENERGY BARGE-Building a Green Energy and Logistics Belt, Project Code: DTP1-175-3.2 (2017b) Mapping the political and regulatory framework in the Danube region regarding biomass production for energetic use and logistics. <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/energy-barge> [30.04.2019]
- ETIP Bioenergy (2019) European Innovation and Technology Platform – Feedstocks.  
<http://www.etipbioenergy.eu/> [30.04.2019]
- EURACOAL (2017) Coal Industry Across Europe. <https://euracoal.eu/library/publications/>
- European Biofuels Technology Platform (2016) Borregaard – Commercial Plant in Sarpsborg, Norway. Biofuel Fact Sheet. [http://www.etipbioenergy.eu/images/Factsheet\\_Borregaard\\_final.pdf](http://www.etipbioenergy.eu/images/Factsheet_Borregaard_final.pdf).
- ETIP Bioenergy (2019) <http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/feedstocks/forestry/wood-chips> [20.12.2019]
- European Biogas Association (2019) Annual Report 2018 <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2019/03/EBA-Annual-Report-2018.pdf>
- European Commission (2009): DIRECTIVE 2009/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC as regards the Project co-funded by European Union funds (ERDF) 118 specification of petrol, diesel and gas-oil and introducing a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and amending Council Directive 1999/32/EC as regards the specification of fuel used by inland waterway vessels and repealing Directive 93/12/EEC, Official Journal of the European Union, June, L 140/88.
- European Commission (2013) Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions of 20 September 2013 on the new EU Forest Strategy: for forest and the forest-based sector.
- European Commission (2019) Agriculture and rural development-Biomass potential. - [https://ec.europa.eu/agriculture/bioenergy/potential\\_en](https://ec.europa.eu/agriculture/bioenergy/potential_en) [30.04.2019]
- European Commission (2019b) Renewable energy directive.  
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive> [30.04.2019]
- European Commission (2019c) Biodegradable Waste. - <https://ec.europa.eu/environment/waste/compost/index.htm> [17.09.2019]
- European Parliament (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. 30.07.2019 <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>
- Faaij A.P.C. (2018) Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature
- FAO (2019) <http://www.fao.org/3/j4504E/j4504e06.htm> [20.12.2019]

- Flach, Bob, Sabine Lieberz, Marcela Rondon, Barry Williams, and Candice Wilson (2016). EU-27. Biofuels.
- FNR (2013) Biomethane. - <https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/i/biomethane.pdf>
- Forschungszentrum Jülich (2019) Reformierung von Biokraftstoffen. [https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Forschung/BGE/Brennstoffzellenseiten/Reformierung/Reformierung%20von%20Biokraftstoffen/\\_node.html](https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Forschung/BGE/Brennstoffzellenseiten/Reformierung/Reformierung%20von%20Biokraftstoffen/_node.html)
- Geleynse S., Brandt K., Garcia-Perez M., Wolcott M., Zhang X. (2018) The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation. - Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim <https://doi.org/10.1002/cssc.201801690>
- Goldsmith, R.E. & Hofacker C.F. (1991) Measuring consumer innovativeness. Journal of the Academy of Marketing Science, 19, 209-221.
- Gröngroft, Arne (2011). 'Combined Processing of Grain and Straw to Produce Bioethanol and Other Products'. presented at the 19th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF), Verona, October 10.
- Gurría, P., Ronzon, T., Tamosiunas, S., López, R., García Condado, S., Guillén, J., Cazzaniga, N. E., Jonsson, R., Banja, M., Fiore, G., M'Barek R. (2017) Biomass flows in the European Union: The Sankey Biomass diagram- towards a cross-set integration of biomass, EUR 28565 EN, doi:10.2760/35241
- Hankikoski, S. (2014) High yield nucleophile cooking of wood chips. VTT Technical Research Centre of Finland. Research Report VTT-R-07962-13. <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2013/VTT-R-07962-13.pdf>.
- Hansen, L., Fendt, S., Janssen, A., Abelha, P., Nanou P., Joronen, T., Björklund, P. (2018). Bioficiency Project Deliverable 2.2: Performance of biomass pre-treatment. [https://2f86f8c4-58a4-4c52-a2f7-723dcc2c71ad.filesusr.com/ugd/31278e\\_95690029adb84dbf8deb8e6974a18a1f.pdf](https://2f86f8c4-58a4-4c52-a2f7-723dcc2c71ad.filesusr.com/ugd/31278e_95690029adb84dbf8deb8e6974a18a1f.pdf) [17.2.2020]
- Hirschman, E.C. (1980) Innovativeness, novelty seeking, and consumer creativity. Journal of Consumer Research, 7, 283-295.
- IEA (2007) Black Liquor Gasification - Summary and Conclusions from the IEA Bioenergy ExCo54 Workshop. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Black-Liquor-Gasification-summary-and-conclusions1.pdf> [8.3.2019]
- IEA Bioenergy (2017) Factsheet: Indirect Cofiring [http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/03/factsheet\\_indirect\\_cofiring.pdf](http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/03/factsheet_indirect_cofiring.pdf) [17.2.2020]
- IEA Clean Coal Centre (2018) Pulverized Coal Combustion (PCC) <https://www.iea-coal.org/pulverised-coal-combustion-pcc/> [17.2.2020]
- IEA (2019) Electricity Statistics. - <https://www.iea.org/statistics/electricity/logen> Corporation (2015). Costa Pinto Project. <http://www.iogen.ca/raizen-project/>
- Isfort, J., Nittinger, and V. Gollnick (2012). Auswirkung von HVO-Kraftstoffeigenschaften auf das Nutzlast-Reichweiten-Verhalten. [https://publikationen.dglr.de/?tx\\_dglrpublications\\_pi1%5Bdocument\\_id%5D=281188](https://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1%5Bdocument_id%5D=281188)
- Jensen, A., Trevor, Ip., Percy, J. (2012) Methanol purification system. PEERS Conference. <http://www.ahlundberg.com/wp/wp-content/uploads/2017/05/AHL-Methanol-Purification-System.pdf> [8.3.2019]
- Lane (2019). Patriot Renewable Fuels hires Leifmark to plan first stage of major US cellulosic ethanol project Biofuels Digest. <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2014/05/27/patriot-renewable-fuels-hires-leifmark-to-plan-first-stage-of-major-us-cellulosic-ethanol-project/>
- Kahneman, D. & Tversky, A. (1979) Prospect theory: An analysis of decision under risk. Econometrica, 47, 263-292.

- Karampinis, E., Grammelis, P., Agraniotis, M., Violidakis, I., Kakaras, E. (2014) Co-firing of biomass with coal in thermal power plants: technology schemes, impacts, and future perspectives. *WIREs Energy Environ*, 3, 384–399. DOI: 10.1002/wene.100
- Kiesel A., Wagner M., Lewandowski I. (2017) Sustainability, 9, 5, 1-20, Environmental Performance of Miscanthus, Switchgrass and Maize: Can C4 Perennials Increase the Sustainability of Biogas Production?
- Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017) Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, 127, 221-232.
- Knowpulp database - <http://www.knowpulp.com/> [10.4.2019]
- Kofman, P.D. (2016) New fuels: thermally treated biomass. <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/cofordconnects/cofordconnectsnotes/00675CCNPP40Revised091216.pdf> [17.2.2020]
- Koornneef, J., Junginger, M., Faaij, A. (2006) Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science* 33, 19–55
- Koppejan, J., van Loo, S. (2012) *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. DOI: 10.4324/9781849773041
- Kouisni, L., Gagne, A., Maki, K., Holt-Hindle, P., Pleologou, M. (2016). LignoForce System for the Recovery of Lignin from Black Liquor: Feedstocks Options, Odor Profile, and Product Characterization. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 4 (10), pp. 5152–5159, DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b00907
- Landälv, I. (2016) Efficient integration of fuel generation with the pulping process. Presentation in EBTP/ETIP Bioenergy's 7th Stakeholder Plenary Meeting. [http://www.etipbioenergy.eu/images/160621\\_Landalv.pdf](http://www.etipbioenergy.eu/images/160621_Landalv.pdf) [8.3.2019]
- Leonidou, C.N. & Skarmeas, D. (2017) Gray shades of green: Causes and consequences of green skepticism. *Journal of Business Ethics*, 144, 401-415.
- Lotti, O. (2013) Anaerobic Wastewater Treatment of Acetic Acid Rich Condensate (in Finnish). Master's thesis. Aalto University. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201310167720>
- Massachusetts Institute of Technology (2007) *The Future of Coal. Options for a carbon-constrained world*. [https://web.mit.edu/coal/The\\_Future\\_of\\_Coal.pdf](https://web.mit.edu/coal/The_Future_of_Coal.pdf) [17.2.2020]
- Macrelli S., Galbe M., Wallberg O., (2014) Effects of production and market factors on ethanol profitability for an integrated first and second generation ethanol plant using the whole sugarcane as feedstock. *Biotechnology for Biofuels* 2014, 7:26.
- Mazutis, D. & N. Slawinski (2015) Reconnecting business and society: Perceptions of authenticity in corporate social responsibility. *Journal of Business Ethics*, 131, 137-150.
- Mittelbach, M. (2015), Fuels from oils and fats: Recent developments and perspectives. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 117: 1832-1846. doi:10.1002/ejlt.201500125
- Naqvi, M., Yan, J. (2010). Black liquors gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review., *Bioresource Technology* 101, pp. 8001–8015.
- Naumann, K., J. Schröder, H. Etzold, F. Müller-Langer, E. Remmele, K. Thüneke, and K. Oehmichen (2019). Monitoring Biokraftstoffsektor. Leipzig. [https://www.dbfz.de/fileadmin//user\\_upload/Referenzen/DBFZ\\_Reports/DBFZ\\_Report\\_11\\_4.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin//user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_11_4.pdf)
- Neste Oil (2012). Neste Oil and Lufthansa satisfied with results of renewable aviation fuel trial. <https://www.neste.com/neste-oil-and-lufthansa-satisfied-results-renewable-aviation-fuel-trial>
- Nuhoff-Isakhanyan et al., (2019) Motivations, experiences, and perceptions in best practice cases of retrofitting. – confidential BioFit Report; Wageningen Economic Research; The Netherlands
- Onwezen, M.C., Reinders, M.J. & Sijtsema, S.J. (2017) Understanding intentions to purchase bio-based products: The role of subjective ambivalence. *Journal of Environmental Psychology*, 52, 26-36.
- Papnews (2016). SCA testing liquid fuels from black liquor. <https://www.papnews.com/sca-testing-liquid-fuels-from-black-liquor/> [11.4.2019]

- Perkins G., Batalha N., Kumar A., Bhaskar T., Konarova M., (2019) Recent advances in liquefaction technologies for production of liquid hydrocarbon fuels from biomass and carbonaceous wastes. - *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Elsevier; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109400>
- Pfau, S., Vos, J., Dammer, L. & Arendt, O. (2017) Public perception of bio-based products. *RoadToBio* - Deliverable no. 2.2.
- Philibert, C. (2018). *Electro fuels: Status and perspectives*. IEA Bioenergy.
- Rachbauer L, Voitl G, Bochmann G, Fuchs W. Biological biogas upgrading capacity of a hydrogenotrophic community in a trickle-bed reactor. *Applied Energy*. 2016;180:483-90.
- Reals, K. (2012). IN FOCUS: Airlines turn to alcohol as potential jet fuel replacement. [www.flightglobal.com/news/articles/in-focus-airlines-turn-to-alcohol-as-potential-jet-fuel-replacement-368555/](http://www.flightglobal.com/news/articles/in-focus-airlines-turn-to-alcohol-as-potential-jet-fuel-replacement-368555/)
- RenFuels (2019) LIGNOL® is made of lignin in a patented environmental friendly catalytic process... <https://renfuel.se/technology/?lang=en> [11.4.2019]
- Rentizelas, A.A., Tolis, A.J., Tatsiopoulos, I.P. (2009) Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 887–894.
- Ribeiro J.M.C., Godina R., Matias J.C.O., Nunes, L.J.R. (2018) *Sustainability*, 10, 2323, Future Perspectives of Biomass Torrefaction: Review of the Current State-Of-The-Art and Research Development
- Rogers, E.M. (1962) *Diffusion of innovations*. New York: The Free Press.
- Røj, A. (2018) VOLVO -Fuels for commercial vehicles - Present and future challenges and opportunities. EU-India Conference on Advanced Biofuels. New Delhi, 6th-8th March 2018. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/34\\_roj\\_anders-volvo.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/34_roj_anders-volvo.pdf)
- Rösch, C. & Kaltschmitt, M. (1999) Energy from biomass—do non-technical barriers prevent an increased use? *Biomass and Bioenergy*, 16, 347-356.
- Ryckmans, Y. (2012) Sustainable biomass for large power generation. IEA Co-firing Biomass with Coal Workshop, Copenhagen, Denmark 27 March 2012.
- Rutz D. et al., (2019) Framework conditions for retrofitting Europe's industry with bioenergy. – BioFit report, WIP Renewable Energies, Munich, Germany, [www.biofit-h2020.eu](http://www.biofit-h2020.eu)
- Samuelson, W. & Zeckhauser, R. (1988) Status quo bias in decision making. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1, 7-59.
- Savat, P. (2010) Activities at Rodenhuize power plant: Advanced and Max Green Projects. TOTeM 35 – Co-firing secondary fuels in power generation: from fuel characterization to full scale testing. Pisa, Italy, 23 - 24 September 2010
- Scandinavian Biogas (2019). The EffiSludge concept. - <http://scandinavianbiogas.com/effisludge/theproject/the-effisludge-concept/> [8.3.2019]
- Scott Bentsen N., Felby (2012) Biomass for energy in the European Union - a review of bioenergy resource assessments. - *Biotechnology for Biofuels* 2012 5:25 <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-25>
- Searcy E., Hess J.R., Tumuluru J., Ovard L., Muth D.J., Trømborg E., Wild M., Deutmeyer M., Nikolaisen L., Ranta T., Hoefnagels R.,(2014) Optimization of Biomass Transport and Logistics. In: Junginger M., ShengGoh C., Faaij A. (Ed.): *International Bioenergy Trade*. Springer Science+Business Media Dordrecht 2014.
- Sijtsema, S.J., Onwezen, M.C., Reinders, M.J., Dagevos H., Partanen A. & Meeusen, M. (2016) Consumer perception of bio-based products - An exploratory study in 5 European countries. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 77, 61-69.
- Sijtsema S.J., Snoek H.M., van Haaster-de Winter M., Dagevos H., (2020) Let's talk about circular economy: A qualitative exploration of consumer perceptions. *Sustainability*, 12, 286, doi:10.3390/su12010286, <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/286/pdf>

- Sørensen H.D. (2011) Avedøre unit 2—the world’s largest biomass fuelled CHP plant. In: IEA Clean Coal Centre Workshop on Cofiring Biomass with Coal, Drax Power Station, UK, 25–26 January, 2011
- Suhonen, T., Amberla, T. (2014) Pöyry Insight - World Paper Markets up to 2030. [https://www.poyry.com/sites/default/files/worldpapermarkets\\_up\\_to\\_2030\\_brochure\\_and\\_orderform\\_2014\\_web.pdf](https://www.poyry.com/sites/default/files/worldpapermarkets_up_to_2030_brochure_and_orderform_2014_web.pdf)
- Suncarbon (2019) Technology - <https://www.suncarbon.se/technology/>
- Sunpine (2019) <https://www.sunpine.se/en/> [11.4.2019]
- Thrän, Daniela & Dotzauer, Martin & Lenz, Volker & Liebetrau, Jan & Ortwein, Andreas. (2015). Flexible bioenergy supply for balancing fluctuating renewables in the heat and power sector—a review of technologies and concepts. *Energy, Sustainability and Society*. 5. 10.1186/s13705-015-0062-8.
- UPM, <https://www.upmbiofuels.com/fi/> [8.3.2019]
- Vainio, A., Ovaska, U. & Varho, V. (2019) Not so sustainable?: Images of bioeconomy by future environmental professionals and citizens. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1396-1405.
- Valmet Fuel conversion for power boilers: Vaskiluodon Voima Oy, Vaasa, Finland. <https://www.valmet.com/media/articles/all-articles/fuel-conversion-for-power-boilers-vaskiluodon-voima-oy-vaasa-finland/> [29.10.2019]
- Valmet (2018a) LignoBoost - Lignin from Kraft Black Liquor. Brochure. [https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=06958000000bPJ6AAM&\\_ga=2.8431989.1725935242.1554277657-1742322430.1546954743](https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=06958000000bPJ6AAM&_ga=2.8431989.1725935242.1554277657-1742322430.1546954743)
- Valmet (2018b). Methanol, from Waste Byproduct to Valuable Fuel. White paper. [https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/methanol\\_waste\\_to\\_fuel\\_whitepaper.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/methanol_waste_to_fuel_whitepaper.pdf)
- van Bennekom, J. G., Venderbosch, R. H., & Heeres, H. J. (2012). Biodiesel: Feedstock, Production and Applications - Chapter 12: Biomethanol from Glycerol. IntechOpen.
- Velez, J, Thies, M.C. (2015) Liquid Lignin from the SLRPTM Process: The Effect of Processing Conditions and Black-Liquor Properties, *Journal of Wood Chemistry and Technology*, vol 36, pp. 27-41. <https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1039545>
- Verain, M.C.D., Bartels, J., Dagevos, H., Sijtsema, S.J., Onwezen, M.C. & Antonides, G. (2012) Segments of sustainable food consumers: A literature review. *International Journal of Consumer Studies*, 36, 123-132.
- Watanabe M.D.B., Chagas M.F., et al. (2015) Hybrid Input-Output Life Cycle Assessment of First- and Second-Generation Ethanol Production Technologies in Brazil. *Journal of Industrial Ecology* 2015, 20:4
- Zech, Konstantin, Karin Naumann, Franziska Müller-Langer, P. Schmidt, Werner Weindorf, Z. Mátra, W. Grimme, and M. Hepting (2014). Drop-In-Kraftstoffe für die Luftfahrt. Leipzig et al.





