

CE

**Oplossingen voor
milieu, economie
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

Duurzame transitie met HTU

Een verkenning van de score
van het HTU-proces op
duurzaamheidsaspecten

Rapport

Delft, april 2005

Opgesteld door: H.J. (Harry) Croezen
B.E. (Bettina) Kampman



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

H.J. (Harry) Croezen, B.E. (Bettina) Kampman
Duurzame transitie met HTU
Een verkenning van de score van het HTU-proces op duurzaamheidsaspecten
Delft, CE, 2005

Duurzame energie / Biomassa / Duurzaam produceren / Procestechologie /
Duurzaamheid / Analyse /

Publicatienummer: 05.4715.04

Alle CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Opdrachtgever: Biofuel B.V.
Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Bettina Kampman.

© copyright, CE, Delft

CE

Oplossingen voor milieu, economie en technologie

CE is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.

CE-Transform

Visies voor duurzame verandering

CE-Transform, een business unit van CE, adviseert en begeleidt bedrijven en overheden bij veranderingen gericht op duurzame ontwikkeling.

De meest actuele informatie van CE is te vinden op de website: www.ce.nl

Dit rapport is gedrukt op 100% kringlooppapier.

Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	5
2 Het HTU-proces: algemeen en in deze verkenning	7
2.1 Het proces en eventuele vervolgstappen	7
2.2 De plek van het HTU proces in een duurzame samenleving	8
2.3 Afbakening voor deze verkenning	8
3 Experiment	11
3.1 Algemeen	11
3.2 CO ₂ -berekening	11
4 Voertuig brandstoffen en petrochemische grondstoffen - anno 2020/2040	15
4.1 Systemen	15
4.2 Directe milieubelasting, een ruwe eerste schatting	17
4.3 Ecologische en sociaal maatschappelijke aspecten, een voorzichtige eerste inschatting	22
5 Maximale elektriciteit productie	23
5.1 Systeem	23
5.2 Biocrude voor elektriciteitopwekking	23
Literatuur	25
A Detailanalyse HTU-keten	29
B Door Biofuel verstrekte gegevens	37

Samenvatting

Doel en opzet van de studie

CE heeft in opdracht van Biofuel B.V. in het kader van de zogenaamde Unieke Kansen Regeling (UKR) een duurzaamheidsanalyse uitgevoerd van het HTU-proces, dat door Biofuel wordt ontwikkeld.

Bij het HTU proces wordt biomassa middels een reactie met water bij hoge temperatuur en druk omgezet in 'biocrude'. Zuurstof uit de biomassa wordt grotendeels verwijderd als CO₂ en H₂O. Er blijft een olieachtig product (de 'biocrude') over dat door de verwijdering van zuurstof uit de biomassa qua samenstelling overeenkomsten vertoont met ruwe aardolie. De biocrude kan worden gebruikt als brandstof voor bijvoorbeeld elektriciteitsproductie of kan worden opgewerkt tot transportbrandstoffen en chemicaliën.

De duurzaamheids verkenning is uitgevoerd conform de in het kader van het biomassa transitie programma opgestelde concept methodiek zoals beschreven in de concept notitie 'Duurzaamheidscriteria voor experimentvoorstellen voor de Unieke Kansen Regeling (UKR)'. Deze methodiek is een verdere uitwerking van wat er over duurzaamheidsanalyse staat in 'Biomassa: de groene motor in transitie. Stand van zaken na de tweede etappe'. Deze methodiek zal worden gebruikt om de verschillende transitiepaden te ranken wat betreft duurzaamheid. De mate van duurzaamheid zal mede bepalend zijn voor de hoogte van de economische ondersteuning die de verschillende paden zullen ontvangen voor verdere ontwikkeling.

Opzet van de studie

De uitgevoerde duurzaamheids verkenning betreft een inschatting van de netto score van het proces op een aantal duurzaamheidsaspecten. Met netto bedoelen we dat we analyseren tot wat voor veranderingen op deze aspecten implementatie van het HTU-proces zal leiden ten opzichte van de referentiesituatie, zonder het proces. Nemen bijvoorbeeld emissies naar water en lucht toe of af? Of verbetert de voorzieningszekerheid van bijvoorbeeld elektriciteit door implementatie van het HTU-proces? Beschouwd worden:

- het netto effect op de omvang van de emissie van broeikasgassen;
- het netto effect op de omvang van de emissies van verontreinigende stoffen naar water en lucht;
- het netto effect op de vrijkomende hoeveelheid te storten afval;
- het netto effect op aspecten als voorzieningszekerheid van het energiesysteem, afhankelijkheid van het buitenland.

Conform de methodiek brengen we de duurzaamheidsaspecten in beeld voor drie tijdstippen:

- de huidige stand van zaken;
- de stand van zaken anno 2020;
- de stand van zaken anno 2040.

Hierdoor wordt de technologische ontwikkeling van het proces in kaart gebracht.

De duurzaamheidsanalyse is uitgevoerd voor natte organische reststromen. Het HTU proces is in tegenstelling tot andere transitietechnologieën in staat dergelijke reststromen te verwerken tot een waardevolle energiedrager. Dergelijke reststromen worden in de huidige praktijk vaak gedumpt of worden met lage energetische efficiency verbrand.

De huidige stand van zaken is in kaart gebracht voor de in 2007 – 2008 in bedrijf te nemen demonstratie installatie. Voor de situatie in 2020 en 2040 is uitgegaan van de door Biofuel gegeven prognoses van de verwerkingscapaciteit van de mondiaal gerealiseerde HTU-installaties in die jaren. Biofuel schat dat de HTU technologie in 2020 en 2040 resp. 4 en 27 Mton per jaar (droog en asvrij) biomassa zal verwerken.

Er is voor het bepalen van het netto effect op broeikasgas emissies in 2020 en 2040 uitgegaan van twee referenties:

- de biomassa wordt in de referentie situatie gedumpt en vergaat;
- de biomassa wordt in de referentiesituatie verbrand met een lage efficiency ($\eta_e = 20\%$).

Verder is aangenomen dat de uit de biomassa geproduceerde biocrude wordt opgewerkt tot transportbrandstoffen. Daarmee worden transportbrandstoffen geproduceerd op basis van fossiele aardolie vervangen.

Resultaten

De geschatte jaarlijkse netto CO₂-reductie door implementatie van de HTU-technologie als verwerkingsproces voor natte biomassa is in onderstaande tabel voor de verschillende zichtjaren gegeven.

Tabel 1 Door toepassing van de HTU-keten vermeden CO₂-uitstoot

Jaar	2008	2020	2040
HTU-capaciteit, Mton droge en asvrije biomassa per jaar	0,025	4	27
CO ₂ -emissie besparing, Mton CO ₂ per jaar			
– Biomassa vergaat in referentiesituatie		4,5	30
– Biomassa wordt in referentiesituatie verbrand	0,023	2,6	15

Implementatie leidt voor zover we op basis van de beschikbare informatie kunnen inschatten niet tot een toename van overige emissies naar lucht en water. Ook ontstaan er nauwelijks te storten reststoffen.



Het proces maakt optimalisatie van afvalverwerking en reststoffen verwijdering in Nederland mogelijk. Bij verwerking van reststromen zullen de ecologische aspecten beperkt zijn. Er vindt geen ruimtebeslag plaats, waardoor ook geen sprake is van invloed op biodiversiteit of van concurrentie met voedselgewassen.

Wat betreft de sociaal economische invloeden biedt het HTU-proces in principe het voordeel dat het proces landen zonder eigen olievoorraden in staat stelt om voertuig brandstoffen uit reststromen – en dus tegen relatief lage kosten – te maken. Dit terwijl in de huidige situatie met name veel derde wereld landen een groot deel van hun inkomsten uit export (in de vorm van buitenlandse valuta) moeten spenderen aan dure inkoop van olieproducten voor verkeer en voor decentrale elektriciteitsproductie. Productie van biocrude opent de mogelijkheden om onder deze economische last uit te komen.

De beoogde schaalgrootte van de installaties maakt decentrale verwerking tot biocrude mogelijk, waardoor het mogelijk wordt gemaakt om ook lokaal te profiteren van de voordelen die biocrude en daarvan afgeleide producten kan bieden.

Het proces biedt tevens een oplossing voor enkele bekende milieuproblemen als de waterhyacinten in het Victoriameer en de stort van olijfafval in de landen rond de Middellandse zee.



1 Inleiding

In deze notitie zetten we een globale duurzaamheids verkenning van het HTU-proces neer.

De duurzaamheids verkenning is uitgevoerd conform de in het kader van het biomassa transitie programma opgestelde concept methodiek zoals beschreven in de concept notitie 'Duurzaamheidscriteria voor experimentvoorstellen voor de Unieke Kansen Regeling (UKR)'. Deze methodiek is een verdere uitwerking van wat er over duurzaamheidsanalyse staat in 'Biomassa: de groene motor in transitie. Stand van zaken na de tweede etappe'. Deze methodiek zal worden gebruikt om de verschillende transitiepaden te ranken wat betreft duurzaamheid. De mate van duurzaamheid zal mede bepalend zijn voor de hoogte van de economische ondersteuning die de verschillende paden zullen ontvangen voor verdere ontwikkeling.

De uitgevoerde duurzaamheids verkenning betreft een inschatting van de netto score van het proces op een aantal duurzaamheidsaspecten. Met netto bedoelen we dat we analyseren tot wat voor veranderingen op deze aspecten implementatie van het HTU-proces zal leiden ten opzichte van de referentiesituatie, zonder het proces. Nemen bijvoorbeeld emissies naar water en lucht toe of af? Of verbetert de voorzieningszekerheid van bijvoorbeeld elektriciteit door implementatie van het HTU-proces? Beschouwd worden:

- het netto effect op de omvang van de emissie van broeikasgassen;
- het netto effect op de omvang van de emissies van verontreinigende stoffen naar water en lucht;
- het netto effect op de vrijkomende hoeveelheid te storten afval;
- het netto effect op aspecten als voorzieningszekerheid van het energiesysteem, afhankelijkheid van het buitenland.

Conform de methodiek brengen we de duurzaamheidsaspecten in beeld voor drie tijdstippen:

- de huidige stand van zaken;
- de stand van zaken anno 2020;
- de stand van zaken anno 2040.

Hierdoor wordt de technologische ontwikkeling van het proces in kaart gebracht. Door in de duurzaamheidsaspecten de opgestelde verwerkingscapaciteit te verdisconteren en het absolute netto effect op de emissie van broeikasgassen te bepalen wordt ook de ontwikkeling van de rol die de technologie in het economische systeem kan spelen in beeld gebracht.

We schetsen in deze notitie in hoofdstuk 2 eerst het HTU-proces en de plek die deze technologie zou kunnen innemen in een duurzame samenleving. Uit de verschillende opties selecteren we een beperkt aantal toepassingen, waarvan we de duurzaamheidsaspecten in hoofdstuk 4 en 5 in kaart brengen.

In hoofdstuk 3 gaan we kort in op de huidige stand van zaken.

In de twee daaropvolgende hoofdstukken geven we voor de twee geselecteerde toepassingen van biocrude een schatting van de score op de 'harde' duurzaamheidsaspecten:

- emissies van verontreinigende stoffen naar lucht en water;
- emissies van broeikasgassen;
- vrijkomen van afvalstoffen.

In hoofdstuk 6 tenslotte worden de minder goed kwantificeerbare aspecten als invloed op voorzieningszekerheid behandeld.

Gezien de beknopte tijd die beschikbaar is voor deze studie beperken we ons tot een globale verkenning van de verschillende duurzaamheidsaspecten. Waar mogelijk geven we kwantitatieve resultaten, maar er is weinig ruimte voor nieuw onderzoek.

2 Het HTU-proces: algemeen en in deze verkenning

2.1 Het proces en eventuele vervolgstappen

Bij het HTU-proces wordt biomassa middels een reactie met water bij hoge temperatuur en druk omgezet in 'biocrude'. Zuurstof uit de biomassa wordt grotendeels verwijderd als CO_2 en H_2O . Er blijft een olieachtig product (de 'biocrude') over dat door de verwijdering van zuurstof uit de biomassa qua samenstelling overeenkomsten vertoont met ruwe aardolie.

Net als ruwe aardolie is de biocrude – of deelfracties daarvan - geschikt als brandstof voor hoog efficiënte elektriciteit productie of warmte kracht koppeling of als grondstof voor voertuig brandstoffen en petrochemie. Het proces opent daarmee de weg voor biomassa als grondstof voor bio-transportbrandstoffen en grondstoffen voor de organische bulkchemie. Het proces is – in tegenstelling tot veel andere conversieprocessen - zeer geschikt voor de verwerking van biomassa met een hoog vochtgehalte, zoals GFT, pulp uit olijfolie industrie en suiker industrie. Het creëert ook de mogelijkheid tot inzet met een hoge efficiency van relatief natte biomassa stromen als energiedrager, ook bij een relatief geringe schaalgrootte.

Er wordt realisatie van HTU-installaties met schaalgroottes van $100 \text{ MW}_{\text{input}}$ tot $200 \text{ MW}_{\text{input}}$ voorzien. Bij deze schaalgroottes wordt aangesloten bij de economisch meest optimale structuur voor biomassa teelt. Het maakt aanvoer van biomassa over een beperkte afstand mogelijk, terwijl er een product wordt geproduceerd dat zich prima tegen lage kosten over lange afstanden laat vervoeren.

Het energetisch rendement van de installaties bedraagt 70% - 85%. Hierin is het eigen verbruik aan bijvoorbeeld elektriciteit verdisconteerd.

Een andere mogelijke toepassing is de combinatie van het HTU-proces met een industrieel proces dat een organische reststroom oplevert en tegelijkertijd behoefte heeft aan warmte en elektriciteit. Bijvoorbeeld de combinatie van een HTU-installatie met een ethanol fabriek. De HTU-installatie kan de restproducten van fermentatie verwerken tot een brandstof, terwijl tevens met hoge efficiency de elektriciteit kan worden opgewekt die nodig is voor fermentatie en destillatie van ethanol.

Het HTU-proces zal volgens plan binnenkort verder worden ontwikkeld tot het demonstratie niveau (ca. $15 \text{ MW}_{\text{th}}$ input), waarna in de daarop volgende 5 jaar een eerste commerciële installatie zal worden gerealiseerd. Als dit allemaal lukt, dan zal de techniek tegen 2020 ruimschoots bewezen zijn.

2.2 De plek van het HTU-proces in een duurzame samenleving

De plek van het HTU-proces in een duurzame samenleving wordt bepaald door de specifieke eigenschappen van het proces.

In een duurzame samenleving zal afval steeds zoveel mogelijk worden hergebruikt en uiteindelijk als energiedrager worden ingezet. In geval van biomassa wenselijkerwijs zodanig dat de ooit door de biomassa opgenomen mineralen vrijkomen in een vorm waarin ze weer als meststof terug in de kringloop kunnen worden gebracht.

De duurzame samenleving zal ook gebruik maken van biomassa als een grondstoffenbron voor fijnchemicaliën en bulkchemicaliën. De impact op ruimtegebruik en biodiversiteit zal men zo beperkt mogelijk willen houden. Dat lijkt te pleiten voor aquatische en biosaline teelt.

Het HTU-proces kan vanwege de mogelijkheden die het biedt om natte biomassa tegen lage kosten te verwerken tot een soort aardolie met name voor de natte organische afvalstromen en voor aquatisch geteelde biomassa bij uitstek de schakel zijn tussen de biomassa en grondstof toepassingen of toepassing als energiedrager.

2.3 Afbakening voor deze verkenning

In deze notitie bekijken we alleen de grootschalige inzet van biocrude voor elektriciteitsopwekking, productie van brandstoffen en grondstoffen voor de petrochemie.

We voeren een analyse hoofdzakelijk uit voor een systeem anno 2020/2040:

- gericht op maximale productie van voertuig brandstoffen en petrochemische grondstoffen;
- gericht op maximale elektriciteitsproductie.

We gaan verder uit van biocrude productie op basis van natte of droge biomassa, waarvoor op dit moment geen andere toepassing is. Daarnaast bekijken we inzet van biomassa uit aquatische teelt.

De aanstaande ontwikkelingsfase met de bouw van de demonstratie installatie en de eerste installaties op commerciële schaal worden slechts globaal beschouwd.

We hebben de volgende redenen voor deze focus:

- De huidige plannen voor een demonstratie installatie in Amsterdam zijn te specifiek c.q. betreffen een te specifieke situatie. Bovendien geeft een analyse van een demonstratie installatie geen representatief beeld van de potentie van de technologie en de bijdrage die de technologie aan verduurzaming kan leveren.
- Een combinatie van een HTU-installatie met een organische reststromen producerend en warmte en elektriciteit consumerend industrieel proces geven



evenmin een representatief beeld van de potentie van de technologie. De mogelijke configuraties zijn te divers. Er vindt bovendien bij mogelijke toepassingssituaties soms al inzet van reststromen plaats - zoals bagasse bij alcoholproductie uit suikerriet. In die gevallen is de vermeden milieubelasting (met name wat betreft broeikasgasemissies) niet maximaal¹.

- De keuze voor een verkenning voor biomassa uit aquatische teelt of voor verwerking van natte reststromen houdt verband met de sterke kanten van het HTU-proces: optimaal geschikt voor de verwerking van natte biomassa.
- Een duurzaamheidsverkenning voor geteelde droge biomassa is een vergelijking tussen verschillende transitiepaden en levert geen meerwaarde wat betreft de vraag in hoeverre het HTU-proces kan bijdragen aan verduurzaming van de samenleving.
- De beide beschouwde systemen dekken de twee meest reële mogelijkheden voor de toepassing van biocrude. Door beide toepassingen te beschouwen wordt een zo compleet mogelijk beeld gegeven van de rol die op het HTU-proces gebaseerde systemen in een duurzame samenleving kunnen spelen en de eventuele voor- of nadelen van die systemen ten opzichte van de conventionele systemen.

Voor beide systemen geldt dat de HTU-installaties de rol van decentrale conversie processen spelen, waarmee anders niet te verwerken organische reststromen c.q. aquatisch geteelde natte biomassa worden omgezet in een intermediair product dat geschikt is voor verdere verwerking of toepassing als brandstof.

We hebben bij het schatten van de aan deze keten gerelateerde emissies aangenomen dat in het HTU-proces relatief schone biomassa reststromen uit de voedingmiddelen industrie worden ingezet, zoals perskoek van olijfolie productie, palmvezels of suikerbieten pulp.

Het is in principe ook mogelijk om sterk verontreinigde natte organische reststromen te verwerken. Of dit lonend is hangt vooral af van het gehalte aan organisch materiaal. Wanneer dit relatief hoog is, b.v. GFT of ONF uit huishoudelijk afval, dan is het HTU-proces zeker een goede oplossing. Deze stromen maken dan ook deel uit van het HTU-demonstratieprogramma.

Bij lager gehalte aan organisch materiaal wordt het energierendement van het HTU-proces lager en moet overwogen worden of er andere meer kosteneffectieve verwerkingsroutes zijn. We hebben er echter voor gekozen om in deze verkenning dergelijke reststromen buiten beschouwing te laten.

¹ Een combinatie van een HTU-installatie met een organische reststromen producerend en warmte en elektriciteit consumerend industrieel proces (zoals voorbeeld bagasse) kan voor productie van HTU-transportbrandstoffen zowel economisch als wat betreft duurzaamheid wel degelijk zeer aantrekkelijk zijn, vooral omdat de infrastructuur voor de aanvoer van de biomassa er al is en de afvalinzameling ook. Het is ook voor de lokale economie aantrekkelijk omdat het alternatief voor de productie van bio-transportbrandstoffen vaak de import van fossiele diesel over grote afstand is. Deze combinaties wordt door de technologie kennishouders ook als een belangrijke strategie in hun middellange termijn ontwikkelingsplannen gezien.



3 Experiment

3.1 Algemeen

In Amsterdam zal een proefinstallatie worden gebouwd met een verwerkingscapaciteit van 25 ton biomassa (DAS) per jaar. Het doel van die installatie is vooral om de techniek te demonstreren en verder te ontwikkelen. De installatie wordt gebouwd naast de nieuwe hoog rendement AVI voor hoog calorisch afval van GDA en is daar ook gedeeltelijk mee geïntegreerd:

- de installatie neemt stoom in van de AVI;
- afvalwater van het HTU-proces wordt naar de waterzuivering van de AVI afgevoerd.

De HTU-installatie zal als waardevolle producten lichte en zware biocrude en biogas produceren (zie ook Bijlage A).

De door de HTU-installatie geproduceerde lichte biocrude wordt in een dieselmotor ingezet, waarmee 29,5 GWh_e/jaar aan elektriciteit wordt geproduceerd. De zware biocrude wordt bij een kolencentrale afgezet en wordt gebruikt om steenkool te vervangen. Op basis van de zware biocrude kan 11,2 GWh_e/jaar worden geproduceerd. Op basis van het biogas kan met een gasmotor jaarlijks 6,3 GWh_e worden geproduceerd.

In onderstaande paragraaf is de CO₂-berekening van dit experiment gegeven. Voor overige emissies hebben we geen schattingen gedaan. Er is onvoldoende informatie beschikbaar om een dergelijke schatting te kunnen maken.

3.2 CO₂-berekening

Uitgespaard door elektriciteitsproductie

Uit door Biofuel aangeleverde informatie (zie Bijlage B) valt af te leiden dat het experiment netto circa 36 GWh_e/jaar zal genereren (zie tabel 2).

De geproduceerde elektriciteit valt uiteen in twee gedeeltes:

- een hoeveelheid van 24,6 vervangt van elektriciteit geproduceerd in gemiddeld park. De specifieke CO₂-emissie voor deze elektriciteit bedraagt anno 2005 volgens de methodiek ontwikkeld voor biomassa transitie 560 ton/GWh_e;
- daarnaast 11,2 GWh_e per jaar die in een kolencentrale geproduceerde elektriciteit vervangt. Volgens Externe geeft elektriciteitsproductie op basis van steenkool een emissie van 1.050 kg CO₂/MWh_e.

Tabel 2 Netto elektriciteitproductie in HTU-demonstratieexperiment

	GWh _e /jaar
Elektriciteitproductie uit biocrude en biogas, ex-kolencentrale	35,8
Eigen verbruik HTU-installatie	-1,6
Niet geproduceerd bij AVI	-9,6
	24,6

Inzet van de zware biocrude in de Kolencentrale geeft volgens de door Biofuel verstrekte informatie 11,2 GWh_e/jaar. Volgens Externe geeft elektriciteitproductie op basis van steenkool een emissie van 1.050 kg CO₂/MWh_e. Met de op basis van biocrude opgewekte elektriciteit wordt dus $1,05 \times 11,2 = 11,8$ kton/jaar aan CO₂-emissie uitgespaard.

Uitgespaarde ketens en hun effecten

De in de installatie verwerkte biomassa zal volgens Biofuel bestaan uit een mengsel van laagwaardige reststromen die nu als energietoeslagstof in veevoer worden verwerkt en afvalstoffen:

- bermgras 5 kton/jaar (db) Alternatief is: composteren;
- uienpulp 5 kton/jaar (db) Alternatief is: veevoer;
- aardappelafval 5 kton/jaar (db) Alternatief is: veevoer;
- slachtafval 10 kton/jaar (db) Alternatief is: vergisten, verbranden.

Conform de in het kader van biomassa transitie ontwikkelde methodiek is aangenomen dat het onttrekken van de beide reststromen die anders in de veevoer industrie zouden worden toegepast noopt tot het telen van extra graan. Vanwege het globale karakter van deze verkenning hebben we niet geanalyseerd welke CO₂-emissies gerelateerd zijn aan de verwerking van beide stromen in mengvoeders en welke CO₂-emissies optreden bij verwerking van graan. We hebben aangenomen dat extra graanteelt zal plaatsvinden in de vorm van tarwe. Conform [Sheffield, 2003] geeft productie van tarwe een emissie van 280 kg/ton. Wanneer wordt aangenomen dat tarwe in de vorm van korrels de uienpulp en aardappelafval vervangt in een gewichtsverhouding van 1 : 1, dan is er 10 kton tarwe nodig waarvan de teelt een broeikasgasemissie geeft van $10 \times 0,28 = 2,8$ kton/jaar.

Op basis van [AOO, 2002] is ingeschat dat het composteren van bermgras een broeikasgasemissie van netto 108 kg CO₂-eq/ton input geeft. Hierin is verdisconteerd dat de compost in theorie een mengsel van veen, dierlijke mest en kunstmestsoorten vervangt. Het niet composteren van bermgras leidt dus tot een uitsparing van 0,54 kton CO₂-eq aan broeikasgassen.

Voor vergisting van slachtafval is uitgegaan van een elektriciteitsopbrengst van 1,2 GWh_e/kton d.s., conform [DHV, 2001]. Het niet vergisten van het slachtafval geeft een extra CO₂-emissie van $1,2 \times 10 \times 0,56 = 0,67$ kton CO₂.

Het onttrekken van de voeding van de verschillende biomassa stromen aan de gangbare toepassing voor verwerking in de HTU-installatie geeft een netto CO₂-effect van $2,8 - 0,54 + 0,67 = 2,97$ kton CO₂-eq.

Netto CO₂-balans voor proefinstallatie

Het experiment zal een jaarlijkse uitsparing aan broeikasgassen geven van $13,8 + 11,8 - 3,0 = 22,6$ kton. In Tabel 3 is een overzicht gegeven.

Tabel 3 CO₂-balans voor HTU-demonstratieexperiment

	Productie elektriciteit (GWh _e /jaar)	Emissiefactor ton CO ₂ /GWh _e	Bespaard kton CO ₂ /jaar
Vervanging elektriciteit gemiddeld park			
uit LCR	29,7		
uit biogas	6,5		
eigen verbruik	-1,8		
niet opgewekt uit AVI stoom	-9,8		
totaal	24,6	560	13,8
Uit HCR, vervanging steenkool	11,2	1050	11,8
Onttrekken voeding			-3,0
Totaal demo plant	35,8		22,6



4 Voertuig brandstoffen en petrochemische grondstoffen - anno 2020/2040

4.1 Systemen

HTU-keten

Bij het systeem van maximale productie van voertuig brandstoffen en grondstoffen voor de petrochemie zijn we uitgegaan van de volgende opzet:

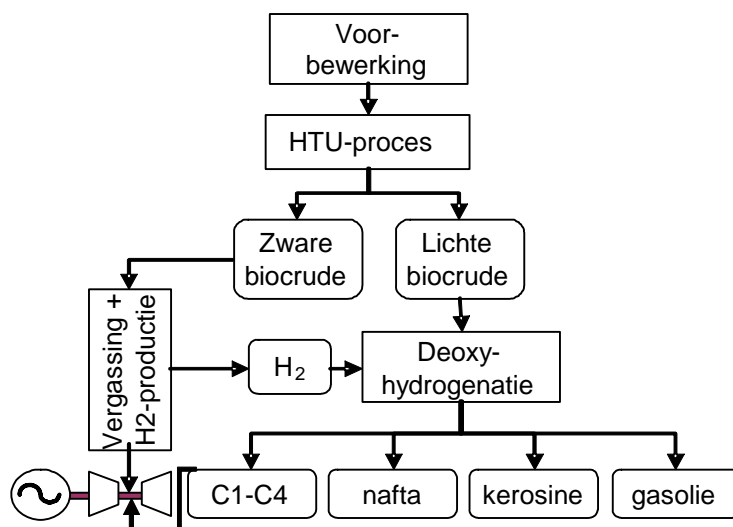
- de door de decentrale HTU-installaties geproduceerde biocrude worden op locatie middels extractie gescheiden. De zware biocrude is bij omgevings-temperatuur een vaste stof steekvast en wordt in containers getransporteerd. De lichte biocrude wordt als vloeistof in verwarmde tanks (bij 80°C) getransporteerd en opgeslagen;
- bij de centrale productielocatie wordt de zware biocrude vergast. Het synthesegas wordt gebruikt voor:
 - a De productie van waterstof.
 - b De productie van elektriciteit.

De waterstof wordt gebruikt voor de hydro deoxygenatie van de lichte crude. Daarbij wordt de lichte crude in een mengsel van producten omgezet:

- diesel, geschikt als voertuig brandstof;
- kerosine, waarschijnlijk zeer geschikt als vliegtuig brandstof voor de huidige generatie vliegtuig turbines en brandstoftanks en anders uitstekend geschikt als grondstof voor de petrochemische industrie;
- nafta, grondstof voor de petrochemische industrie;
- lichte gassen – de C1 – C4 gassen - die worden gebruikt bij elektriciteitsproductie of H₂-productie.

Eventueel kan het synthesegas en de C1 – C4 gassen worden gebruikt voor het produceren van een overschot aan elektriciteit – meer dan nodig is voor de eigen installatie – waarna het overschot aan het openbare net wordt geleverd.

Figuur 1 Productieroute voor voertuig brandstoffen en chemicaliën uit natte biomassa middels het HTU-proces



Vervangen ketens

In deze studie gaan we er van uit dat diesel, kerosine en nafta anno 2020 en 2040 nog steeds worden geproduceerd op basis van aardolie. Op zich is dit al een aanname omdat de olievoorraden slinken en de gebruikte olie steeds zwaarder en duurder wordt. Er is een gerede kans dat anno 2040 een deel van de drie genoemde producten op basis van andere feedstocks als aardgas uit afgelegen velde, teerzanden of steenkool wordt geproduceerd. Vanwege het globale karakter van de studie is echter uitgegaan van de in de huidige situatie gangbare productieroute.

De productieroute van diesel, kerosine en nafta op basis van aardolie zal zich overigens ook verder ontwikkelen. In de eerste plaats zullen als gezegd steeds zwaardere crudes worden gebruikt. Dit geeft een hogere CO₂-emissie en ene hoger verbruik aan energie per eenheid product. In de tweede plaats zal vanwege de steeds strenger wordende eisen aan voertuigbrandstoffen meer waterstof worden geconsumeerd, wat weer leidt tot een toename van het energieverbruik per eenheid product. In de derde plaats zullen vanwege de steeds verder aangescherpte emissie-eisen voor industriële processen de emissies bij aardolie winning en raffinage steeds verder afnemen.

Voor de in het HTU-keten ingezette biomassa zijn er twee referenties c.q. vervangen ketens:

- bij inzet van organische reststoffen, die anders op het land of elders mogen vergaan is de referentie simpelweg het vergaan van het organische materiaal;
- bij aquatische teelt is de referentie het oorspronkelijke ecosysteem waarin de teelt is geïntroduceerd.

4.2 Directe milieubelasting, een ruwe eerste schatting

Met de productie van biocrude – een als gezegd enigszins op ruwe aardolie lijkende vloeistof – landt het systeem van HTU-proces en nageschakelde processen in de in deze studie beschouwde systeem voor maximale productie van voertuig brandstoffen en petrochemische grondstoffen aan in de wereld van de petrochemie. Omdat de biocrude lijkt op aardolie zijn de emissiebronnen bij de verdere verwerking van de biocrude daarom dezelfde als de emissiebronnen in de nu gangbare en straks te vervangen keten van ruwe aardolie, die wordt verwerkt tot diesel, nafta en kerosine en dergelijke.

Vanwege die oppervlakkige gelijkheid tussen biocrude enerzijds en aardolie anderzijds zullen we een kwalitatieve vergelijking tussen biocrude en ruwe olie doen om een schatting te kunnen geven van de netto milieu-impact. Daarnaast geven we aan welke milieu-impact de productie van de biocrude heeft en hoe die zich verhoudt tot de aan ruwe olie winning gerelateerde milieu-impact.

Daartoe zijn in onderstaande tabel enige karakteristieken gegeven van aardolie en van biomassa reststromen uit de voedingsmiddelenindustrie als perskoek van olijfolie productie, palmvezels of suikerbieten pulp.

Tabel 4 Specificaties van aardolie en diverse soorten biomassa (alle getallen in g/GJ voor droge stof)

	aardolie		palm vezels	perscake van olijfolie- productie	suikerbieten pulp	schoon resthout
C	19.529-	20.471	26.236	26.551	27.185	
H	2.353-	3.294	3.301	3.104	3.800	
O	12-	353	20.155	19.401	27.477	
N	24-	471	773	715	994	
S	12-	1.412	165	155		
mineralen		471	4.604	2.384	4.823	
zware metalen:						
V	0,02-	35,29				0,23
Ni	0,02-	2,82			0,03-	15,36
Cu	0,00-	0,28			0,64-	1,46
Co	0,00-	0,28			0,01-	0,13
Zn	0,01-	0,02			1,40-	6,94
Cr					0,06-	3,93
Mn					5,09-	11,70
Pb					0,45-	3,24

Voor perskoek van olijfolie productie, palmvezels of suikerbieten pulp zijn geen concentraties van zware metalen gevonden. Ter indicatie is daarom de concentraties voor schoon resthout gegeven.

Voor de HTU-keten worden de in onderstaande tabel gegeven emissievrachten geschat (vergelijk Figuur 1). Ter vergelijking is ook aangegeven hoe de beide vervangen ketens op deze emissies zouden scoren.

Tabel 5 Indicatieve schatting van emissies in HTU-keten en referentieketen

	Emissies per schakel kg/ton biomassa (DAS)			Totaal		Aardolieketen
	HTU	HDO- vergasser	HDO spui	Kg/ton bio- massa (DAS)	Kg/GJ product	Kg/ton bio- massa (DAS)
CO ₂ + ov. broeikasgas- sen						1.030 - 1.110
NO _x	0,004	0,25		0,25	0,02	lager
SO ₂		0,06		0,06	0,01	hoger
PM ₁₀ + zware metalen		0,02		0,02	0,002	gelijk of lager
VOC				0,025	0,002	hoger
water						
COD	0,31	0,01	0,003	0,33	0,03	?
N-totaal	0,13	0,01	0,001	0,14	0,01	?
zware metalen		1,82E-05		1,82E-05	1,5E-06	?

De argumentatie voor de inschatting is hieronder in aparte subparagrafen per emissie gegeven.

Broeikasgassen

De door de HTU-keten uitgespaarde emissies van broeikaseffecten zijn geschat voor twee referentiesituaties:

- referentie 1: de HTU-keten verwerkt biomassa die anders mag vergaan zonder benutting als brandstof of meststof;
- referentie 2: de in de HTU-keten verwerkte biomassa wordt in de referentiesituatie gedroogd en verbrand in een ultra superkritische boiler. Het netto rendement van dit systeem bedraagt 20%.

De schatting van netto CO₂-emissie per ton biomassa wordt voor 2020 en 2040 in onderstaande twee tabellen gegeven.

Tabel 6 Netto CO₂-reductie per ton biomassa in 2020

	Netto elektriciteitsproductie			Brandstoffen			Totale CO ₂ -emissie kg/ton biomassa
	(MWh _e /ton biomassa)	Emissie-factor CO ₂ (kg/MWh _e)	CO ₂ -emissie (kg/ton biomassa)	GJ/ton biomassa	Emissie-factor CO ₂ (kg/GJ)	CO ₂ -emissie (kg/ton biomassa)	
Systeem waarin biomassa niet nuttig wordt toegepast:							
a Referentie 1, biomassa vergaat							
b HTU-keten	0,14		63	12,1		1.024	1.087
a – b: uitgespaarde emissie			-63			-1.024	-1.087
Systeem waarin biomassa wordt verbrand:							
a Referentie 2, biomassa verstoekt	1	450	450				450
b HTU-keten	0,14	450	63	12,1	85	1.024	1.087
a – b: uitgespaarde emissie			387		85	-1.024	-637

Tabel 7 Netto CO₂-reductie per ton biomassa in 2040

	Netto elektriciteitsproductie			Brandstoffen			Totale CO ₂ -emissie kg/ton biomassa
	(MWh _e /ton biomassa)	Emissie-factor CO ₂ (kg/MWh _e)	CO ₂ -emissie (kg/ton biomassa)	GJ/ton biomassa	Emissie-factor CO ₂ (kg/GJ)	CO ₂ -emissie (kg/ton biomassa)	
Systeem waarin biomassa niet nuttig wordt toegepast:							
a Referentie 1, biomassa vergaat							
b HTU-keten	0,14		78	12,1		1.024	1.102
a – b: uitgespaarde emissie			-78			-1.024	-1.102
Systeem waarin biomassa wordt verbrand:							
a Referentie 2, biomassa verstoekt	1	560	560				560
b HTU-keten	0,14	560	78	12,1	85	1.024	1.102
a – b: uitgespaarde emissie			482		85	-1.024	-542

Biofuel schat dat de HTU-technologie in 2020 en 2040 resp. 4 en 27 Mton per jaar DAF biomassa zal verwerken (zie Bijlage A).

Tabel 8 Door toepassing van de HTU-keten vermeden CO₂-uitstoot

Jaar	2020	2040
HTU-capaciteit, Mton DAF per jaar	4	27
CO ₂ -emissie besparing, Mton CO ₂ per jaar		
– referentie case 1	4,4	30
– referentie case 2	2,6	15

De *conclusie* is dat door toepassing van de HTU-keten 2,5 tot 4,5 Mton CO₂ per jaar in 2020 bespaard wordt. In 2040 is dit 15 tot 30 Mton CO₂ per jaar. De exacte hoeveelheden hangen af van de referentie toepassing die in de genoemde jaren het meest toepasselijk is.

Energieverbruik en emissies van procesgerelateerde emissies

In de HTU-keten wordt per eenheid nuttig product (nafta, kerosine, diesel) aanzienlijk meer energie verbruikt als in de conventionele aardolieketen:

- voor productie van zwavelarme diesel (10 ppm S) uit heavy Arabian crude is volgens [ECN, 2003] ongeveer 0,15 GJ/GJ diesel nodig. Dit zal in de toekomst – wanneer ook eisen zullen worden gesteld aan het gehalte aan aromaten – nog wel toenemen;
- de HTU-keten heeft een rendement van ongeveer 65%. Het eigen verbruik aan brandstof bedraagt ongeveer 0,4GJ/GJ aan diesel/nafta/kerosine (zie Bijlage A).

In beide gevallen betreft het eigen verbruik brandstof inzet in gasturbines, STEG's of fornuizen. Om die reden kan worden verondersteld dat de specifieke emissies per eenheid brandstof in beide ketens vergelijkbaar zijn. En omdat in de HTU-keten twee en mogelijk drie maal meer energie in dit soort processen wordt ingezet kan ook worden verondersteld dat de aan de inzet van energiedragers gerelateerde milieubelasting hoger is.

Zwavel

Biomassa bevat over het algemeen minder zwavel dan aardolie. Zowel in de HTU-keten als bij aardolie raffinage komt de zwavel uit de grondstof (vrijwel) volledig in gasstromen terecht, waaruit de zwavel middels gaswassing met rendementen van 99% - 99,99% kan worden verwijderd. Bij de HTU-keten zal dit zowel bij het HTU-proces zelf als bij het HDO-proces zijn. We verwachten daarom ook dat in de HTU-keten minder zwavel wordt geëmitteerd als in de aardolieketen.

VOC

De omvang van de emissie van VOC wordt volgens ons bepaald door het aantal processtappen waarbij VOC-emissies kunnen optreden. Elk proces heeft weer een 'x-tal' kleppen en afsluiters en andere punten waarop lekkage mogelijk is. In de aardolie keten is het aantal processtappen met mogelijkheden voor VOC-emissies groter². Daarom verwachten we een hogere VOC-emissie in de aardolieketen.

Niet toxische mineralen in biomassa en biocrude

In principe bevat de vervangen keten van nafta/kerosine/diesel productie uit aardolie en het laten vergaan van de niet nuttig toegepaste of als afval verwerkte biomassa meer zouten dan de keten waarin diezelfde biomassa reststromen in de HTU-keten worden gebruikt voor de productie van nafta/kerosine/diesel: de zouten in de aardolie.

Maar de impact van de zouten kan verschillend zijn.

Biomassa bevat duidelijk meer mineralen dan aardolie, ook wanneer zeer zware crudes worden verwerkt. Wanneer de biomassa vergaat – bijvoorbeeld op het veld – komen deze mineralen waarschijnlijk diffuus vrij en wordt de mineralenkringloop weer deels gesloten.

In de HTU-keten komen de mineralen deels in de waterstroom van het HTU-proces terecht, deels in de slak van de vergasser. De in de vergassingslak opgesloten mineralen zijn permanent aan de kringloop onttrokken. De in de waterstroom van het opgeloste zouten zijn sterk geconcentreerd. Het op oppervlaktewater lozen van deze stroom kan bij een sterke toename van het zoutgehalte van het ontvangende water een sterk negatieve impact hebben. Biofuel geeft aan dat de in de waterstroom van het HTU-proces opgeloste mineralen kunnen worden afgezet als een concentraat, dat kan worden gebruikt als een meststof.

Toxische mineralen en PM₁₀

Aardolie bevat niet persé meer zware metalen dan biomassa, eerder andersom. We verwachten daarom dat de emissie van zware metalen ongeveer gelijk blijft wanneer aardolie wordt vervangen door biomassa.

² Aardolieketen:

- oliewinning;
- olieoverslag in transportmiddel;
- transport;
- olieoverslag bij de raffinaderij;
- ontzouten;
- atmosferische destillatie;
- vacuümdestillatie;
- hydrotreating en eventueel andere bewerkingen van de destillaatfracties (alkylatie, isomerisatie);
- opwerken van vacuüm residu en eventuele behandeling van de destillaten uit opwerking.

Emissies naar water

Het debiet aan te lozen water is bij de HTU-keten groter dan bij de uitgespaarde aardolieketen. Aan de andere kant kan het laten vergaan van de biomassa ook leiden tot verontreiniging van oppervlaktewater. Het is echter moeilijk aan te geven welke omvang die emissies zouden kunnen hebben. Daarom hebben we in deze studie geen uitspraak gedaan over het effect van de vervanging van aardolie door de HTU-keten op waterverontreiniging.

4.3 Ecologische en sociaal maatschappelijke aspecten, een voorzichtige eerste inschatting

Bij verwerking van reststromen zullen de ecologische aspecten beperkt zijn. Er vindt geen ruimtebeslag plaats, waardoor ook geen sprake is van invloed op biodiversiteit of van concurrentie met voedselgewassen. De invloed op het ecosysteem middels emissies zal bij gebruik van de best beschikbare techniek beperkt zijn.

Bij verwerking van aquatisch geteelde biomassa is nog niet duidelijk welke vormen van en welke mate van ecologische impact kunnen optreden. Dit zal in het betreffende transitieprogramma moeten worden uitgezocht.

Wat betreft de sociaal economische invloeden biedt het HTU-proces in principe het voordeel dat het proces landen zonder eigen olievoorraden in staat stelt om voertuig brandstoffen uit reststromen – en dus tegen relatief lage kosten – te maken. Dit terwijl in de huidige situatie met name veel derde wereld landen een groot deel van hun inkomsten uit export (in de vorm van buitenlandse valuta) moeten spenderen aan dure inkoop van olieproducten voor verkeer en voor decentrale elektriciteitsproductie. Productie van biocrude opent de mogelijkheden om onder deze economische last uit te komen.

Ook in het kader van biomassa teelt voor toepassing als energiedrager of bio-brandstof of grondstof kan het HTU-proces sociaal economische voordelen bieden of genereren. De beoogde schaalgrootte van de installaties maakt decentrale verwerking tot biocrude mogelijk, waardoor het mogelijk wordt gemaakt om ook lokaal te profiteren van de voordelen die biocrude en daarvan afgeleide producten kan bieden. Al was het maar doordat er lokaal een lokaal geproduceerde vloeibare brandstof beschikbaar komt voor decentrale elektriciteit opwekking in bestaande gensets. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld teelt van hout, waarbij de kans bestaat er een situatie ontstaat zoals nu bestaat voor veel landbouw gewassen uit de derde wereld: de gewassen worden tegen minimale opbrengsten voor de lokale bevolking verhandeld.

Het proces biedt tevens een oplossing voor enkele bekende milieuproblemen als de waterhyacinten in het Victoriameer en de stort van olijfafval in de landen rond de Middellandse zee.

5 Maximale elektriciteit productie

5.1 Systeem

Emissies en reststoffen

Bij het systeem van maximale elektriciteitsproductie op basis van biocrude gaan we uit van het verstoffen van zowel de lichte als de zware biocrude in een conventionele energiecentrale met een ultra superkritische boiler (stoomparameters bijvoorbeeld: temperatuur = 700°C, druk = +300 bar). Met de in ontwikkeling zijnde staaltechniek en keteltechniek kunnen op een termijn van ongeveer 10 jaar rendementen worden bereikt van 50% - 55%. Dit is min of meer vergelijkbaar met de rendementen die kunnen worden bereikt met vergassing in combinatie met een nageschakelde gas- en stoomturbine. Maar, de techniek van de ultra superkritische boiler is veel goedkoper en is al min of meer bewezen (zie bijvoorbeeld de rendementen van de kolencentrales Skaerbaek 3 (49%) en Nordjylland 3 (47%) in Denemarken³).

5.2 Biocrude voor elektriciteitsopwekking

Systeem

We hebben aangenomen dat in dit systeem het mengsel van zware en lichte biocrude integraal als een soort orimulsie⁴ in een energiecentrale met een ultra superkritische ketel wordt verstoofd.

Het heeft in deze toepassing geen zin om biocrude te scheiden in een zware en een lichte fractie omdat beide deelstromen in dezelfde installatie kunnen worden verwerkt.

De rookgassen van de ultra superkritische boiler worden gereinigd middels gasreiniging processen die nu al bewezen technologie zijn, zoals:

- doekenfilter;
- ultra Low NO_x-branders en SCR;
- rookgasontzavelingsinstallatie;
- nat elektrofilter.

Emissies

Door Babcock en Wilcox is een schatting gegeven van de emissies die volgens dit bedrijf op termijn voor kolencentrales haalbaar zijn⁵. Deze waarden kunnen ook worden gezien als een indicatie van de emissies van een conventionele met biocrude gestookte energiecentrale. Ter vergelijking zijn de huidige emissies van de Nederlandse steenkoolcentrales gegeven.

³ <http://www.elsamprojekt.com.pl/usc.html>.

⁴ Orimulsie is de naam van een door Bitor uit Venezuela geleverd mengsel van natuurlijke oliebitumen en water. Het wordt door Bitor als een steenkoolvervanger op de markt gebracht en wordt in Europa ondermeer toegepast bij de elektriciteitscentrales in Asnaes (DK), Brindisi (It) en Fiume Santo (It).

⁵ <http://www.babcock.com/pgg/tt/pdf/BR-1715.pdf>.

Tabel 9 Emissies van kolencentrales nu en in de toekomst

	Babcock & Wilcox	Praktijk Nederland
NO _x	0,007	0,06
SO ₂	0,017	0,047
PM ₁₀	0,003	0,003

Voor restconcentraties in spui zijn geen cijfers gevonden.

De netto uitgespaarde CO₂-emissie per ton biomassa (DAS) is in onderstaande tabel berekend voor 2020 en 2030. Voor die jaren is conform de voor biomassa transitie ontwikkelde methodiek uitgegaan van een specifieke CO₂-emissie van respectievelijk 450 kg/MWh_e en 560 kg/MWh_e.

Tabel 10 Netto uitgespaarde CO₂-emissie per eenheid biomassa

	anno 2020	anno 2030
Energie-inhoud biocrude (GJ/ton biomassa; DAS)	15,3	15,3
Opgewekte hoeveelheid elektriciteit (MWh _e /ton biomassa; DAS)	2,3	2,3
Gederfde elektriciteitsopbrengst (MWh _e /ton biomassa; DAS)	-1	-1
Netto elektriciteitsopbrengst (MWh _e /ton biomassa; DAS)	1,3	1,3
Specifieke emissiefactor (kg/MWh _e)	450	560
Uitgespaarde CO ₂ -emissie (ton/ton biomassa; DAS)	0,58	0,75

Er is aangenomen dat de door de HTU-technologie verwerkte biomassa anders zou zijn gedroogd en verband in een installatie met een ultra superkritisch stoomketel. De gederfde elektriciteitsproductie is berekend uitgaande van een netto elektrisch rendement van 20%, inclusief de voor drogen van de zeer natte biomassa benodigde warmte.

De in deze keten netto uitgespaarde CO₂-emissie is vergelijkbaar met of iets hoger dan de middels de keten voor productie van grondstoffen en voertuigbrandstoffen realiseerbare reductie.

Door Biofuel wordt ingeschat dat in 2020 en 2040 respectievelijk 4 Mton/jaar en 27 Mton/jaar aan droge, asvrije biomassa middels de HTU-technologie wordt verwerkt. Dit zou overeenkomen met een uitgespaarde CO₂-emissie van 2,3 Mton CO₂ in 2020 en 19,7 Mton in 2040.

Literatuur

[AOO, 2002]

Anonymus

Milieu-effectrapport Landelijk Afvalbeheerplan, Achtergronddocument A15, Uitwerking "groenafval"

AOO, Utrecht, 2002

Website: <http://www.aoo.nl/>

[BAT REF, 2003]

Anonymous

Reference document on best available techniques for mineral oil and gas refineries

EIPPCB, Sevilla, February 2003

Website: <http://eippcb.jrc.es/pages/FAbout.htm>

[BMWl, 1999]

Anonymus

Kohlekraftwerke der Zukunft: sauber und wirtschaftlich

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, juli 1999

Website: www.bmwa.bund.de/Redaktion/Inhalte/Pdf/br-kohlekraftwerke.property=pdf.pdf

[Bressan, 2000]

Power from Petronor refinery, the 800 MWe IGCC project

Foster Wheeler review

[B & W, 2001]

G.T. Bielawski, J.B. Rogan, D.K. McDonald

How low can we go, controlling emissions in new coal fired power plants

The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A.

Presented to: The U.S. EPA/DOE/EPRI Combined Power Plant Air Pollutant Control Symposium: 'The Mega Symposium', August 20-23, 2001, Chicago, Illinois, U.S.A.

Website <http://www.babcock.com/pgg/tt/pdf/BR-1715.pdf>

[DEA, 2004]

Anonymous

Technology data for electricity and heat generating plants

Danish Energy Authority, March 2004

[DHV, 2001]

Anonymus

Haalbaarheidsstudie vergisting van slachtafvallen bij de varkensslachterij van HMG te Meppel

DHV Milieu en Infrastructuur BV, mei 2001

[ECN, 2003]

F.W.A. Tillemans, A.C.B. den Ouden

Brandstofcelbussen en –distributievrachtwagens in de stedelijke omgeving, een analyse van het milieupotentieel

ECN, Petten, mei 2003

[Goudriaan, 2001]

F. Goudriaan, et al.

Thermal efficiency of the HTU process for biomass liquefaction

In: Progress in thermochemical biomass conversion, A.V. Bridgewater, Blackwell Science, 2001

[Kerssen, 2004]

M. Kerssen, R.H. Berends

Life cycle analysis of the HTU process

TNO MEP, Apeldoorn, 2004

Website: <http://www.novem.nl/default.asp?menuId=10&documentId=115819>

[Sheffield, 2003]

M.A. Elsayed, R. Matthews, N.D. Mortimer

Carbon and energy balances for a range of biofuels options

Sheffield Hallam University, March 2003

[WEC]

www.worldenergy.org/wec-geis/publications/default/tech_papers/17th_congress/2_2_02.asp



Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

Duurzame transitie met HTU

Een verkenning van de score
van het HTU-proces op
duurzaamheidsaspecten

Rapport

Delft, april 2005

Opgesteld door: H.J. (Harry) Croezen
B.E. (Bettina) Kampman





A Detailanalyse HTU-keten

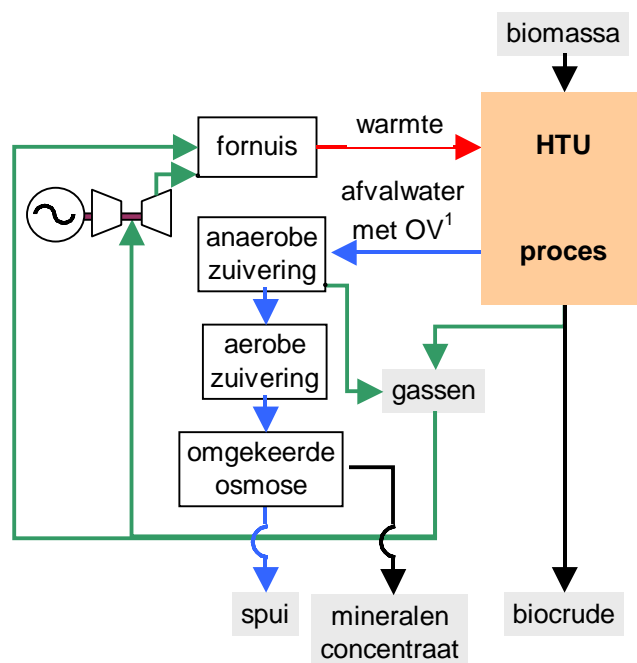
A.1 Conversieroute

Het HTU-proces zelf

Het HTU-proces is gebaseerd op depolymerisatie en deoxygenatie van biomassa door hydrolyse en decompositie bij verhoogde temperatuur (330 - 350°C) en hoge druk (100 - 200 bar) in vloeibaar, subkritisch water. Producten zijn (zie ook Figuur 2):

- biocrude ($\pm 45\%$ van ingaande D.A.S.⁶);
- een gasfase, voornamelijk CO₂ met sporen van CO, H₂ en CH₄ ($\pm 15\%$ van ingaande massa);
- water ($\pm 15\%$ van ingaande massa);
- in water opgeloste lichte zuurstofhoudende organische verbindingen of OV⁷ (15 – 20% van ingaande massa).

Figuur 2 Schema HTU-installatie



Het grootste deel van de zuurstof in de biomassa komt terecht in de gasfase of wordt omgezet in water. In water oplosbare mineralen (chloor, natrium, kalium) worden voornamelijk in het water geconcentreerd. Slecht oplosbare verbindingen van met name P, Si, Ca en Fe eindigen in de biocrude. De elementen Mg, S en N worden min of meer gelijkmatig verdeeld over biocrude en afvalwater. Als vuist-

⁶ D.A.S. = droge, asvrije stof.

⁷ Voornamelijk azijnzuur, methanol, aceton, butanon, propaanzuur en 2-methoxyfenol.

regel wordt door Biofuel en TNO [Kerssen, 2004] aangehouden dat ongeveer 50% van de mineralen in de waterfase wordt afgevoerd.

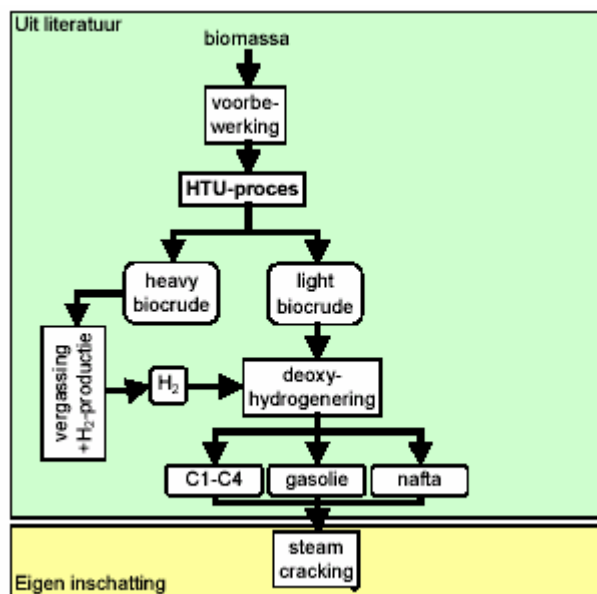
Gassen en bij waterbehandeling uit de opgeloste organische verbindingen vrijgemaakte organische stoffen worden gebruikt als brandstof in het proces. De brandstof inzet bedraagt ongeveer 3 GJ/ton biomassa (DAS), waarvan ongeveer 30% wordt ingezet in de gasturbine⁸. De brandstofinzet komt overeen met ongeveer 15% van de energie-inhoud van de droge en asvrije biomassa.

De biocrude zal bij commerciële installaties worden gescheiden in een zware en een lichte fractie (light en heavy biocrude). Lichte biocrude heeft een stookwaarde van 30 MJ/kg tot 36 MJ/kg en een zuurstofgehalte van 12%. De zware biocrude bevat de niet in water oplosbare mineralen en heeft een stookwaarde van ongeveer 28 MJ/kg.

HTU-proces in een productieroute voor chemicaliën

Onderstaande figuur geeft een flow chart van de in deze scan beschouwde productieroute voor chemicaliën uit biomassa.

Figuur 3 Productieroute voor voertuigbrandstoffen en chemicaliën uit natte biomassa middels het HTU-proces



De lichte biocrude kan middels hydro-deoxygenatie (HDO) worden omgezet in een mengsel van gasolie, nafta, kerosine en C1-C4 koolwaterstoffen. Alle producten worden in Nederland in de praktijk ingezet als voeding voor stoomkrakers en daarmee grondstoffen voor de productie van bulkchemicaliën. De voor hydro-deoxygenatie benodigde waterstof kan worden geproduceerd door vergassing van de zware biocrude.

⁸ Bepaald in het kader van de peer review van de subsidieaanvraag van Biofuel, anno 2003.

A.2 Energiebalans

De koude chemische efficiency van het HTU-proces zelf ($80\% \pm 5\%$) is onder andere afhankelijk van:

- het vochtgehalte van de biomassa;
- de mate van warmte-integratie in het ontwerp;
- de mate waarin brandbare organische stoffen uit het proceswater worden terug gewonnen om te worden benut als brandstof.

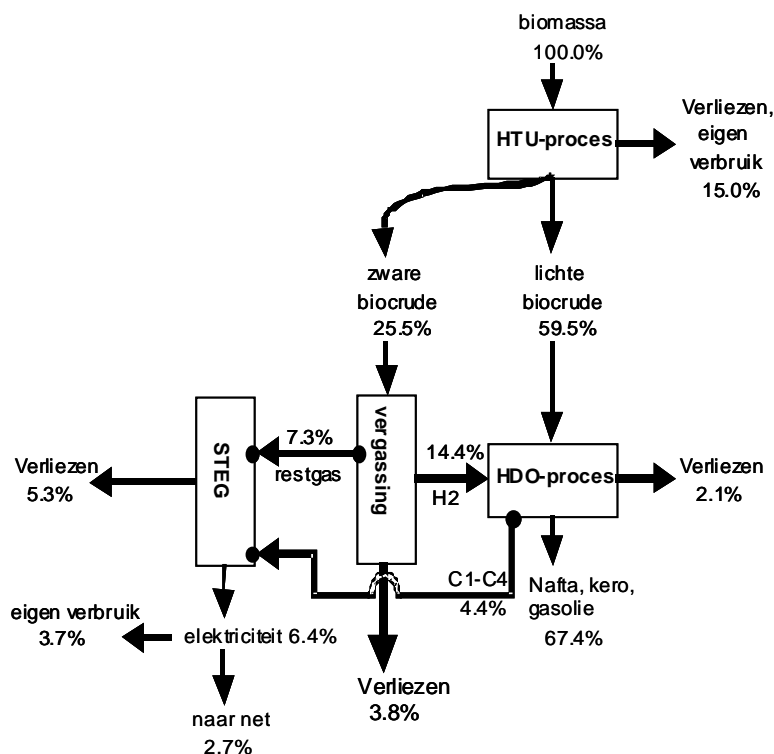
De lichte biocrude vertegenwoordigt circa 70% van de totale energie-inhoud aan biocrude.

De energie-inhoud van de in het hydro-deoxygenatieproces geconsumeerde waterstof is circa 15% van de energie-inhoud van de verwerkte biomassa. Voor waterstofproductie op basis van biocrude is uitgegaan van een energetisch rendement van 65%, vergelijkbaar met het rendement voor waterstofproductie op basis van restfracties uit de petrochemie. Aangezien de zware biocrude circa 25% van de energie-inhoud van de oorspronkelijke biomassa vertegenwoordigt, is er meer dan voldoende zware biocrude om de waterstofconsumptie energetische te dekken.

HDO heeft een efficiency van circa 90% ten opzichte van de totale energie input in het proces. De waterstofvraag wordt voornamelijk bepaald door de chemische samenstelling van de lichte biocrude.

Onderstaande Sankey-diagram geeft een energiebalans over het hele systeem.

Figuur 4 Sankey-diagram voor het HTU-systeem



A.3 Verwachte emissies

HTU-installatie

Bij de HTU-installatie worden emissies naar lucht verwacht door inzet van de gassen uit HTU-proces en waterzuivering in fornuis en gasturbine. Welke emissies precies optreden hangt af van de behandeling die de gassen ondergaan:

- Bij inzet van gasvormige energiedragers in het fornuis en gasturbine zullen in ieder geval emissies van NO_x en CO optreden. Om een idee te geven van de omvang:
 - a Emissies van NO_x en CO zijn voor een moderne gasturbine zijn beperkt tot respectievelijk 20 g/GJ_{brandstof} en 20 g/GJ.
 - b Emissies van NO_x en CO zijn bij een modern fornuis met een low NO_x brander respectievelijk circa 15 g/GJ en 1 g/GJ.
- Te verwachten valt dat in de gassen uit de waterzuivering onder meer H₂S en NH₃ aanwezig zijn, zoals gebruikelijk is bij vergisting. Deze gassen worden bij vergistingsinstallaties vrijwel volledig verwijderd. We nemen aan dat dit ook zal gebeuren bij de HTU-technologie. Zo niet dan zal er sprake zijn van een hoge NO_x-emissie en ook van de emissie van SO₂.

Op basis van een brandstofgebruik van 3 GJ/ton biomassa (DAS), waarvan 30% wordt ingezet in de gasturbine worden de emissies van CO en NO_x geschat op circa 0,02 kg/ton biomassa (DAS) en 0,05 kg/ton biomassa (DAS) of ongeveer 2 g/GJ nafta/diesel/kerosine aan CO en ongeveer 4 g/GJ nafta/diesel/kerosine aan NO_x.

Er zal verder sprake zijn van diverse vormen van emissies naar water, ook na zuivering van het vrijkomende water. Die hoeveelheid water zal bij natte biomassa met een vochtgehalte van 80% overigens ongeveer 8 m³/ton biocrude bedragen. Bij de huidige stand der techniek zijn de volgende restconcentraties haalbaar:

- CZV < 70 mg/l;
- N-totaal < 30 mg/l;
- totaal zware metalen < 1 mg/l.

Bij een asgehalte van 5% - 10% van de droge stof⁹ zal het zoutgehalte in dit watervolume (als inderdaad 50% van de mineralen in de waterfase terecht komt) 10 - 15 g/l bedragen, een concentratie die vergelijkbaar is met de zoutconcentratie in zeewater.

Het plan is de zouten af te scheiden middels omgekeerde osmose en het concentraat af te zetten als en vloeibare meststof. Dit is vergelijkbaar met het gebruik van assen van houtverbrandingsinstallaties als meststof. De werkzame stoffen in deze alternatieve meststof zullen vooral kalium en in beperkte mate zwavel zijn. Naast kalium zal ook een grote hoeveelheid chloor en natrium in het concentraat aanwezig zijn. Het is nog niet duidelijk of gebruik van deze meststof niet bij bepaalde grondsoorten of ecosystemen zal leiden tot een verzilting van de bodem vanwege de hoge concentraties Na en Cl.

⁹ Dergelijke asgehalten worden bijvoorbeeld gevonden in perscake van olijfolieproductie, palm vezels en suikerbieten pulp.



HDO-systeem

Bij het systeem van HDO en vergasser zijn voor emissies naar lucht, onder andere de volgende bronnen relevant:

- scheiding van lichte en zware biocrude middels extractie;
- de HDO zelf¹⁰:
 - emissies door afblazen of affakkelen bij processtoringen;
 - diffuse emissies door ontsnappen van koolwaterstoffen via bijvoorbeeld afsluiters in pijpleidingen;
- de schoorsteen van de STEG;
- de schoorstenen van de verschillende SRU's¹¹;
- de waterbehandelingsinstallatie(s);
- op- en overslag van grondstoffen en eindproducten.

Voor emissies naar water, onder andere:

- de spui van de gasreiniging van de vergasser;
- de waterstroom die vrijkomt bij de HDO.

Op basis van de huidige stand der techniek schatten we de emissies via de schoorstenen van STEG en SRU's en de emissies naar water vanuit de gasreiniging van de vergasser als gegeven in Tabel 11.

Tabel 11 Indicatieve schatting van de aan conversie van biocrude naar diesel en dergelijke gerelateerde emissies

Lucht	Kg/ton biomassa (DAS)
NO _x	0,258
SO ₂	0,064
PM ₁₀	0,021
Water	
COD	0,013
N-totaal	0,006
Zware metalen	1,9E-04

De emissies van met name VOC's uit waterbehandelingsinstallatie op- en overslag hebben we niet geschat omdat hierover in [BAT REF, 2003] en andere bronnen weinig activiteiten gerelateerde informatie te vinden is. In [BAT REF, 2003] bijvoorbeeld wordt voor raffinaderijen inclusief tankenparken een spreiding genoemd van 0,05 – 6,0 kg VOC per ton verwerkte olie. Bovendien hangen de emissies sterk af van de mate van onderhoud aan kleppen en pompen en ander

¹⁰ Volgens Biofuel zal bij de reactie tussen H₂ en lichte biocrude in de HDO zoveel warmte vrijkomen dat er netto een warmteoverschot zal zijn, ook wanneer de voor opwarmen van de lichte biocrude voorafgaand aan hydrogenatie benodigde warmte wordt verdisconteerd. Daarom hoeft de lichte biocrude niet door ondervuring te worden opgewarmd en hoeft geen rekening te worden gehouden met emissies gerelateerd aan brandstof inzet.

¹¹ SRU = Sulphur Recovery Unit:
Bedoeld worden de installaties waarmee zwavel wordt verwijderd uit synthesegas en uit de productgassen van de HDO.

procesapparatuur. Als eerste orde benadering zou de laagste emissie uit het in [BAT REF, 2003] genoemde bereik kunnen worden aangehouden: 0,05 kg VOC per ton biocrude of 0,025 kg per ton biomassa (DAS).

Bij het schatten van de emissies naar water door spui van de bij hydro deoxygenatie vrijkomende waterstroom is aangenomen dat de eventueel aanwezige verontreiniging beperkt blijft tot organische stoffen en ammoniak. In de lichte crude zijn geen metalen aanwezig. De spui bedraagt circa 0,05 m³/ton biomassa. Combinatie met de voor een moderne waterzuivering haalbare restconcentraties voor COD en stikstof (zie vorige subparagraaf) geeft emissies van respectievelijk 3 en 1 g/ton biomassa.

Samenvattend

Onderstaande tabel geeft een samenvattend overzicht van de emissies gerelateerd aan de HTU-keten. Bij het omrekenen naar emissies per GJ nafa/kerosine/diesel is uitgegaan van een stookwaarde van de biomassa (DAS) van 18 GJ/ton [Goudriaan, 2001].

Tabel 12 Indicatieve schatting van de aan de totale HTU-keten gerelateerde emissies

	Emissies per schakel kg/ton biomassa (DAS)			Totaal	
	HTU	HDO-vergasser	HDO spui	kg/ton biomassa (DAS)	kg/GJ product
NO _x	0,004408	0,25		0,25	0,02
SO ₂		0,06		0,06	0,01
PM ₁₀		0,02		0,02	0,002
water					
COD	0,31	0,01	0,003	0,33	0,03
N-totaal	0,13	0,01	0,001	0,14	0,01
zware metalen		1,82E-05		1,82E-05	1,54E-06

A.4 Technische status

Huidige status

Het proces zelf is beproefd op laboratoriumschaal en in een proefinstallatie. De proefinstallatie heeft last van verstoppingen door inerte deeltjes > 10 mm in de voeding. Dit probleem zou onder andere te maken hebben met de schaalgrootte van de installatie en kan naar verluidt worden opgelost door de voeding voor te bewerken en de storende deeltjes te verwijderen. Bij (semi)commerciële installaties zijn de leidingdiameters veel groter

en speelt dit probleem navenant minder. Toch moet voor het commercieel ontwerp nog grondig gekeken worden naar de voorbereiding van diverse biomassastromen. Allereerst om ongewenste verontreinigingen zoals zand, brokken steen, enz. te verwijderen. Voorts om de biomassa in de vorm te brengen van een pasta die voldoende goed kan worden verpompt. Tenslotte kan het nuttig zijn water te verwijderen door b.v. persen. Een voorbeeld van een voorbereidings-trein op commerciële schaal is bij VAGRON.

Hydro-deoxygenatie van biocrude is enkel op laboratoriumschaal beproefd. Hydro-deoxygenatie is op zich een op commerciële schaal bewezen proces. Belangrijk punt is of met de scheiding van biocrude in een zware en een lichte fractie de mineralen voldoende kunnen worden afgescheiden in de zware biocrude. Zo ja, dan is de lichte biocrude geschikt voor hydro-deoxygenatie in deze commerciële installaties met gangbare vast-bed reactoren en is enkel verdere de technische ontwikkeling van het HTU-proces en de scheiding van biocrude in een lichte en zware fractie nodig.

Stoomkraken is vanzelfsprekend een op commerciële schaal toegepaste technologie.

Vergassing van zwaardere stoomkraakproducten is vergelijkbaar met vergassing van reststromen uit de raffinage (bitumen, petrocokes). Vergassing van dergelijke reststromen en productie van waterstof uit het gegenereerde syngas is een op commerciële schaal bewezen technologie, zie bijvoorbeeld Shell Hydrocracker project.

Beoogde ontwikkelingstraject

Er is subsidie aangevraagd voor realisatie van een eerste demonstratie-installatie op commerciële schaal. Deze zal volgens planning in 2007 - 2008 gerealiseerd zijn en zal een verwerkingscapaciteit van 25 kton d.s. per jaar. Daarna te bouwen commerciële installaties (vanaf 2009 - 2010) zullen naar verwachting een verwerkingscapaciteit van 150 tot 300 kton d.s. per jaar hebben. De productie zal ongeveer 60 - 120 kton/jaar aan biocrude bedragen.

A.5 Biomassa voeding, typen biomassa

Het huidige procesontwerp is gericht op verwerking van 'zachte' biomassa, zoals GFT uit huisvuil, grassen en pulpen. Het ontwerp is in principe zeer geschikt voor de verwerking van goedkope biomassa als afval en restproducten uit bijvoorbeeld voedings- en genotsmiddelenindustrie.

Beoogde reststromen zijn bijvoorbeeld:

- organische deel van huisvuil;
- digestaat van vergisting;
- bermgras;
- restproducten van de olijfolie en palmolie industrie;
- restproducten van de rietsuikerindustrie.

Het proces is daarom ook geschikt voor toepassing in combinatie met bijvoorbeeld ethanolproductie.

Het aanbod in Nederland van dergelijk biomassa stromen bedraagt in totaal circa 3 Mton d.s. per jaar met een energie-inhoud van circa 50 PJ/jaar. Het mondiale aanbod aan voor het HTU-proces aantrekkelijke stromen bedraagt naar schatting 70 – 100 EJ/jaar.

Hardere biomassa soorten, zoals hout, zijn in principe ook te verwerken, maar vergen een ander ontwerp waarin de grondstof een verdere voorbehandeling ondergaat om geschikt te worden gemaakt voor verwerking in de HTU-reactor. In tot nu toe beschouwde en op laboratoriumschaal beproefde concepten is daartoe een zogenaamde verweker in het ontwerp is opgenomen, waarbij de voeding wordt verweekt bij circa 200°C en verhoogde druk.

Kritische specificaties

De proefinstallatie is als gezegd gevoelig gebleken voor met name grotere inerte deeltjes. Men verwacht dat biomassa voedingen dusdanig kunnen worden opgewerkt dat problemen bij een installatie op commerciële schaal met grote zekerheid kunnen worden voorkomen, zoals bijvoorbeeld een natte opwerking, zoals nu wordt toegepast bij VAGRON voor het opwerken van ONF.

Onduidelijk is ook in hoeverre de lichte biocrude nog minerale verontreinigingen bevat die verstoppingen kunnen veroorzaken bij hydro-deoxygenatie in gangbare vast-bed reactoren. De lichte biocrude zal echter naar verwachting geen chemische katalysatorverontreinigingen meer bevatten.



B Door Biofuel verstrekte gegevens

Demonstratieplant HTU-1

Voeding

Bermgras	5 kton/jaar (db)	Alternatief is: storten
Uienpulp	5 kton/jaar (db)	Alternatief is: veevoer
Aardappelafval	5 kton/jaar (db)	Alternatief is: veevoer
Slachtafval	10 kton/jaar (db)	Alternatief is: vergisten → elektriciteit

Verbruik:

Elektriciteit: zelf opgewekt (zie onder)

Proceswarmte: 4,0 MW_{th} hogedruk stoom van AVI;

- Alternatief is: met deze stoom elektriciteit opwekken (ca 30% efficiency),
- CO₂-effect is hetzelfde, valt weg in de vergelijking.

Productie:

<i>Elektriciteit:</i>	uit LCR (dieselgenerator)	29.5	GWh per jaar
	uit HCR (kolencentrale)	11.2	
	uit biogas (gasmotor)	6.3	
	eigen verbruik	-1.6	
	Totaal netto	45.4	GWh per jaar

Alternatief: fossiele elektriciteit inkopen

Mineralen: mineralen in de HCR die naar kolencentrale gaat, ca 300 ton/jaar, valt (gedeeltelijk) weg tegen mineralen die anders uit kolen komen.

Mineralen in afvalwater (1.400 ton mineralen/jaar) worden met afvalwater naar DWR waterzuivering gestuurd.

CO₂-productie:

HTU-keten:

CO₂-uitstoot van HTU-proces en verbranding van producten valt weg tegen de CO₂-opname bij het groeien van de voeding.

Verder alleen de CO₂-productie voor de opwekking van de AVI HD stoom, en mogelijk die verbonden aan het transport van de voedingsstromen (gemiddeld 25% droge stof) en van de HCR (afstand AVI – Kolencentrale < 5 km).

Referentieketen: CO₂ van opwekking fossiele elektriciteit.

Kosten: deze zijn samengesteld uit een aantal onzekere componenten.

inkomsten:

- verkoop van groene stroom. grote onzekerheid over wat b.v. de MEP zal zijn in de jaren 2007⁺;
- premie voor het verwerken van afvalstromen, idem;

uitgaven:

- eigen operatiekosten ca. 1,5 M€ per jaar;
- kapitaalslast: zal sterk afhangen van de eisen voor rentabiliteit die de uiteindelijke investeerders stellen.

Op dit moment lijkt de beste aanname dat het geheel kosten-neutraal zal kunnen opereren

1 De HTU-situatie in 2040

Opzet van proces is in grote lijnen dezelfde als in de GAVE-studie.

De belangrijkste vorderingen zijn:

Voeding is nu een niet nader benoemde mix van natte afvalstromen, zoals bagasse, olijfafval, enz. Alternatief gebruik (2004) is opwekking van elektriciteit, met lage efficiency wegens vochtgehalte, en zeer verouderde apparatuur (bagasse). Voor olijfafval zijn pilot projecten voor vergisten, maar nog niet op grote schaal.

Toepassing van aquatische biomassa van brak of zout-water plantages kan overwogen worden. Referentiesituatie is: Niets doen, C5⁺ en elektriciteit fossiel opwekken.

Licht/zwaar scheiding van biocrude gebeurt nu via extractie.

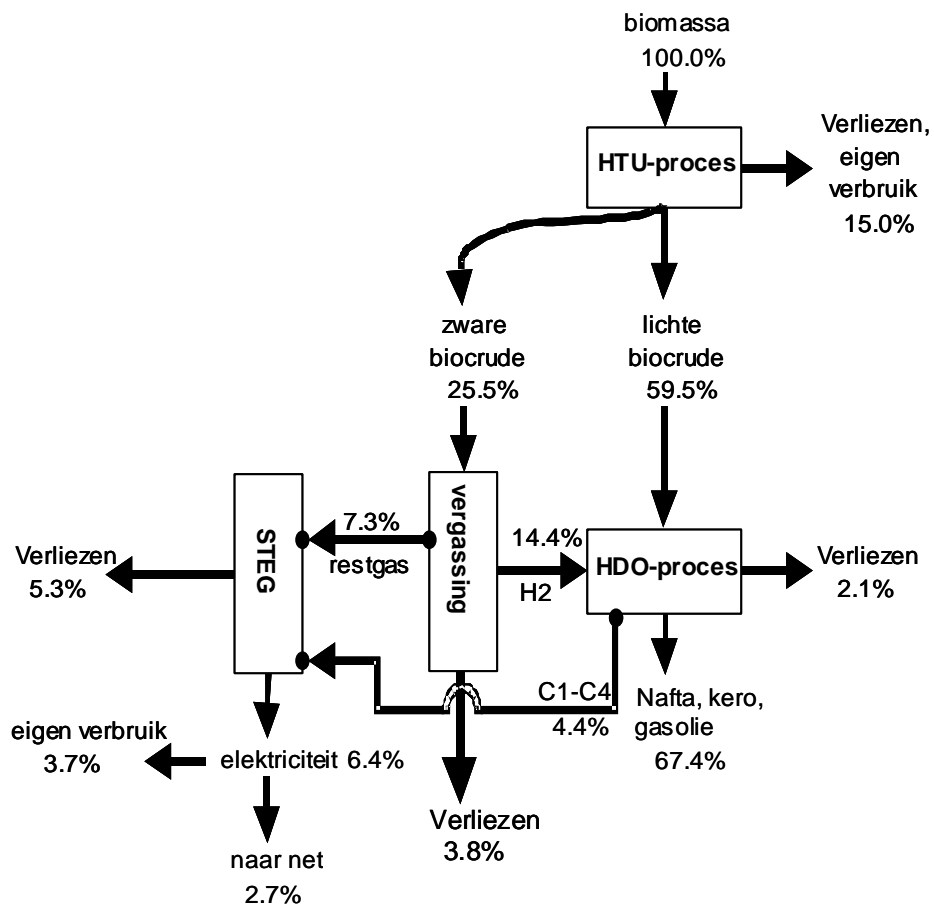
Verdeling lichte biocrude (LCR) : zware biocrude (HCR) = 70 : 30.

Vergasser is een hoge druk vergasser voor vaste stof, type kolenvergasser. Thermisch rendement is 85%.

Het Sankey-diagram is als weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5 Sankey-diagram



PLANNING HTU UNITS

Year nr.	Year	Number of HTU units	Capacity Installed, kton/a			
			HTU (intake, db)		HDO (C5+) distillate output	
			this year	cumulative	this year	cumulative
1	2007	0	25	25	0	0
2	2008	0	0	25	0	0
3	2009	2	200	225	55	55
4	2010	1	68	293	0	55
5	2011	1	88	380	38	94
6	2012	1	114	494	0	94
7	2013	1	148	643	65	158
8	2014	1	193	835	48	206
9	2015	2	251	1086	62	268
10	2016	2	326	1412	80	348
11	2017	3	424	1835	104	453
12	2018	3	551	2386	136	588
13	2019	4	716	3102	177	765
14	2020	5	931	4032	229	994
2040			27000		6658	
2040 PJ/jaar (LHV basis)			437		294	

