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

Biomassa: tanken of stoken?

Een vergelijking van inzet van biomassa in transportbrandstoffen of elektriciteitscentrales tot 2010

Rapport

Delft, juli 2003

Opgesteld door: B.E. (Bettina) Kampman
H.J. (Harry) Croezen
I. (Ingeborg) de Keizer
O. (Olivier) Bello

Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

B.E. (Bettina) Kampman, H.J. (Harry) Croezen, I. (Ingeborg) de Keizer, O. (Olivier) Bello
Biomassa: tanken of stoken? Een vergelijking van inzet van biomassa in transportbrandstoffen of elektriciteitscentrales tot 2010
Delft, CE, 2003

Biomassa / Brandstoffen / Motorbrandstoffen / Vervoer / Energietechniek / Elektriciteit / Warmte / Kosten / Rendement / Scenario's / Vergelijkend onderzoek

Publicatienummer: 03.4583.25

Verspreiding van CE-publicaties gebeurt door:
CE
Oude Delft 180
2611 HH Delft
Tel: 015-2150150
Fax: 015-2150151
E-mail: publicatie@ce.nl

Opdrachtgever: VNPI
Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider B.E. (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 is onderverdeeld in vijf secties die zich richten op de volgende werkterreinen:

- economie
- energie
- industrie
- materialen
- verkeer & vervoer

Van elk van deze secties is een publicatielijst beschikbaar. Geïnteresseerden kunnen deze opvragen bij CE tel: 015-2150150. De meest actuele informatie van CE is te vinden op de website: www.ce.nl

Inhoud

Samenvatting 1

1 Inleiding 5
- 1.1 Aanleiding 5
- 1.2 Doel van deze studie 6
- 1.3 Afbakening 6
- 1.4 Werkwijze 6

2 Biomassa in transport 9
- 2.1 Inleiding: twee opties 9
- 2.2 Optie 1: Biodiesel 10
  - 2.2.1 Beschrijving route 10
  - 2.2.2 Milieueffecten 11
  - 2.2.3 Kosten 12
  - 2.2.4 Landgebruik 12
- 2.3 Optie 2: Bio-ethanol 13
  - 2.3.1 Beschrijving route 13
  - 2.3.2 Milieueffecten 13
  - 2.3.3 Kosten 13
  - 2.3.4 Landgebruik 13
- 2.4 Samenvatting Biomassa in transport 2005 - 2010 14
- 2.5 Mogelijkheden langere termijn 15

3 Biomassa voor elektriciteitsopwekking en warmte 17
- 3.1 Inleiding 17
- 3.2 Huidig beleid en keuzes 17
- 3.3 Biomassa: twee soorten bekeken 19
- 3.4 Selectie van technologieën 19
- 3.5 De ‘precombustion fase’; teelt, transport en voorbewerking 20
  - 3.5.1 Olijvenpulp 20
  - 3.5.2 Geteeld hout 21
- 3.6 Energie uit kolencentrales 22
  - 3.6.1 Beschrijving route 22
  - 3.6.2 Milieueffecten 23
  - 3.6.3 Kosten 25
- 3.7 Raffinaderijen, vervanging van stookolie 26
  - 3.7.1 Beschrijving route 26
  - 3.7.2 Milieueffecten 27
  - 3.7.3 Kosten 28
- 3.8 Overige stookinstallaties, vervanging van aardgas 29
  - 3.8.1 Beschrijving route 29
  - 3.8.2 Milieu effecten 30
  - 3.8.3 Kosten 31
- 3.9 Verwachtingen en mogelijkheden lange termijn 32

4 Routes vergeleken 33
4.1 Inleiding 33
4.2 Route 1: Landbouwgrond gelijk aan transportroute 33
4.2.1 Vergelijking op milieueffecten 34
4.2.2 Vergelijking kosten 35
4.3 Route 2: Energie gelijk aan transportroute 35
4.3.1 Vergelijking op milieueffecten 36
4.3.2 Vergelijking kosten 37
4.4 Vergelijking kosteneffectiviteit 37

5 Conclusies 39
5.1 Lange termijn perspectief en sectorale reductiedoelen 40

Literatuurlijst 43

Samenvatting

Inleiding

De Milieuraad en het Europees Parlement hebben recentelijk een richtlijn aangenomen ter bevordering van het gebruik van biobrandstoffen in transport. Deze richtlijn geeft indicatieve streefcijfers voor de inzet van biobrandstoffen in de transportsector in de lidstaten van de EU. In 2005 zou 2% van de energie-inhoud van alle transportbrandstoffen door biobrandstoffen moeten worden vervuld, en in 2010 5,75%. Lidstaten moeten de komende tijd nu zelf nationale streefcijfers vaststellen, en eventueel beleid hiervoor implementeren. Ter ondersteuning van de besluitvorming hierover laat het Ministerie van VROM in samenwerking met Novem op dit moment een haalbaarheidsstudie hiernaar uitvoeren. Die studie gaat uit van bovengenoemde streefcijfers en bekijkt vervolgens hoe die het best zouden kunnen worden ingevuld.

Deze studie, die is uitgevoerd in opdracht van de VNPI, trekt de vraagstelling echter breder: zij houdt de streefcijfers zélf tegen het licht en bekijkt of het niet goedkoper en milieuvriendelijker is om biomassa in te zetten in de elektriciteitsproductie dan in de transportsector. Daarbij hebben we ons gericht op de Nederlandse transportsector, en hebben we voornamelijk gekeken naar de periode tot 2010.

Daarvoor hebben we een aantal mogelijke routes voor inzet van biomassa in transport en elektriciteitsvoorziening onderling vergeleken op kosten, reductie van broeikasgassen en benodigd landbouwareaal.
We hebben eerst twee mogelijke routes voor transportbrandstoffen bekeken om de indicatieve streefcijfers uit de biobrandstoffenrichtlijn te halen:

1 Biodiesel.
2 Bio-ethanol uit suikerbieten en (in mindere mate) graan.

In de praktijk is ook een combinatie van deze twee soorten biobrandstoffen goed mogelijk, de hier onderzochte twee routes zijn twee uitersten die de bandbreedte aangeven waarbinnen de werkelijkheid zich naar verwachting zal bevinden.
Vervolgens hebben we een drietal routes voor elektriciteitsproductie uit biomassa bestudeerd:

1 Energie uit kolencentrales, door middel van:
   – indirect meestoken van biomassa;
   – bijstoken syngas.
2 Vervanging van stookolie in raffinaderijen.
3 Vervanging van aardgas in overige stookinstallaties.

Resultaten

Om aan de streefcijfers te voldoen moet in 2010 ca. 29 PJ aan biobrandstoffen in Nederland worden verkocht. Hiervoor is 400.000 - 730.000 hectare koolzaad nodig (voor biodiesel) of 220.000 - 250.000 hectare suikerbieten (voor bio-ethanol). De kosten en CO_2-reducties van deze twee routes hebben we nu vergeleken met de situatie dat op even grote arealen hout wordt geteeld voor elektriciteitsproductie in kolencentrales[1]. De resultaten hiervan staan in Tabel 1 samengevat.

[1] Dit zal in het algemeen niet dezelfde grond zijn. omdat verschillende soorten biomassa verschillende eisen aan de grond stellen. We stellen daarom alleen de *arealen* gelijk.

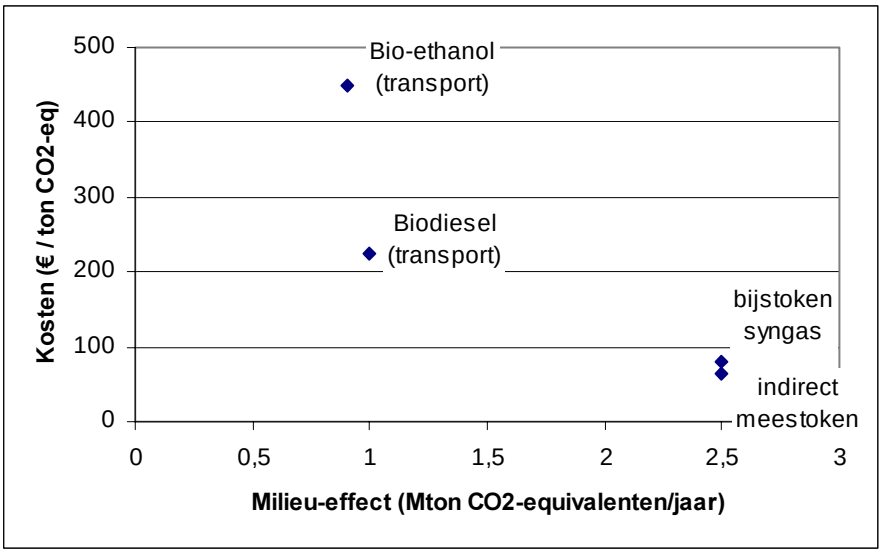
Tabel 1 Overzicht van de emissiereducties van broeikasgassen en kosten van de diverse routes, in 2010. Uitgangspunt: gebruik van even grote landbouwarealen als nodig om het indicatieve streefcijfer uit de biobrandstoffen richtlijn te halen

Vergelijking met Transportroute 1 (biodiesel) **Uitgangspunt: oppervlak 400.000 – 730.000 ha**			
	Emissiereductie (Mton CO_2 eq/jaar)	Jaarlijkse meerkosten (miljoen €)	Kosteneffectiviteit CO_2 reductie (€ / ton CO_2 eq)
Biodiesel	0,6 – 1,2	100 - 200	200 – 250
Kolencentrale			
- indirect meestoken	3,7 – 6,8	234 – 427	65
- bijstoken syngas	3,6 – 6,6	285 – 519	80
Vergelijking met Transportroute 2 (bio-ethanol) **Uitgangspunt: oppervlak 220.000 – 250.000 ha**			
	Emissiereductie (Mton CO_2 eq/jaar)	Jaarlijkse meerkosten (miljoen €)	Kosteneffectiviteit CO_2 reductie (€ / ton CO_2 eq)
Bio-ethanol uit suikerbieten	0,8 – 1,0	200 - 450	400 – 500
Kolencentrale			
- indirect meestoken	2,0 – 2,3	129 – 146	65
- bijstoken syngas	2,0 – 2,3	157 – 178	80

Uit deze tabel blijkt dat het gebruik van biomassa in de elektriciteitsproductie aanzienlijk meer broeikasgassen kan reduceren dan de toepassing als transportbrandstof, bij eenzelfde areaal aan landbouwgrond. Ten opzichte van biodiesel kan dan 3 - 10 maal zoveel CO_2-eq. worden gereduceerd, ten opzichte van bio-ethanol is de winst een factor 2 - 2,5. De productie van biodiesel is weliswaar goedkoper dan elektriciteitsproductie, maar niet genoeg: als we kijken naar de laatste kolom in de tabel zien we dat de kosteneffectiviteit van de elektriciteitsproductie toch duidelijk beter is dan die van de twee transportroutes.

In Figuur 1 hebben we emissiereducties en kosteneffectiviteiten van deze routes grafisch uitgezet. Hierbij hebben we als uitgangspunt genomen dat elke route 29 PJ levert, ofwel aan biobrandstof ofwel aan elektriciteit (zonder correctie voor energie die voor de productie nodig is). De twee routes waarbij biomassa in kolencentrales wordt mee- of bijgestookt scoren op beide criteria duidelijk beter dan de biobrandstoffenroutes.

Figuur 1 Kosteneffectiviteiten en emissiereducties van de diverse routes. Uitgangspunt: elke route levert 29 PJ energie (biobrandstof of elektriciteit)



De kosteneffectiviteiten van de twee andere routes voor elektriciteitsproductie, vervanging van stookolie bij raffinaderijen en vervanging aardgas bij andere installaties, zijn niet in bovenstaande tabel opgenomen omdat hun potentieel minder is dan de benodigde 29 PJ. De kosteneffectiviteit van deze routes is wel bepaald: 75 - 80 Euro/ton CO_2-eq en 110 - 170 Euro/ton CO_2-eq respectievelijk.

Conclusies

Allereerst memoreren we nogmaals dat de onderstaande conclusies gelden voor de korte termijn, tot 2010. We kunnen dan het volgende concluderen:

- meestoken en bijstoken van biomassa in kolencentrales is ruwweg drie- tot achtmaal kosteneffectiever dan omzetting van biomassa naar transportbrandstoffen;
- per hectare levert bijstoken drie- tot tienmaal meer milieuwinst op dan *biodiesel*, terwijl het maar anderhalf tot tweemaal duurder is;
- per hectare levert bijstoken twee- tot driemaal meer milieuwinst op dan *bio-ethanol*, terwijl het meer dan de helft goedkoper is;
- deze conclusies blijven ook overeind als we rekenen per eenheid te vervangen hoeveelheid fossiele brandstoffen (29 PJ in 2010). De kosten van bijstoken zijn dan lager terwijl de realiseerbare CO_2-reductie hoger is dan bij beide transportbrandstof-routes. De behoefte aan landbouwareaal is veel kleiner dan wat voor biodiesel nodig zou zijn, en ongeveer gelijk aan wat voor bio-ethanol nodig zou zijn;
- al deze conclusies worden wat betreft de vergelijking met biodiesel nog sterker wanneer er (meer) reststromen worden ingezet bij mee- of bijstoken. Hiermee kan een verdere kosten- en CO_2-besparing bereikt worden. Het is in principe ook mogelijk om reststromen in te zetten bij ethanolproductie. De vergelijking tussen ethanolproductie uit reststromen en mee- of bjistoken van reststromen zal echter niet tot wezenlijk andere resultaten leiden.

Eén en ander is ook gevisualiseerd in Tabel 34.

Tabel 2 Vergelijking van de verschillende onderzochte toepassingen van biomassa, op verschillende aspecten.

	Kosteneffectiviteit (€ / ton CO_2 eq)	Landbouweffectiviteit (Hectare / ton CO_2 eq)	Benodigde hulpenergie als percentage van energie-inhoud eindproduct
Biodiesel	200 – 250	0,7 – 0,9	35 – 50%
Bio-ethanol	400 – 500	0,2 – 0,4	40 – 60%
Kolencentrale			
- indirect meestoken	65	0,11	14%
- bijstoken syngas	80	0,11	14%
Vervanging stookolie	75-70	0,14	7%
Vervanging aardgas	110 – 170	0,22	7%

Lange termijn perspectief en sectorale reductiedoelen
Naast de overweging van kosteneffectiviteit op de korte termijn (tot 2010) gaan we in deze studie ook kort in op een tweetal vaak gehoorde overwegingen die bij de keuze tussen inzet van biomassa in transport of in de elektriciteitsvoorziening een rol kunnen spelen.

Allereerst bespreken we kort de verwachtingen omtrent technologische ontwikkelingen op de langere termijn. We concluderen daarbij dat het onwaarschijnlijk is dat biobrandstoffen qua kosteneffectiviteit ooit beter zullen scoren dan de toepassing van biomassa in de elektriciteitsproductie. Voor de productie van biobrandstoffen zullen waarschijnlijk altijd extra processtappen nodig zijn, die meer energie en geld zullen vergen dan directe verbranding of vergassing in een elektriciteitscentrale of andere installatie.

Als er desondanks wordt overwogen om biomassa in transport in te zetten zou men er ook voor kunnen kiezen om de verdere ontwikkeling van milieuvriendelijkere en goedkopere omzettingstechnieken nog een aantal jaren af te wachten of te stimuleren. De afstand tussen de routes voor elektriciteitproductie en de routes voor voertuig brandstof productie zal waarschijnlijk worden verkleind met energetische en kostentechnisch optimalere processen als FT-synthese, methanoproductie, het HTU-proces. Mogelijk kan met tri-generatie de kosteneffectiviteit en de energie-efficiency nog verder worden verbeterd.

Een tweede overweging is dat de transportsector net als de andere sectoren ook de uitstoot van CO_2 zou moeten verminderen, en dat biobrandstoffen hier concrete mogelijkheden toe bieden. De resultaten van deze studie laten echter zien dat dit een zeer dure route is, en dat het goed intersectoraal afwegen van klimaatmaatregelen veel ruimte en geld kan opleveren. De opkomst van emissiehandel als belangrijk instrument maakt ‘intersectorale optimalisatie’ van het klimaatbeleid steeds belangrijker omdat emissiehandel de prijs van klimaatbeleid transparant maakt. Het is overigens sterk de vraag of in een vrije ‘emissiemarkt’ biomassa überhaupt in enige omvang zou worden ingezet omdat de kosten van alle bekeken routes hoger zijn dan de verwachte handelsprijs.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Europees Parlement heeft recentelijk een richtlijn aangenomen ter bevordering van het gebruik van biobrandstoffen in transport [EP, 2003]. Hierin worden indicatieve streefcijfers gegeven voor de inzet van biobrandstoffen in de transportsector in de lidstaten van de EU. In 2005 zou 2% van de energie-inhoud van alle transportbrandstoffen door biobrandstoffen moeten worden vervuld, en in 2010 5,75%.

Het staat lidstaten vrij om te bepalen met welk beleid deze richtlijn wordt geïmplementeerd. Mogelijkheden zijn bijvoorbeeld een accijnsreductie op biobrandstoffen (dit wordt mogelijk gemaakt door een tweede richtlijn), het verplichtstellen van bijmenging van biobrandstoffen in reguliere brandstoffen, of de inzet van biobrandstoffen in bedrijfswagenparken, zoals bussen, gemeentelijke wagenparken, etc. Bij de implementatie van de richtlijn mogen overheden onderscheid maken tussen biobrandstoffen op basis van milieueffecten.

Daarnaast mogen lidstaten zelf hun nationale streefcijfers vaststellen. Indien deze cijfers afwijken van de indicatieve streefcijfers moet dit met redenen worden omkleed. Afwijkingen kunnen op de volgende elementen worden gebaseerd [EP, 2003]:

a Objectieve factoren, zoals het beperkte nationale potentieel voor de vervaardiging van biobrandstoffen uit biomassa.
b De hoeveelheid middelen die wordt toegewezen voor de productie van biomassa ten behoeve van andere vormen van energiegebruik dan vervoer en de specifieke technische en klimatologische kenmerken van de nationale markt voor transportbrandstoffen.
c Nationale beleidsmaatregelen betreffende de toewijzing van vergelijkbare middelen voor de productie van andere transportbrandstoffen die gebaseerd zijn op hernieuwbare energiebronnen en die stroken met de doelstellingen van deze richtlijn.

Het is op dit moment nog de vraag welke beleidsinstrumenten de Nederlandse overheid zal inzetten, en of Nederland zal besluiten om de referentiewaarden voor de streefcijfers uit de richtlijn ook als daadwerkelijke streefcijfers aan zal houden. Ook de andere EU-lidstaten hebben hier nog geen besluiten over genomen. Ter ondersteuning van de besluitvorming laat het Ministerie van VROM, in samenwerking met Novem, op dit moment een haalbaarheidsstudie hiernaar uitvoeren door Ecofys. Uitgangspunt bij deze studie zijn de streefcijfers die door in de richtlijn zijn gegeven.

Gezien de hierboven beschreven mogelijkheid die de richtlijn biedt om af te wijken van deze streefcijfers, rijst er nu bij de VNPI de vraag of de biomassa die straks voor biobrandstoffen zal worden geteeld vanuit milieukundig en economisch gezichtspunt wellicht beter als grondstof voor de elektriciteitsproductie kan dienen. Deze vraag komt in de Ecofys studie niet aan de orde. De VNPI heeft CE daarom gevraagd om een (beknopte) studie uit te voeren waarin deze verschillende toepassingen van biomassa onderling worden vergeleken.

1.2 Doel van deze studie

De vraag die in deze studie centraal staat is:

Is de focus op de inzet van biomassa in de transportsector vanuit milieukundig en economisch perspectief de meest gunstige toepassing of zou de biomassa wellicht beter ingezet zou kunnen worden ten behoeve van (bijstook in de) elektriciteitsproductie?

Om deze vraag te beantwoorden zijn twee scenario's kwantitatief uitgewerkt:
- scenario 1: biomassa wordt bijgemengd in transportbrandstoffen;
- scenario 2: biomassa wordt aangewend voor elektriciteitsproductie.

1.3 Afbakening

We richten ons in deze studie met name op de periode tot 2010, al zullen we ook kort ingaan op de verwachte ontwikkelingen na deze periode. De outlook naar de lange termijnverwachtingen is relevant, omdat er op de lange termijn vermoedelijk andere biobrandstoffen een rol gaan spelen dan op de korte termijn. Bovendien zijn er ook bij de elektriciteitsvoorziening ontwikkelingen te verwachten die invloed kunnen hebben op de toepassing van biomassa in deze sector. Deze zijn dan ook besproken in de voorliggende notitie.

Dit onderzoek kon nog niet over de resultaten van de Ecofys studie beschikken omdat het parallel eraan is uitgevoerd. Om bovenstaande vraag te beantwoorden is er daarom vooral gebruik gemaakt van bestaande literatuur (zie literatuurlijst aan het eind van het rapport).

Het betreft hier een studie waarbij we ons beperken tot de volgens ons belangrijkste aspecten van de vergelijking:
- reductie van broeikasgassen;
- kosten;
- benodigd landbouwareaal en
- kosteneffectiviteit (uitgedrukt in Euro per gereduceerde ton CO_2-equivalenten).

Daarnaast spelen nog een groot aantal aspecten een rol bij de implementatie van de biobrandstoffenrichtlijn en een evt. ander gebruik van biomassa. Voorbeelden hiervan zijn overige emissies, energiezelfvoorziening en -voorzieningszekerheid, mogelijkheden voor de Nederlandse landbouw en industrie, technische aspecten van de biobrandstoffen, enz. Op deze aspecten zullen we hier niet of slechts zeer beperkt ingaan.

1.4 Werkwijze

Scenario 1: biomassa in transport
Om te kunnen voldoen aan de Europese richtlijn zijn meerdere mogelijkheden beschikbaar voor de inzet van biomassa in transportbrandstoffen. Voor de invulling van scenario 1 brengen wij een tweetal uitersten in kaart:
Optie 1: Biomassa volledig ingezet als biodiesel
Optie 2: Biomassa volledig ingezet als bio-ethanol

Deze opties zijn in kaart gebracht voor een tweetal soorten biomassa:
- koolzaad, voor de vervaardiging van biodiesel;
- suikerbiet, ten behoeve van de productie van bio-ethanol.

Voor zowel optie 1 als optie 2 hebben wij de effecten over de gehele keten bepaald. Hierin zijn de volgende stappen meegenomen:
- teelt;
- transport;
- omzetting;
- gebruik.

Bij deze ketenanalyse is specifiek aandacht besteed aan de volgende aspecten:
- een beschrijving van de technologie;
- benodigde landoppervlak voor de teelt;
- milieueffecten over de gehele keten;
- over de hele keten zijn broeikasgasemissies bepaald. Hierbij is niet alleen gekeken naar CO_2, maar is ook rekening gehouden met de uitstoot van andere broeikasgassen bij de teelt van biomassa (zoals N_2O);
- meerkosten van de gehele keten;
- eventuele belangrijke overige aspecten.

Scenario 2: biomassa voor elektriciteitsopwekking en warmte
De inzet van biomassa voor elektriciteitsopwekking is door middel van een tweetal routes vergeleken met de inzet voor transport:
- route 1: Landbouwgrond gelijk aan transportroute;
- route 2: Energie gelijk aan transportroute.

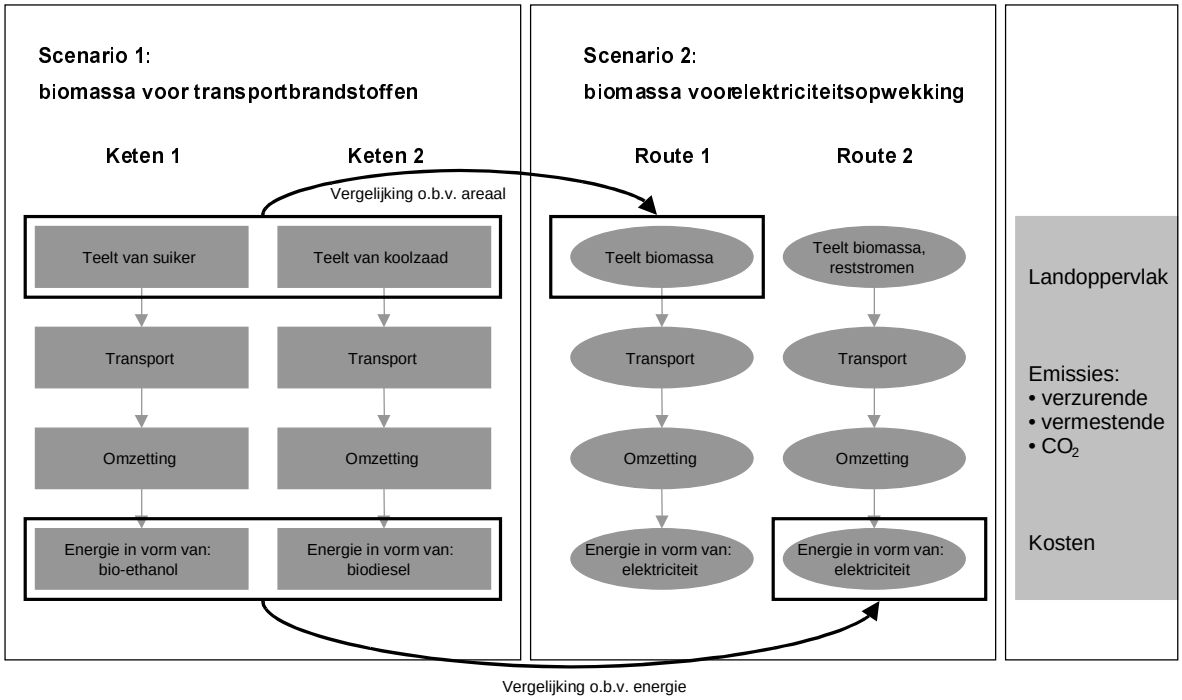
Route 1: Landbouwareaal gelijk aan transportroute
In route 1 is het areaal landbouwgrond dat benodigd is voor de productie van transportbrandstoffen op basis van biomassa als uitgangspunt genomen. Vanuit dit areaal is de keten voor elektriciteitsproductie in kaart gebracht.
In de praktijk zal de biomassa die voor de transportroute wordt ingezet een andere soort biomassa zijn dan voor de elektriciteitsopwekking zal worden geteeld. Deze verschillende soorten biomassa zullen daardoor vaak op andere soorten grond, en zeer waarschijnlijk ook in andere landen worden geteeld, onder meer doordat de teelt van een gewas ook effecten zal hebben op de bodemkwaliteit. Dergelijke effecten worden in dit rapport wel onder de aandacht gebracht, maar gezien de korte doorlooptijd van het project niet nader gekwantificeerd.
Bij de vergelijking tussen de twee toepassingen gaan we daarom weliswaar uit van hetzelfde aantal hectaren grond dat voor de teelt zal worden gebruikt, het is echter niet te verwachten dat beide routes ook van dezelfde grond gebruik zouden maken.

Route 2: Energie gelijk aan transportroute
In route 2 wordt uitgegaan van de hoeveelheid energie die geproduceerd wordt uit de biomassa wanneer deze omgezet wordt in transportbrandstoffen. Deze hoeveelheid dient als uitgangspunt voor de keten in route 2. Bij deze route kan ook van andere grondstoffen gebruik worden gemaakt dan van geteelde biomassa (zoals reststromen uit de voedselproductie).

Uit deze twee scenario's ontstaat inzicht in de consequenties van de inzet van biomassa als transportbrandstof of als energiebron.

De gehanteerde werkwijze is grafisch weergegeven in Figuur 2.

Figuur 2 Werkwijze



2 Biomassa in transport

2.1 Inleiding: twee opties

In dit hoofdstuk geven we een (beknopte) beschrijving van de verwachte gevolgen van de invoering van de biobrandstoffenrichtlijn in Nederland. Uitgangspunt daarbij is dat streefcijfers voor biomassa in de richtlijn inderdaad worden gehaald: in 2005 worden 2% van alle brandstoffen voor transport biobrandstoffen, in 2010 is dit aandeel opgelopen tot 5,75%.

De precieze gevolgen van deze richtlijn zijn sterk afhankelijk van het beleid dat de Nederlandse overheid inzet en van de stappen die de andere Europese landen zetten. Daarnaast zullen de ontwikkelingen op het gebied van biomassa teelt en biobrandstoffen productie een grote rol spelen, vooral met betrekking tot de beschikbaarheid en prijs van de diverse biobrandstoffen. Deze ontwikkelingen zullen uiteraard sterk worden beïnvloed door het beleid dat de verschillende EU-landen implementeren als reactie op de richtlijn.

Hieronder zullen we daarom beschrijven wat we verwachten dat er in de periode tot 2010 zal gebeuren als de biobrandstoffenrichtlijn wordt geïmplementeerd. Waar dat mogelijk is zullen we de effecten kwantificeren, een aantal aspecten kunnen we op dit moment beter kwalitatief bespreken. Aangezien het hier een studie op hoofdlijnen betreft, zullen we de effecten niet in alle detail kunnen beschrijven. Het veel uitgebreidere onderzoek dat Ecofys op dit moment uitvoert naar de implementatie van de biobrandstoffenrichtlijn zal hier uiteraard in veel meer detail aandacht aan geven. We beperken ons hier zoveel mogelijk tot die aspecten, die van belang zijn voor de vergelijking tussen toepassing van biomassa in transport en in de elektriciteitsvoorziening.

Vervolgens gaan we ook in op de periode na 2010: welke ontwikkelingen op het gebied van biobrandstoffen verwachten we op deze langere termijn? Daarbij zullen we ook kort ingaan op de vraag welke rol biobrandstoffen in de ontwikkeling van een duurzame mobiliteit kunnen spelen.

De afgelopen jaren zijn diverse, vaak uitgebreide studies verschenen met beschrijvingen van de ketens voor biobrandstoffen, de kosten, de milieueffecten, beschikbaarheid en potentieel, benodigd landbouwareaal en dergelijke (zie bijv. [RRU, 2003], [PWC, 2000], [Jager, 1998], [IEA, 1996 a en b]). Vaak kijken deze studies naar de huidige situatie, en proberen ze prognoses te maken voor de ontwikkelingen op de lange termijn, tot ca. 2030 - 2050. In deze studie hebben we een synthese gemaakt van de beschikbare literatuur om tot realistische schattingen voor de periode 2005 - 2010 te komen.

Twee mogelijke opties bekeken
In de Milieuverkenningen 5 [RIVM, 2000] berekent het RIVM dat er in Nederland in 2010 ca. 483 PJ aan benzine en diesel zal worden gebruikt (Global Competition Scenario). Recentelijk is deze prognose met ca. 5% verhoogd [RIVM, 2002], voornamelijk ten gevolge een hoger volume van het wegverkeer. Als Nederland daarom de referentiewaarden voor de streefcijfers in 2005 en 2010 uit de EU richtlijn aanhoudt, zal er in 2005 ca. 9 PJ en in 2010 ca. 29 PJ aan benzine en diesel moeten worden vervangen door biobrandstoffen.

Op dit moment is de verwachting dat er met name twee biobrandstoffen zijn die binnen de EU kunnen worden ingezet om bovenstaande aandelen biobrandstoffen te halen: biodiesel uit koolzaad en bio-ethanol en suiker en tarwe. De reden hiervoor is dat de productietechnologieën voor deze brandstoffen zijn ontwikkeld en dat de kosten relatief laag zijn, vergeleken met andere biobrandstoffen. Op de langere termijn zullen er waarschijnlijk ook andere biobrandstoffen op de markt komen die wellicht efficiënter zijn op het gebied van landgebruik, reductie van broeikasgassen, en dergelijke. Dergelijke brandstoffen zijn bijvoorbeeld bio-ethanol uit hout, of biodiesel die geproduceerd wordt d.m.v. het Fischer-Tropsch of het HTU proces. De verwachtingen omtrent deze ontwikkelingen zijn hooggespannen, commerciële introductie van deze brandstoffen op grote schaal wordt echter niet voor 2010 verwacht.

Omdat op voorhand niet goed te voorspellen is in welke verhouding biodiesel en bio-ethanol de komende jaren op de markt zullen worden gebracht, zullen we in deze notitie de gevolgen van twee uitersten beschrijven:

Optie 1: De streefwaarden uit de richtlijn worden volledig met biodiesel ingevuld.

Optie 2: De streefwaarden worden met bio-ethanol uit suikerhoudende gewassen of graanproducten bereikt.

De werkelijkheid zal zich hoogstwaarschijnlijk tussen deze twee uitersten bevinden. De verhouding tussen deze twee zal enerzijds worden bepaald door de vraag naar deze brandstoffen (die zal worden gestuurd door overheidsbeleid) en anderzijds door het aanbod aan grondstoffen en productiefaciliteiten.

Daarnaast is er ook de mogelijkheid om ETBE te produceren uit bio-ethanol, dat kan worden toegevoegd aan benzine om het octaangehalte te verhogen. Deze route hebben we hier echter niet verder uitgewerkt, voornamelijk omdat de gevolgen van deze route vergelijkbaar zijn met die van bio-ethanol.

2.2 Optie 1: Biodiesel

2.2.1 Beschrijving route

Biodiesel kan worden geproduceerd uit gewassen met hoge percentages plantaardige oliën, door allereerst de olie uit de zaden te extraheren, en deze vervolgens te raffineren en te veresteren. In de EU wordt hiervoor voornamelijk koolzaad als grondstof gebruikt. Het resultaat van dit proces is dan koolzaad methyl ester (KME) en het bijproduct glycerine (zie bijv. [de Jager et.al., 1998; IEA, 1996; ECN, 2003]).

Het hoofdproduct heeft eigenschappen die vergelijkbaar zijn met die van diesel, en kan dan ook in elke verhouding bij diesel worden bijgemengd. Als het aandeel bijgemengde biodiesel hoger is dan ca. 20% (de literatuur is hier niet eenduidig over), kan deze brandstof echter niet meer zonder problemen in gebruikelijke dieselmotoren en distributiesystemen (van de oliemaatschappijen) worden toegepast, en is een aanpassing aan de motoren en de tankinfrastructuur vereist.

Als via deze optie de streefcijfers van de richtlijn worden gehaald, is er in 2005 ca. 300 miljoen liter biodiesel nodig, in 2010 ca. 900 miljoen liter. Biodiesel vervangt dan in 2005 ca. 4% van de verkochte diesel, in 2010 is dat percentage opgelopen tot ca. 10%.

2.2.2 Milieueffecten

Indien fossiele brandstoffen worden vervangen door biobrandstoffen, treden er verschillende milieueffecten op. De meest belangrijke zijn de volgende:
- de emissies van broeikasgassen nemen af;
- de overige emissies (zoals NO_x, PM_{10}, VOS, etc.) nemen toe of af;
- de teelt van de biomassa neemt veel (landbouw)ruimte in beslag. Dit heeft (wellicht negatief) effect op de biodiversiteit van een gebied.

Bij de verschillende stappen tijdens het productieproces ('van well to wheel') van beide beschouwde opties treden emissies op, met als belangrijkste de emissies ten gevolge van:
- de teelt van de grondstof (met name de gebruikte kunstmest kan voor aanzienlijke emissies zorgen);
- het transport van de biomassa naar de productiefaciliteit voor de biobrandstof;
- de omzetting van de grondstof naar biobrandstof;
- de distributie van de biobrandstof naar distributiecentra en tankstations;
- de verbranding van de biobrandstof in de auto's.

Ook bij fossiele brandstoffen treden uiteraard emissies op. Het verschil tussen de emissies van de biobrandstoffen met die van de fossiele brandstoffen die worden vervangen is het milieueffect van de biobrandstof route.

In de literatuur is een groot aantal publicaties verschenen waarin dergelijke ketenanalyses zijn uitgevoerd. De uitgangspunten en afbakening van deze studies verschillen vaak aanzienlijk, zodat ook de resultaten behoorlijk kunnen afwijken, en ook niet altijd even vergelijkbaar zijn. Als reactie hierop is er dan ook een aantal synthesestudies gepubliceerd waarin deze literatuur is geëvalueerd en geanalyseerd (zoals [IEA, 1996a en b], [RRU, 2003]). In het volgende hebben we vooral van dergelijke studies gebruik gemaakt.

Voor de teelt en productie van biodiesel is energie nodig. Aangezien dit in de meeste gevallen fossiele energie zal zijn (en er ook bij gebruik van de nog schaarse groene stroom ergens anders meer fossiele energie zal worden gebruikt), is de CO_2-reductie bij gebruik van biodiesel niet gelijk aan de CO_2-uitstoot van de vervangen (fossiele) diesel. In de literatuur worden als schattingen gegeven dat het gebruik van biodiesel een CO_2-reductie van ca. 50% kan bereiken [RIVM, 2002] tot ca. 65% [EEB, 2002].

Daarnaast komt er bij de teelt van de koolzaad N_2O vrij, een ca. 300 malen sterker broeikasgas dan CO_2. De schattingen in de literatuur van dit effect variëren van verwaarloosbaar tot bijna eenzelfde orde als de CO_2-emissies van teelt en productie [RIVM, 2002]. In dat laatste geval, dat ook wordt bevestigd in een recente, zeer uitgebreide studie die voor de Engelse situatie is uitgevoerd, zal biodiesel de uitstoot van broeikasgassen met slechts ca. 30% verminderen ten opzichte van reguliere diesel.

Indien we ervan uitgaan dat de toepassing van biodiesel de emissies van broeikasgassen met ca. 30 - 60% kan reduceren (ten opzichte van fossiele diesel), zal de invulling van de biobrandstoffenrichtlijn met biodiesel leiden tot een reductie van de CO_2-eq. van 0,2 - 0,4 Mton in 2005 en 0,6 - 1,2 Mton in 2010.

2.2.3 Kosten

De kosten van beide opties worden voornamelijk bepaald door de hogere kosten van de biobrandstoffen, in vergelijking met de fossiele brandstoffen. Daarnaast treden er eventuele kosten op omdat de biobrandstoffen in het huidige distributiesysteem van de oliemaatschappijen moeten worden opgenomen. Bij lage percentages biobrandstoffen (tot enkele procenten) zijn er echter geen grote aanpassingen nodig bij de distributie van de brandstoffen of aan de voertuigen. Deze kosten zullen we hier dan ook niet meenemen.

De kosten van biodiesel en bio-ethanol hangen daarom voornamelijk af van de prijs van de benodigde grondstoffen (de biomassa), van de productiekosten en van de eventuele opbrengsten van reststromen. Een deel van de afvalproducten die bij de productie van biodiesel vrijkomen kunnen worden verkocht aan de diervoederindustrie, daarnaast wordt ook glycerine geproduceerd die kan worden verkocht.

De komende jaren zal zowel de teelt van de biomassa, als ook de productiefaciliteiten van de biobrandstoffen, sterk moeten toenemen als gevolg van de biobrandstoffen richtlijn. In zo een dynamische markt is het maar de vraag hoe de prijs van de biobrandstoffen zich gaat ontwikkelen. Eventuele prijsschommelingen zullen echter grotendeels te maken hebben met een gebrek aan evenwicht tussen vraag en aanbod, ze hoeven niet een direct gevolg te zijn van hogere *kosten*.
Het is echter wel te verwachten dat de opbrengst van de reststromen af zal nemen, vanwege het sterk stijgende aanbod.

Hier staat tegenover dat de schaalvergroting, bijvoorbeeld van de productiefaciliteiten, in het algemeen kostenverlagingen met zich meebrengt.

Daarnaast kunnen eventuele wijzigingen in het landbouwbeleid van de EU ook gevolgen hebben voor de prijzen van de biomassa. Op dit moment krijgen boeren subsidie voor braakligging, die ook van toepassing is als er koolzaad wordt geteeld.

Gezien de onzekerheden van deze ontwikkelingen, en het tijdelijke karakter van dit gebrek aan evenwicht in de markt zullen we in dit rapport de huidige kosten van de biobrandstoffen aanhouden. We zullen er in de vergelijking tussen de diverse routes wel rekening mee houden dat deze kosten wellicht dalen.

De kostenschattingen van biodiesel op dit moment zijn ca. 500 Euro per 1.000 liter [EEB, 2002]. De kosten van reguliere diesel en benzine zijn ca. 340 Euro per 1.000 liter (kale kosten, dus zonder accijns en andere heffingen, gemiddeld over de periode 2001 en 2002), zodat de meerkosten op ca. 200-250 Euro per 1.000 liter vervangen diesel uitkomen. Bij deze kostenschatting is de landbouwsubsidie verdisconteerd.

2.2.4 Landgebruik

Een nadeel van biodiesel is dat de opbrengst per hectare vrij laag is. Schattingen hierover lopen uiteen, maar lijken binnen de EU uit te komen op ca. 1-2 ton biodiesel per hectare per jaar, ofwel 40 - 75 GJ/h/a.
Om de streefwaarden uit de richtlijn te halen d.m.v. biodiesel gaan we er daarom vanuit dat in 2005 ca. 120 - 230 duizend hectare nodig is, in 2010 400 - 730 duizend hectare.

2.3 Optie 2: Bio-ethanol

2.3.1 Beschrijving route

Bio-ethanol kan worden geproduceerd uit koolhydraten door middel van fermentatie. Een aantal verschillende grondstoffen is daarvoor geschikt: graan, suikerbieten, reststromen uit de suikerindustrie of aardappelen. Deze grondstoffen worden vervolgens verwerkt tot bio-ethanol, door middel van voorbewerking, vergisting en destillatie.
De eigenschappen van bio-ethanol lijken op die van benzine: bio-ethanol kan dan ook worden bijgemengd. Tot ca. 20% kan bio-ethanol worden bijgemengd zonder aanpassingen aan het distributiesysteem en motoren. Bij hogere percentages zijn toevoegingen aan de brandstof noodzakelijk om de slechtere ontsteking tegen te gaan, en moeten sommige gebruikte materialen in motoren worden vervangen omdat ze niet bestand zijn tegen de ethanol. Daarnaast kunnen er problemen in de motoren optreden door de lagere energiedichtheid van bio-ethanol. De motoren moeten dan worden aangepast, eventueel moeten ook tanks in voertuigen en bij de distributie worden vergroot.

Als via deze route de streefcijfers van de richtlijn worden gehaald, is er in 2005 ca. 430 miljoen liter bio-ethanol nodig, in 2010 ca. 1.400 miljoen liter. Bio-ethanol vervangt dan in 2005 ca. 5% van de verkochte benzine, in 2010 is dat percentage opgelopen tot 14%.

2.3.2 Milieueffecten

Ook bij bio-ethanol uit suikerhoudende gewassen is energie nodig voor de teelt van de grondstoffen, het transport en de productie van de biobrandstof. De energiebehoefte is volgens de meeste publicaties vergelijkbaar met die van biodiesel, de uitstoot van overige broeikasgassen lijkt iets minder te zijn. In de literatuur worden waarden gegeven in de orde van 40 - 60% reductie van broeikasgassen [EEB, 2002] [RRU, 2003].

Als we hiervan uitgaan, zal deze route leiden tot een reductie van de CO_2-eq. van 0,3 - 0,4 Mton in 2005 en 0,8 - 1,2 Mton in 2010.

2.3.3 Kosten

De kosten van bio-ethanol is op dit moment ca. 430 Euro per 1.000 liter [EEB, 2002]. Vanwege de veel lagere energie-inhoud zijn de meerkosten toch hoger dan van biodiesel: ruim 300 Euro per 1.000 liter vervangen benzine.

2.3.4 Landgebruik

De opbrengst per hectare is bij bio-ethanol aanzienlijk hoger dan bij biodiesel. Als suikerbieten worden gebruikt als grondstof, is de opbrengst ca. 5 ton bio-ethanol per hectare per jaar, ofwel 115 - 135 GJ/ha/a (ter vergelijking: bij biodiesel is de opbrengst 40 - 74 GJ/ha/a). Bij productie van bio-ethanol uit granen is de opbrengst lager, ca. 2 ton bio-ethanol/ha/a, ofwel 45 GJ/ha/a. In deze cijfers is de hulpenergie (de energie die nodig is voor de teelt, transport, productie etc.) niet verdisconteerd.

Om de streefwaarden uit de richtlijn te halen d.m.v. bio-ethanol uit suikerhoudende gewassen is daarom in 2005 ca. 70 - 80 duizend hectare nodig, in 2010 220 - 250 duizend hectare. Als er (ook) graan wordt gebruikt als grondstof loopt de behoefte aan landbouwgrond hiervoor op tot 200 duizend ha in 2005 en ca. 650 duizend hectare in 2010.

2.4 Samenvatting Biomassa in transport 2005 - 2010

In Tabel 3 is weergegeven hoe bij de beschouwde twee opties de streefwaarden uit de biobrandstoffenrichtlijn kunnen worden ingevuld:

- Voor hoeveel energie wordt er dan in 2005 en 2010 biobrandstoffen uit biomassa geproduceerd in de vorm van transportbrandstoffen?
- Hoeveel liter biobrandstoffen zijn dat?
- Hoeveel diesel (optie 1) of benzine (optie 2) wordt er vervangen door biobrandstoffen?

Bij deze gegevens zijn we uitgegaan van het GC scenario van de Milieuverkenningen 5 van het RIVM, aangepast aan de nieuwe inzichten uit de geactualiseerde referentieraming.

Deze twee opties laten naar verwachting de uitersten zien van wat er in werkelijkheid zal gaan gebeuren, combinaties van deze twee biobrandstoffen zijn uiteraard ook mogelijk. In welke mate deze biobrandstoffen zullen worden toegepast zal afhankelijk zijn van de prijs, het aanbod en het ingezette beleid in Nederland en andere landen.

Tabel 3 Effecten van implementatie van de richtlijn biobrandstoffen bij invulling door optie 1 of optie 2

Aspect	Optie 1: Biodiesel		Optie 2: Bio-ethanol	
	2005	2010	2005	2010
Hoeveelheid energie uit biobrandstof	9 PJ	29 PJ	9 PJ	29 PJ
Benodigde hoeveelheid [miljoen liter]	300	900	430	1.400
Percentage diesel (optie 1) of benzine (optie 2) dat door de biobrandstof wordt vervangen.	3,6 %	10 %	4,5 %	14 %

Om een overzicht te krijgen over de eerder genoemde effecten van het (gedeeltelijk) vervangen van fossiele brandstoffen door brandstoffen gebaseerd op biomassa is Tabel 4 ingevoegd.

Tabel 4 Overzicht van de effecten van het vervangen van fossiele brandstoffen door (deels) op biomassa gebaseerde brandstoffen, volgens de EU richtlijn.

Aspect	Optie 1: biodiesel Effect t.o.v. diesel		Optie 2: bio-ethanol Effect t.o.v. benzine	
	2005	2010	2005	2010
Reductie broeikasgassen (over de gehele keten, in % van de CO_2-uitstoot van de vervangen benzine of diesel)	30-60%		40-60%	
Reductie broeikasgassen (over de gehele keten, in Mton CO_2 eq.)	0.2 – 0.4	0.6 – 1.2	0.3 – 0.4	0.8 – 1.2
*Meer*kosten [Euro per 1.000 liter vervangen diesel of benzine]	200 - 250[1]	200 - 250	ca. 300	ca. 300
Benodigd landbouwareaal [1.000 hectare]	120 - 230	400 – 730	70 - 80	220 - 250

[1] Bij deze kostenschatting van biodiesel zijn de landbouwsubsidies op koolzaadteelt niet verdisconteerd. De werkelijke kosten zullen daarom hoger zijn.

De kosten zijn vrij sterk afhankelijk van de waarde van bijproducten van het productieproces. Daarnaast is het zeer goed mogelijk dat de prijzen de komende jaren zullen fluctueren ten gevolge van de implementatie van de richtlijn.

Uit de tabel blijkt dat de toepassing van biodiesel als voordeel heeft dat de kosten waarschijnlijk aanzienlijk lager liggen dan bij de toepassing van bio-ethanol, bio-ethanol is op dit moment meer dan twee maal zo duur. Potentieel nadeel is de grote behoefte aan landbouwgrond voor koolzaad. De CO_2-emissiereducties die met deze opties kunnen worden behaald zijn vergelijkbaar.

In Tabel 5 zijn de twee opties vergeleken op basis van een aantal effectiviteitskentallen. Ook hieruit blijkt duidelijk dat het inzet van biodiesel tot een hogere kosteneffectiviteit leidt als we kijken naar CO_2-reductie, maar dat de CO_2-reductie per hectare aanzienlijk minder dan bij de inzet van bio-ethanol. Ook bij de biodieseloptie zijn de kosten per vermeden ton CO_2 groot, met ca. 200 Euro per ton CO_2.

Tabel 5 Overzicht van de (kosten)effectiviteiten van de diverse opties, uitgedrukt in een aantal verschillende kentallen. De getallen zijn gebaseerd op de meest realistische schattingen, bandbreedtes zijn niet aangegeven

	Optie 1: biodiesel	Optie 2: bio-ethanol
Kosteneffectiviteit CO_2-reductie [Euro / ton CO_2-eq]	200 - 250	400 - 500
CO_2 reductie per hectare per jaar [ton CO_2 / ha / a]	ca. 1,3	ca. 4,0

2.5 Mogelijkheden langere termijn

Er wordt op dit moment nog veel onderzoek gedaan naar efficiëntere (in de zin van CO_2-reductie, maar ook wat betreft benodigd landbouwareaal), milieuvriendelijkere en goedkopere biobrandstoffen. Van een aantal wordt veel verwacht, zoals bio-ethanol uit hout als benzinevervanger, en Fischer Tropsch uit hout en HTU-diesel als dieselvervanger (zie bijv. [ADL, 1999], [PWC, 2000], [Boer, 2002], [ECN, 2003]).

Daarnaast worden ook andere mogelijkheden onderzocht om op de lange termijn fossiele brandstoffen in verkeer en vervoer te vervangen. Daarbij kunnen we bijvoorbeeld denken aan de ontwikkelingen op het gebied van brandstofcellen die de verbrandingsmotor wellicht op termijn zullen vervangen. Als deze waterstof duurzaam is geproduceerd (bijvoorbeeld uit zonne- of windenergie, of uit biomassa), kan er een grote CO_2-reductie worden bereikt, en zullen vrijwel geen luchtvervuilende emissies meer door voertuigen worden uitgestoten. Deze technologieën zullen echter naar verwachting pas over enkele decennia tegen concurrerende kosten en op grote schaal worden ingezet.

Zonder in detail op deze ontwikkelingen in te gaan, willen we hier wel kort ingaan op de vraag of de implementatie van de biobrandstoffenrichtlijn een zinvolle stap kan zijn op weg naar duurzame mobiliteit of niet.

Als de verwachtingen omtrent de technologische ontwikkelingen van door goedkopere en milieuvriendelijkere alternatieven inderdaad uitkomen, zullen biodiesel en bio-ethanol uit suikerhoudende gewassen op termijn kunnen worden vervangen door goedkopere en milieuvriendelijkere alternatieven. Investeringen die in de periode 2005 - 2010 worden gedaan in productiefaciliteiten voor biodiesel of -ethanol zullen over een periode van 15 jaar worden afgeschreven. Eerder uitfaseren van deze biobrandstoffen zou daarom tot kapitaalvernietiging leiden.

Bij het grootschalig invoeren van (één van) deze twee gewassen lijkt het daarom zinvol om te kijken of de investeringen die daarvoor worden gedaan, over een periode van minimaal 15 jaar winstgevend zullen zijn. Met andere woorden, een keuze voor (één van) deze brandstoffen nu kan uit financiële en bedrijfseconomische overwegingen betekenen dat deze brandstoffen minimaal over een periode van 15 jaar (tot 2025) moeten worden ingezet.

Een dergelijke keuze heeft het risico in zich dat het de invoering van 'betere' biobrandstoffen tegenhoudt.

3 Biomassa voor elektriciteitsopwekking en warmte

3.1 Inleiding

Naast de inzet in de transportsector kan biomassa toegepast worden voor de opwekking van elektriciteit en warmte. De vraag die in deze studie centraal staat, is welke toepassing vanuit milieukundig en economisch perspectief het meest gunstig is.
In het vorige hoofdstuk zijn de consequenties weergegeven van de eventuele implementatie van de biobrandstoffen richtlijn van de Europese Commissie. Om een vergelijking te kunnen maken met de toepassing van biomassa voor elektriciteitsopwekking zijn twee mogelijke routes onderscheiden:

- Route 1: Landbouwgrond gelijk aan transportroute
  In route 1 is het areaal landbouwgrond dat benodigd is voor de productie van transportbrandstoffen op basis van biomassa als uitgangspunt genomen.
- Route 2: Energie gelijk aan transportroute
  In route 2 wordt uitgegaan van de hoeveelheid energie die geproduceerd wordt uit de biomassa wanneer deze omgezet wordt in transportbrandstoffen: 9 PJ in 2005 en 29 PJ in 2010.
  Bij deze route kan ook van andere grondstoffen gebruik worden gemaakt dan van geteelde biomassa (zoals reststromen uit de voedselproductie).

Voordat deze routes in kaart worden gebracht, wordt aandacht besteed aan de huidige situatie en de daaruit volgende keuzes.
Tot slot wordt aandacht besteed aan de verwachtingen voor de langere termijn.

3.2 Huidig beleid en keuzes

Bij het in kaart brengen van de toepassing van biomassa voor elektriciteitsopwekking is het huidige beleid als uitgangspunten genomen.

Inzet van biomassa in kolencentrales zal in het kader van het Kolenconvenant sterk (moeten) toenemen. In het kader van het Kolenconvenant is tussen overheid en energiebedrijven afgesproken dat in 2010 in totaal 3.600 GWhe uit biomassa zal worden geproduceerd [ECN/KEMA 2002]. Momenteel wordt circa 500 GWhe per jaar geproduceerd, voornamelijk uit reststromen als RWZI-slib, diermeel, papierslib en afvalhout [ECN 2000]. Door ECN en KEMA is de verwachting uitgesproken dat de productie van de extra 3.100 GWhe met name in de vorm van direct meestoken van zuiver (import)hout zal plaatsvinden [ECN/KEMA 2002]. Om de doelstelling te halen is in totaal circa 32 PJ biomassa per jaar of 14% van het brandstofverbruik (qua energie-inhoud) van de 7 kolencentrales en van de Willem-Alexander kolenvergasser nodig.

De inzet van verontreinigde zuivere biomassa en van mengstromen van biomassa reststromen en andere reststromen zou vanwege risico's op storingen in het functioneren van de kolencentrale en vanwege de benodigde hogere investeringen om dit materiaal te kunnen inzetten minder aantrekkelijk

zijn. Ook liggen de marktprijzen voor reststromen momenteel hoger dan de voor importhout verwachte prijzen (zie [ECN 2001], [ECN/KEMA 2001]).

Mogelijkheden voor (extra) productie van elektriciteit en warmte uit biomassa middels stand-alone verbrandingsinstallaties lijken beperkt tot reststromen die minder geschikt zijn voor meestook in kolencentrales. Dergelijke initiatieven zullen qua omvang bescheiden blijven in vergelijking met de extra inzet bij kolencentrales. Zoals uit [ECN/KEMA 2002] blijkt is deze route gewoonweg te duur. In aanmerking komende reststromen zijn met name kippenmest en bermgras. Op dit moment wordt 2,5 - 3 PJ/jaar aan hout verwerkt in drie verbrandingsinstallaties in Cuijk en Lelystad. De initiatieven voor de verwerking van kippenmest in Moerdijk en Apeldoorn zullen daar nog eens 5 PJ aan kippenmest toevoegen.

Voor de nattere, voor kolencentrales minder interessante organische reststromen – zoals GFT - wordt waarschijnlijk ingezet op vergisting. Bermgras is eveneens een interessante 'voeding'. Er is op dit moment maar één initiatief met een bescheiden capaciteit.

Bijstoken van secundaire brandstoffen in met name kolencentrales is in principe ook een optie. Deze optie vergt investeringskosten die vergelijkbaar zijn met of lager zijn dan de investeringen voor indirect meestoken (zie [CE 2000]), terwijl bovendien de internationale marktprijzen vaak negatief zijn (aanbieders betalen voor afzet). Toch zijn secundaire brandstoffen buiten beschouwing gelaten. De markt voor dit soort brandstoffen lijkt in Nederland namelijk maar niet van de grond te willen komen. Kolencentrales in Nederland nemen geen secundaire brandstoffen af ondanks de op zich aantrekkelijke prijs. Waarschijnlijk hangt dit samen met het beperkte gehalte aan organisch materiaal in de secundaire brandstoffen, waardoor substitutie van steenkool door secundaire brandstoffen per PJ minder reductie van broeikasgassen geeft dan de inzet van biomassa en dus minder efficiënt is voor het realiseren van de doelstelling uit het kolenconvenant. Een ander aspect zal de publieke acceptatie zijn. Een energiebedrijf zal niet graag als afvalverwerker worden gezien. Misschien worden daarnaast extra risico's verwacht voor de kwaliteit van poederkoolvliegas en voor corrosie en fouling[2].

Samenvattend, op dit moment wordt circa 7 – 8 PJ jaar aan biomassa ingezet voor de productie van elektriciteit en warmte. In 2010 is dat naar schatting – gezien Kolenconvenant en op stapel staande initiatieven – naar schatting circa 40 PJ.

Zichtjaar

In de studie is enkel voor 2010 een analyse uitgevoerd. Een analyse voor 2005 heeft geen zin, omdat alle activiteiten die plaatsvinden voordat de doelstellingen in het Kolenconvenant zijn gerealiseerd óf voordat de doelstellingen van het Klimaatbeleid zijn gerealiseerd, kunnen worden uitgelegd als een initiatief om deze doelstellingen te realiseren. Gezien de huidige stand van zaken op het gebied van duurzame energie valt niet te verwachten dat deze doelstellingen in 2005 zullen zijn gerealiseerd.

---

[2] Dit zou op zich opmerkelijk zijn omdat momenteel namelijk eveneens 'echte' afvalstromen worden meegestookt (RWZI-slib, sloophout, papierslib, diermeel), vaak met een hoger gehalte aan milieuverontreinigende stoffen dan de op specificatie geproduceerde secundaire brandstoffen uit afval. Het is niet voor niks dat het IPO het Kolenconvenant nog altijd niet heeft ondertekend.

3.3 Biomassa: twee soorten bekeken

Voor het in kaart brengen van de mogelijkheden en consequenties van de inzet van biomassa voor elektriciteitsopwekking is uitgegaan van twee soorten biomassa:
- geïmporteerde organische reststromen;
- voor energieopwekking geteeld hout.

De reststromen vertegenwoordigen de ondergrens qua brandstofkosten, het geteelde hout de bovengrens. De reststromen vertegenwoordigen ook de vuilere brandstoffen uit eigen land.

Aangenomen is dat alle goedkoop beschikbare en relatief vervuilde inheemse biomassa – zoals RWZI-slib, diermeel en bermgras – al in het kader van het Kolenconvenant zijn gecontracteerd. Ook de 'betere', maar nog wel betaalbare inheemse reststromen, zoals stro en resthout, zullen al gecontracteerd zijn in het kader van het Kolenconvenant.

Wat overblijft is gerichte teelt in Nederland of de inzet van geïmporteerde energiegewassen of organische reststoffen. Aangezien sommige energiebedrijven nu al de wereld afstropen op zoek naar goedkoop contracteerbare reststoffen, zoals olijfpittenpulp, is import van reststoffen de meest realistische optie. De genoemde reststroom is als representatieve reststroom gekozen. Voor thermische verwerking zijn immers met name droge reststromen met een laag gehalte aan alkalimetalen en halogenen interessant.

3.4 Selectie van technologieën

In de studie zijn enkel 'meestookroutes' en 'bijstookroutes' in bestaande fornuizen en ketels – inclusief kolencentrales – beschouwd. Reden hiervoor is het realiteitsgehalte en de voor de verschillende technieken berekende onrendabele toppen (zie [ECN/KEMA 2002]). Verbranding van biomassa zoals in Cuyk of Lelystad is aanmerkelijk duurder dan meestoken of bijstoken en daarom naar verwachting een minder waarschijnlijke route. Bijstook van synthesegas in gasturbines is buiten beschouwing gelaten vanwege de in [ECN 2000] aangegeven onzekerheden en beperkingen gerelateerd aan deze mogelijkheid.
Verder zijn, gezien de benodigde investeringen, meestook of bijstook aantrekkelijker wanneer:
- grote hoeveelheden biomassa kunnen worden ingezet (schaalvoordeel);
- wanneer de installatie waarin wordt meegestookt of bijgestookt een grote beschikbaarheid heeft.

Met name kolencentrales en grote fornuizen in raffinage sector en chemie zijn in dit opzicht interessant. Op basis van deze redenatie zijn de volgende technologieën geselecteerd:
- kolencentrales;
  Mogelijkheden hierbij zijn 'indirecte meestook' (apart malen en invoeren biomassa) en het bijstoken van syngas;
- oliegestookte fornuizen en ketels;
- gasgestookte fornuizen en ketels raffinage sector en chemie;
  Hierbij is het bijstoken van syngas mogelijk.

Het potentieel aan biomassa dat naar schatting kan worden meegestookt of bijgestookt is in Tabel 6 gegeven.

Tabel 6 Overzicht naar verwachting vervangbare hoeveelheden brandstoffen

Technologie voor bij- of meestoken van biomassa	Inzetbaar aan biomassa of afgeleide brandstoffen (PJ/jaar)
Kolengestookte eenheden	Minimaal 20, maximaal tot 190?
Oliegestookte fornuizen en ketels	± 20
Gasgestookte eenheden	
- raffinaderijen	± 10
- chemie en andere sectoren	> 22?
Totaal	*>242?*

Toelichting bij deze tabel wordt gegeven in paragraaf 3.6 tot 3.8. Er is in ieder geval meer dan voldoende capaciteit beschikbaar om een vergelijking tussen inzet van biomassa voor de productie van biofuels en de inzet van biomassa voor de productie van elektriciteit en warmte zinnig te maken.

Bijstook van pyrolyse-olie is buiten beschouwing gelaten. Het is in principe een economisch interessante optie – gezien de door BTG geclaimde productiekosten van circa 4 Euro/GJ olie [BTG]. Ook de hoge energie-dichtheid van de olie is een duidelijk voordeel. Echter, BTG is op dit moment nog financieerders aan het zoeken voor de bouw van een 2 ton/uur demonstratie installatie. Tegen de tijd dat de financiering rond is en de installatie gebouwd, is het naar verwachting 2005/2006. Gezien de daarop nog noodzakelijke opstartfase en leerfase - het is immers een demonstratie-installatie - is de technologie naar verwachting niet op tijd uitontwikkeld om in de periode tot aan 2010 een belangrijke bijdrage te kunnen leveren aan de inzet van extra biomassa voor de productie van elektriciteit en warmte. Vergassing is dat – gezien het project bij de centrale Amer 9 – wel.

Ook stoomzijdige integratie bij kolencentrales is buiten beschouwing gelaten. Het is op zich een economisch erg aantrekkelijke route, waarmee ook tegen lage kosten vervuilde reststromen verwerkt kunnen worden. Aan de andere kant is de mate waarin stoom kan worden geleverd aan het stoomsysteem van de kolencentrale beperkt omdat - ten opzichte van gangbare bedrijfsvoering - er weinig extra vermogen door de oververhitters kan worden geleverd. Aangenomen is dat vanwege de lage kosten de capaciteit al benut is in het kader van het Kolenconvenant.

In onderstaande paragrafen worden de geselecteerde routes verder uitgewerkt. Daarbij wordt ook een deel van de onderbouwing gegeven van de in deze subparagraaf gemaakte keuzen en gepresenteerde informatie.

3.5 De ‘precombustion fase’; teelt, transport en voorbewerking

3.5.1 Olijvenpulp

De olijvenpulp staat als gezegd in deze studie model voor goedkope reststromen uit de buitenlandse voeding- en genotsmiddelenindustrie. De pulp komt vrij in het oogstseizoen en wordt dan ‘en masse’ per schip vanuit het Middellandse zee gebied naar Nederland getransporteerd. Gemiddeld genomen is de transportafstand circa 2.500 km. Het transport met een bulkcarrier type OB3 geeft een emissie van 0,6 kg CO_2/GJ en kost – inclusief 2 maal overslag – € 2,4 per GJ [NOVEM/KEMA, 2003]. Aangenomen is dat de

leveranciers van de pulp het kapitalisme niet al te zeer omarmen en dat de pulp daarom min of meer gratis beschikbaar is. Transport in Nederland is verwaarloosd. De meeste potentiële afnemers (zie volgende paragrafen) zijn aan havens gelokaliseerd.

De vraag wordt wel eens gesteld in het publieke debat in hoeverre het duurzaam genoemd kan worden om afval over vele duizenden kilometers aan te slepen en waarom inzet als energiedrager ter plekke niet wordt gestimuleerd. De andere kant van de zaak is dat reststromen uit de voeding- en genotmiddelenindustrie zeker buiten de E.U. tot nu toe nogal eens worden gestort en gedumpt met alle methaanemissies van dien. Daar komt bij dat in sommige landen meer reststoffen zijn dan er voor energieproductie nodig zou zijn. Cuba bijvoorbeeld produceert zoveel suikerriet dat het land op basis van bagasse 3 maal de eigen elektriciteitsbehoefte zou kunnen dekken. Samenvattend zou kunnen worden gesteld dat inzetten van reststromen uit de buitenlandse voeding- en genotsmiddelenindustrie misschien niet de schoonheidsprijs verdient maar in ieder geval tot nu toe vaak wel enige maatschappelijke meerwaarde heeft.

3.5.2 Geteeld hout

Waar en wat?
Geteeld hout is representatief verondersteld voor gewassen uit energieteelt. Miscanthus en andere grasachtige gewassen zou een andere optie zijn, maar deze gewassen zijn minder geschikt vanwege het hoge gehalte aan assen, alkalimetalen en chloor.

Voor de aan houtteelt gerelateerde milieubelasting is uitgegaan van praktijkcijfers voor de Zweedse grootschalige teeltproeven met kort rotatie populieren. Dit is één van de twee routes om hout voor energiedoeleinden te genereren. De andere route is het verzamelen van resthout uit productiebossen voor papierindustrie en bouwindustrie en/of extra kap in dit soort productiebossen met het oog op de productie van hout voor energieopwekking. Resthout wordt in de Baltische staten en Rusland deels achtergelaten na kap [BTG/KEMA 1996].

De route over korte rotatie gewassen is gekozen om een schatting te kunnen maken van de maximale belasting aan broeikasgassen bij teelt. Zweden is daarbij een redelijke referentielocatie vanwege de plaatselijke overvloed aan ruimte.

Beschrijving route en bepaling bijdragen aan broeikaseffect
In het Zweedse proefproject worden populieren na 2 jaar teelt geoogst en gesnipperd, waarna de chips passief worden gedroogd van een oorspronkelijk vochtgehalte van 50% tot een vochtgehalte van circa 25%. Tijdens de teelt wordt naar verluidt de volgende vracht aan meststoffen gebruikt:
- 70 kg N /ha per jaar;
- 10 kg P /ha;
- 35 kg K /ha.

Ook al betreft het kunstmest, de toegevoegde hoeveelheid stikstof valt ruim binnen de in het E.U. mestbeleid gehanteerde norm van maximaal 140 kg N/ha/jaar. Gebruik van bestrijdingsmiddelen is niet bekend.

De opbrengst aan hout bedraagt circa 15 ton/ha/jaar bij een vochtgehalte van 50% of 10 ton/ha/jaar aan chips met een vochtgehalte van 25%

[SAC 2001],[Woody 1996], [RRU, 2003]. De chips zullen bij export naar Nederland met een bulkcarrier worden afgevoerd, Ook hier geldt weer dat de meeste afnemers aan havens zijn gelokaliseerd.

Op basis van een aantal aanvullende bronnen is de in onderstaande tabel gegeven schatting van de totale emissie aan broeikasgassen geschat.

Tabel 7 Broeikasgasemissies bij teelt kort rotatie hout (deels [RRU, 2003])

Bron	Broeikasgasemissies (kg CO_2-equivalenten)
- emissies door oogstmachines e.d.	31
- productie kunstmest	12
- emissies lachgas uit kunstmest	141
- transport per schip	1
	185

De emissies uit (kunst)mest zijn berekend uitgaande van de omzetting van 1% van de opgebrachte stikstof in meststoffen als N_2O. Deze aanname is conform de IPPC berekeningsmethodiek en heeft betrekking op minerale grond. Gegeven de stookwaarde van circa 13 MJ/kg chips is de equivalente CO_2-emissie per eenheid energie circa 14,3 kg/GJ.

Opbrengsten bij vergelijkbare oppervlakten
In Tabel 8 is weergegeven welke hoeveelheden hout (in ton/jaar en PJ/jaar) kunnen worden geproduceerd op basis van de oppervlakten die nodig zijn voor de verbouw van de suikerbieten (bio-ethanol) of koolzaad (biodiesel) ten behoeve van de realisatie van de doelstellingen in de biobrandstoffenrichtlijn.

Tabel 8 Jaarproducties bij gelijke beschikbare oppervlakken

	Benodigd oppervlak (in ha)	Productie ton chips per jaar	Energie-inhoud (PJ/jaar)
- bioethanol minimaal	220.000	2.200.000	28.303.904
- bioethanol maximaal	250.000	2.500.000	32.163.528
- biodiesel minimaal	400.000	4.000.000	51.461.645
- biodiesel maximaal	730.000	7.300.000	93.917.501

3.6 Energie uit kolencentrales

3.6.1 Beschrijving route

Voor kolencentrales zijn zowel indirect meestoken als bijstoken beschouwd.

Onder indirect meestoken wordt verstaan het apart malen en inbrengen van de biomassa. Dit in tegenstelling tot het mee laten lopen van de biomassa in de koleninvoer. De chips zullen daarbij overigens wel moeten worden gedroogd van een vochtgehalte van 25% bij aanvoer tot een vochtgehalte van 10% om voldoende hard te zijn om te kunnen worden gemalen. Indirect meestoken van hout is gedemonstreerd bij onder andere de Gelderland 13

centrale. Aangenomen is dat een reststroom als olijfpitten ook hard genoeg is om te kunnen worden verpoederd.

Wat betreft bijstoken van syngas kan voor de in deze studie beschouwde schone biomassa stromen waarschijnlijk worden volstaan met het bijstoken van heet, ongereinigd synthesegas, zoals ook gebeurt in Lahti, Finland. Toch is – mede om de mogelijke bandbreedte aan kosten te kunnen aangeven – uitgegaan van bijstoken van gereinigd syngas, zoals plaatsvindt bij de Amer 9 centrale (zie [KEMA, 1996A]).

Bijstoken van gereinigd syngas lijkt technisch gezien zekerder dan indirect meestoken. De Nederlandse kolencentrales zijn 'dual fuel' ontworpen, kunnen ook volledig op aardgas draaien. Er zijn gegarandeerd geen problemen met de afzetmogelijkheden van de poederkoolvliegas. Bijstoken geeft gegarandeerd lagere emissies en is daardoor voor verwerking van vervuilde stromen een veel logischer optie, terwijl het ook een optie is waarmee maatregelen in het kader van bijvoorbeeld NEC-beleid kunnen worden uitgespaard. Het biedt zelfs de mogelijkheid tot extra NO_x-redxctie middels reburning, een techniek waarmee in de praktijk tot 50% - 60% NO_x-reductie wordt gerealiseerd. Bovendien neemt het elke technische onzekerheid weg rond de eventuele substitutie van de niet vervangen steenkool door aardgas bij wijze van maatregel tot reductie van CO_2 van fossiele oorsprong. Het is overigens – gezien de verwachte kosten van biomassa en de kosten van aardgas en alle extra investeringen die nodig zijn om substantiële percentages biomassa in te kunnen zetten – de vraag waarom niet sowieso wordt overgeschakeld op volledig aardgas stoken.

Potentieel
Gezien ervaringen in het buitenland is het technisch mogelijk om qua energie-inhoud tenminste 25% [IEA Coal] en mogelijk zelfs 40% of meer van de steenkool te vervangen door in aparte molens verkleinde biomassa. In het kader van het Kolenconvenant zal 14,9% van de steenkool worden vervangen. Er is dus in principe nog een zekere ruimte voor het meestoken van biomassa van tenminste 20 PJ per jaar.

Bij bijstoken van schoon syngas zal het potentieel aan inzetbare biomassa groter zijn dan 20 PJ. Mogelijk kan uiteindelijk de gehele installatie op syngas draaien.

3.6.2 Milieueffecten

CO_2-effect
De per GJ biomassa uitgespaarde CO_2-emissies zijn in onderstaande tabel gegeven. Conform [RIVM] is uitgegaan van een emissiefactor voor steenkool van 94 kg/GJ.

Tabel 9 Bruto en netto uitgespaarde CO_2-emissies per GJ biomassa

	Indirect meestoken		Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Vervangingsratio (PJ fossiel : PJ biomassa)	92,1%	95,2%	90,2%	90,4%
Uitgespaard (kg CO_2/GJ biomassa)				
- bruto	86,6	89,5	84,7	84,9
- netto (inclusief precombustion emissies)	72,3	88,9	70,4	84,4

De gehanteerde aannames staan in onderstaande tabel. Voor het drogen van chips tot een vochtgehalte van 10% benodigde warmte is omgerekend naar elektriciteit. Aangenomen is dat aftapstoom kan worden gebruikt[3].

Tabel 10 Voor schatting specifieke CO_2-reductie gehanteerde uitgangspunten ([KEMA 1996A], [ECN 2000], [ECN/KEMA 2002])

	Indirect meestoken		Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Rendementen bij verbranding				
a) biomassa	40%	40%	36%	36%
b) steenkool	40%	40%	40%	40%
Operationele parameters				
- eigen verbruik (GJ/ton)	0,45	0,36	0,0324	0,0324
- uitgespaard steenkool verbruik (GJ/GJ steenkool)	0,004	0,004	0,004	0,004
- stookwaarde biomassa (GJ/ton)	12,87	18,8	12,86541	18,8

In Tabel 11 is aangegeven welke jaarvrachten door indirecte meestook en bijstook van hout en reststromen in kolencentrales kan worden uitgespaard, uitgaande van dezelfde landbouwarealen of ingezette hoeveelheden PJ aan biomassa als bij biofuel productie.

Tabel 11 Jaarlijks uitgespaarde CO_2-emissies bij gelijke basis voor vergelijking met biofuels (kton/jaar)

	Indirect meestoken		Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Vergelijking op PJ-basis (29 PJ/jaar)	2.275	2.709	2.265	2.708
Vergelijking op basis van landbouwoppervlak				
- bioethanol minimaal (220.000 ha)	2.046	2.517	1.993	2.388
- bioethanol maximaal (250.000 ha)	2.325	2.860	2.265	2.714
- biodiesel minimaal (400.000 ha)	3.720	4.577	3.624	4.342
- biodiesel maximaal (730.000 ha)	6.789	8.352	6.615	7.924

[3] Voor het drogen van chips tot een vochtgehalte van 10% is uitgegaan van drogen met aftapstoom. Het specifieke stoomverbruik is conform [KEMA, 1996b] gesteld op 3,6 MJ/kg H_2O. Op basis van [KEMA, 1996b] is aangenomen dat voor de aftapstoom een bijstookfactor van 0,4 GJ brandstof per GJ stoom kan worden gerekend. Aangezien de brandstof met een rendement van 40% wordt omgezet in elektriciteit is de bijstookfactor uitgedrukt in elektriciteit 0,16 GJ/ton verwijderd water.

Overige emissies
Inzet van de in deze studie beschouwde biomassa stromen zal een daling geven van de emissies van vrijwel alle milieuverontreinigende stoffen, die de kolencentrale uitkomen. De beide stromen bevatten per GJ minder zwavel en stikstof dan de vervangen steenkool. Inzet van gezuiverd syngas geeft helemaal een verlaging van de emissies naar lucht.

3.6.3 Kosten

Bij het berekenen van de kosten is uitgegaan van de in onderstaande tabel gegeven kentallen.

Tabel 12 Uitgangspunten kostenschattingen (zie [ECN, 2000], [ECN/KEMA, 2002])

	Indirect meestoken		Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Economische uitgangspunten				
- Bbeschikbaarheid (uur per jaar)	7000	7000	7000	7000
- Investering (Meuro)	13,6	13,6	40,8	40,8
Bij capaciteit van (MWinput)	42,5	42,5	83	83
- B & O	4%	4%	4%	4%
- Schaalfactor	0,6	0,6	0,7	0,7
Kosten steenkool (Euro/GJ)	1,6	1,6	1,6	1,6
Kosten biomassa (Euro/GJ)	4,25	2,4	4,25	2,4

Aangenomen is dat de maximale schaalgrootte van verpoeder-installaties en vergassers niet veel afwijkt van de Tabel 12 gegeven vermogens[4]. Om die reden zijn de schattingen op bovengegeven vermogens gebaseerd. Subsidies in het kader van EIA-regeling en VAMIL zijn (nog) niet verdisconteerd. De beschikbaarheid heeft betrekking op uren vollast equivalenten qua elektriciteitproductie. De werkelijke beschikbaarheid van de installatie zal in verband met de langdurige opstart van een kolencentrale eerder 8.000 uur of meer per jaar bedragen.

Tabel 13 Overzicht meerkosten

	Indirect meestoken		Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Kosten (M€/jaar)				
- Jaarlijkse installatiekosten	1,9	1,9	5,7	5,7
- Brandstofkosten	4,6	2,6	8,9	5,0
- Uitgespaarde steenkool inkoop	-1,6	-1,6	-3,0	-3,0
Netto	**4,9**	**2,8**	**11,6**	**7,7**
Inzet biomassa (PJ/jaar)	1,1	1,1	2,1	2,1
Specifieke meerkosten (€/GJ)	**4,5**	**2,6**	**5,5**	**3,7**

[4] Voor zover bekend is de vergasser bij Amer-9 één van de allergrootste wervelbed vergassers voor biomassa ter wereld. Er staan voor zover bekend geen grootschaligere installaties gepland.

In Tabel 14 is aangegeven wat de jaarlijkse meerkosten zijn, uitgaande van dezelfde landbouwarealen of ingezette hoeveelheden PJ aan biomassa als bij biofuel productie.

Tabel 14 Jaarlijkse meerkosten (M€) bij gelijke basis voor vergelijking met biofuels

	Indirect meestoken		Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Vergelijking op PJ-basis (29 PJ/jaar)	132	76	160	107
Vergelijking op basis van landbouwoppervlak				
- bioethanol minimaal (220.000 ha)	129	75	157	104
- bioethanol maximaal (250.000 ha)	146	85	178	118
- biodiesel minimaal (400.000 ha)	234	136	285	189
- biodiesel maximaal (730.000 ha)	427	248	519	345

Tabel 15 tenslotte geeft de specifieke reductiekosten van deze routes. Daaruit blijkt dat de installatiekosten aanmerkelijk minder doorwegen dan de brandstofkosten.

Tabel 15 Overzicht specifieke reductiekosten

	Indirect meestoken		Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Specifieke reductiekosten (€/ton CO_2)	62,9	29,4	78,5	43,6

Eigenlijk zouden voor een eerlijke vergelijking nog kosten voor de reductie van NO_x-emissies en SO_2-emissies moeten worden verrekend. Bij inzet van steenkool wordt momenteel circa 1,3 kg NO_x en 0,7 kg SO_2 per ton CO_2 geëmitteerd. Bij inzet van schone biomassa of daaruit geproduceerd gas wordt vrijwel geen SO_2 geëmitteerd, terwijl de NO_x-emissie ten opzichte van steenkool inzet worden gereduceerd met 75%. Gezien de referentiekosten voor de reductie van beide emissies (€ 2,3/kg SO_2 en € 4,6/kg NO_x) mag er € 6/ton CO_2 in korting worden gebracht.

3.7 Raffinaderijen, vervanging van stookolie

3.7.1 Beschrijving route

Routes en potentieel

Wat betreft bijstoken bij andere typen fornuizen kan worden opgemerkt dat met name de raffinage sector zeer geschikt is voor bijstook. De nu nog bestaande (deels) oliegestookte fornuizen worden in de periode tot aan 2010 bij Shell Pernis sowieso en bij de andere drie relevante raffinaderijen zeer waarschijnlijk omgebouwd vanwege kostenvoordelen bij de inzet aardgas en ook vanwege de druk vanuit de overheid om emissies van SO_2, NO_x en stof te reduceren. Die ombouw is een mooie gelegenheid voor inpassing van de bijstook van syngas. Het potentieel voor bijstook in nu nog (deels) oliege-

stookte fornuizen bedraagt naar schatting 20 PJ (zie [RIVM 2001]) Dit is de totale hoeveelheid ingezette stookolie. In principe is 100% vervanging van de stookolie mogelijk door de omgebouwde fornuizen (voor zover dat nog niet het geval is) aan te sluiten op het raffinaderijgas netwerk van de raffinaderij, waarin syngas uit biomassa wordt ingevoerd.

In de raffinagesector wordt ook jaarlijks circa 10 PJ/jaar aan aardgas ingezet in ketels. Ook deze hoeveelheid is in principe voor 100% vervangbaar door met name synthesegas uit biomassa wanneer de ketels worden aangesloten (voor zover dit nog niet het geval is) op het raffinaderijgas netwerk.

Het in het raffinaderijgas netwerk te injecteren syngas zal in verband met het ontwerp en de benodigde hoge beschikbaarheid van het procesapparatuur vooraf gereinigd moeten zijn.

3.7.2 Milieueffecten

CO_2-effect
De per GJ biomassa uitgespaarde CO_2-emissies zijn in Tabel 16 gegeven. Conform [RIVM] is uitgegaan van een emissiefactor voor stookolie van 77 kg/GJ. Voor elektriciteit is uitgegaan van een emissiefactor van 174 kg/GJ

Tabel 16 Bruto en netto uitgespaarde CO_2-emissies per GJ biomassa

	Vergassen	
	Geteeld hout	Olijfpitten
Vervangingsratio (GJ olie : GJ biomassa)	81,2%	81,2%
Extra opbrengst aan elektriciteit (Gjelektriciteit/GJ biomassa	4%	4%
Uitgespaard (kg CO_2/GJ biomassa)		
- bruto	69,5	69,5
- netto (inclusief precombustion emissies)	55,1	68,9

De gehanteerde aannames staan in Tabel 17.

Tabel 17 Voor schatting specifieke CO_2-reductie gehanteerde uitgangspunten ([KEMA 1996A], [ECN 2000], [ECN/KEMA 2002], [ECN/RUU 1995])

	Geteeld hout	Olijfpitten
Rendementen		
- rendement bij verbranding		
a) syngas in fornuis	92,00%	92,00%
b) stookolie	85%	85%
- rendementen vergasser		
a) biomassa naar syngas	75%	75%
b) biomassa naar elektriciteit	4%	4%

Er is verder rekening gehouden met de productie van elektriciteit op basis van de voelbare warmte van de ongereinigde synthesegassen. Aangenomen is dat de voelbare warmte kan worden gebruikt voor het opwekken van stoom van 40 bar, 400°C, die vervolgens in een condenserende stoomturbine wordt ingezet voor het opwekken van elektriciteit. Uitgaande van de verwerkte biomassa bedraagt het netto elektrisch rendement circa 4%.

In Tabel 11 is aangegeven welke jaarvrachten door bijstook van synthesegas uit hout en reststromen maximaal kan worden uitgespaard. Een vergelijking met de productie van biofuels is niet mogelijk omdat de vervangbare hoeveelheid stookolie kleiner is dan de bij de oliegestookte fornuizen in de raffinage sector inzetbare hoeveelheid biomassa.

Tabel 18 Maximaal uitgespaarde jaarlijkse CO_2 -emissies (kton/jaar).

	Geteeld hout	Olijfpitten
Uitgespaarde jaarvracht (kton/jaar)	1.120	1.395

Overige emissies
Inzet van de in deze studie beschouwde biomassa stromen zal een daling geven van de emissies van vrijwel alle milieuverontreinigende stoffen, die de kolencentrale uitkomen. De beide stromen bevatten per GJ minder zwavel en stikstof dan de vervangen stookolie. Voor de stookolie wordt door RIVM gerekend met een emissiefactor van 92 g/GJ aan NO_x. Inzet van stookolie geeft verder een emissie van 14 kton/jaar aan SO_2. Bij inzet van gereinigd syngas wordt de NO_x-emissie waarschijnlijk 30 g/GJ, terwijl de SO_2-emissie 7 g/GJ wordt. Circa 1,3 kton NO_x en 14 kton SO_2.

3.7.3 Kosten

Bij het berekenen van de kosten is uitgegaan van de in onderstaande tabel gegeven kentallen.

Tabel 19 Uitgangspunten kostenschattingen (zie ook [ECN, 2000], [ECN/KEMA, 2002])

	Geteeld hout	Olijfpitten
Economische uitganspunten		
- Beschikbaarheid (uur per jaar)	8000	8000
- Investering (Meuro)	40,8	40,8
Bij capaciteit van (MWinput)	83	83
- B & O	4%	4%
- Schaalfactor	0,7	0,7
Kosten olie (Euro/GJ)	3,0	3,0
Kosten biomassa (Euro/GJ)	4,25	2,4
Inkoopprijs elektriciteit (Euro/GJ)	12,0	12,0

Aangenomen is dat de maximale schaalgrootte van vergassers niet veel afwijkt van de Tabel 12 gegeven vermogens, zie ook vorige paragraaf. Subsidies in het kader van EIA-regeling en VAMIL zijn (nog) niet verdisconteerd. De resulterende meerkosten per installatie zijn in onderstaande tabel gegeven. Aangenomen is dat de extra geproduceerde elektriciteit de inkoop door de raffinaderij uit het net uitspaart. Daarom is gerekend met een marktconforme prijs voor grootverbruikers waarin verschillen in normaal tarief en daltarief zijn verdisconteerd. De aangehouden beschikbaarheid is hoger dan bij kolencentrales. Raffinage is een bij voorkeur continu proces met maximale

benutting van de capaciteit van de installaties. Dit is verdisconteerd in de aangehouden beschikbaarheid.

Tabel 20 Overzicht meerkosten per installatie

	Geteeld hout	Olijfpitten
Kosten (M€/jaar)		
- jaarlijkse installatiekosten	5,7	5,7
- brandstofkosten	10,2	5,7
- uitgespaarde brandstofkosten	-5,8	-5,8
- uitgespaarde inkoop elektriciteit	-1,2	-1,2
Netto	**10,0**	**5,6**
Inzet biomassa per installatie (PJ/jaar)	2,4	2,4
Specifieke meerkosten	**4,2**	**2,3**

In Tabel 21 is aangegeven wat de jaarlijkse meerkosten zijn, uitgaande van maximale vervanging van stookolie door syngas (20 PJ/jaar).

Tabel 21 Jaarlijkse meerkosten (M€) bij maximale inzet van stookolie door syngas (M Euro/jaar)

	Geteeld hout	Olijfpitten
Jaarkosten (M Euro/jaar)	84	47

Tabel 22 tenslotte geeft de specifieke reductiekosten van deze routes.

Tabel 22 Overzicht specifieke reductiekosten

	Geteeld hout	Olijfpitten
Specifieke reductiekosten (€/ton CO_2)	76	34

3.8 Overige stookinstallaties, vervanging van aardgas

3.8.1 Beschrijving route

Routes en potentieel

In de chemische industrie zijn bij een beperkt aantal bedrijven aardgasgestookte fornuizen en ketels met een groot vermogen opgesteld. Het aantal grote aardgasgestookte ketels zal inmiddels beperkt zijn qua aantal en potentieel omdat de meeste ketels in de loop der tijd vervangen zijn door W/K-installaties, al dan niet in eigen beheer geëxploiteerd. Voorbeelden van fornuizen zijn de sinterovens van Thermphos en Nedmag en de fornuizen van de reformers bij ammoniakproducenten en Methanor. Het potentieel bij deze specifieke bronnen is al circa 45 PJ/jaar (zie [ICARUS]). Aangenomen is dat in ieder geval 50% (zie [ECN 2000]) van het ingezette aardgas kan worden vervangen door gereinigd synthesegas. In verband met het ketelontwerp zal alleen gereinigd syngas kunnen worden ingezet.

3.8.2 Milieueffecten

CO_2-effect

De per GJ biomassa uitgespaarde CO_2-emissies zijn in Tabel 23 gegeven. Conform [RIVM 2001] is uitgegaan van een emissiefactor voor stookolie van 56 kg/GJ. Voor elektriciteit is weer uitgegaan van een emissiefactor van 174 kg/GJ.

Tabel 23 Bruto en netto uitgespaarde CO_2-emissies per GJ biomassa

	Kleine installaties		Grote installaties	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Vervangingsratio (GJ aardgas/GJ biomassa)	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%
Extra opbrengst aan elektriciteit (Gjelektriciteit/GJ biomassa	4%	4%	4%	4%
Uitgespaard (kg CO_2/GJ biomassa)				
- bruto	48,2	48,2	48,2	48,2
- netto (inclusief precombustion emissies)	33,9	47,6	33,9	47,6

De gehanteerde aannames staan in Tabel 24.

Tabel 24 Voor schatting specifieke CO_2-reductie gehanteerde uitgangspunten

	Kleine installaties		Grote installaties	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Vermogen installatie (MW input)	10	10	83	83
Rendementen				
- rendement bij verbranding				
a) syngas in fornuis	92,00%	92,00%	92,00%	92,00%
b) aardgas	92%	92%	92%	92%
- rendementen vergasser				
a) biomassa naar syngas	75%	75%	75%	75%
b) biomassa naar elektriciteit	4%	4%	4%	4%

Er is verder rekening gehouden met de productie van elektriciteit op basis van de voelbare warmte van de ongereinigde synthesegassen. Aangenomen is dat de voelbare warmte kan worden gebruikt voor het opwekken van stoom van 40 bar, 400°C, die vervolgens in een condenserende stoomturbine wordt ingezet voor het opwekken van elektriciteit. Uitgaande van de verwerkte biomassa bedraagt het netto elektrisch rendement circa 4%.

In Tabel 11 is weer aangegeven welke jaarvrachten door bijstook van synthesegas uit hout en reststromen maximaal per installatie kan worden uitgespaard. Er is geen vergelijking met de productie van biofuels uitgevoerd omdat de maximaal vervangbare hoeveelheid aardgas voorzichtigheidshalve is geschat op 20 PJ/jaar.

Tabel 25 Maximaal uitgespaarde jaarlijkse CO_2-emissies (kton/jaar/installatie)

	Kleine installaties		Grote installaties	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
	10	14	83	116

Overige emissies
Inzet van synthesegas als vervanging van aardgas heeft geen significant positieve invloed op de emissies van andere milieuverontreinigende stoffen. De emissies van stof en SO_2 zal – beperkt – toenemen vanwege de aanwezigheid van stof en zware metalen in het syngas, ook na reiniging. Deze verontreinigingen ontbreken volledig in aardgas. De emissie van NO_x zal vergelijkbaar blijven of iets afnemen.

3.8.3 Kosten

Bij het berekenen van de kosten is uitgegaan van de in Tabel 26 gegeven kentallen.

Tabel 26 Uitgangspunten kostenschattingen

	Kleine installaties		Grote installaties	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Economische uitgangspunten				
- beschikbaarheid (uur per jaar)	8000	8000	8000	8000
- investering (Meuro)	9,3	9,3	40,8	40,8
bij capaciteit van (MWinput)	10	10	83	83
- B & O	4%	4%	4%	4%
- schaalfactor	0,6	0,6	0,7	0,7
Kosten aardgas (Euro/GJ)	4,0	4,0	4,0	4,0
Kosten biomassa (Euro/GJ)	4,25	2,4	4,25	2,4
Inkoopprijs elektriciteit (Euro/GJ)	12,0	12,0	12,0	12,0

De aardgasprijs is op € 4/GJ geschat. Grootverbruikers betalen vanaf € 3/GJ tot € 4,5/GJ (exclusief transport en capaciteitscomponent). Met een prijs van € 4/GJ is geprobeerd een aardig gemiddelde te hanteren, dat voor de kleinere verbruikers geen overschatting van de kostenvoordelen gerelateerd aan aardgasvervanging geeft Voor de echt grote verbruikers als kunstmestproducenten zal de specifieke prijs eerder op € 3,5 - € 3,0 liggen en worden de financiële voordelen wel overschat.

Voor wat betreft de investeringen is weer aangenomen dat de maximale schaalgrootte van vergassers niet veel afwijkt van de Tabel 12 gegeven vermogens, zie ook vorige paragraaf. Subsidies in het kader van EIA-regeling en VAMIL zijn niet verdisconteerd. De resulterende meerkosten per installatie zijn in Tabel 27 gegeven. Aangenomen is dat de extra geproduceerde elektriciteit de inkoop door de raffinaderij uit het net uitspaart. Daarom is gerekend met een marktconforme prijs voor grootverbruikers waarin verschillen in normaal tarief en daltarief zijn verdisconteerd.

Tabel 27 Overzicht meerkosten per installatie

	Kleine installaties		Grote installaties	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Kosten (M€/jaar)				
- jaarlijkse installatiekosten	1,3	1,3	1,6	1,6
- brandstofkosten	1,2	0,7	10,2	5,7
- uitgespaarde aardgas inkoop	-0,9	-0,9	-7,2	-7,2
- uitgespaarde inkoop elektriciteit	-0,1	-0,1	-1,2	-1,2
Netto	**1,7**	**1,1**	**4,6**	**0,2**
Inzet biomassa (PJ/jaar)	0,3	0,3	2,4	2,4
Specifieke meerkosten	**5,7**	**3,9**	**1,9**	**0,1**

Tabel 28 tenslotte geeft de specifieke reductiekosten van deze routes.

Tabel 28 Overzicht specifieke reductiekosten

	Kleinschalige installaties		Grootschalige installaties	
	Geteeld hout	Olijfpitten	Geteeld hout	Olijfpitten
Specifieke reductiekosten (€/ton CO_2)	170	82	107	37

Alleen de inzet van reststromen in grootschalige installaties is kosteneffectief.

3.9 Verwachtingen en mogelijkheden lange termijn

Op technologisch gebied is met betrekking tot de voorbewerking van biomassa ten behoeve van bijstoken en meestoken weinig ontwikkeling meer te verwachten. De benodigde technologie bestaat of is binnen enkele jaren commercieel rijp. Wel kan met name vergassing qua kosten en energetisch rendement misschien worden geoptimaliseerd door toepassing van relatief goedkope hoge temperatuur gasreiniging (metaalgaasfilters, teerkraker, HT-ontzwaveling). Hoge temperatuur gasreiniging is onder meer gedemonstreerd bij de inmiddels gesloten VAR hoge druk vergasser, waarvan het geproduceerde synthesegas werd ingezet in een gasturbine.

Kolencentrales kunnen in de toekomst geheel worden overgeschakeld op biomassa. Eventueel moet de ketel worden aangepast aan de afwijkende verbrandingseigenschappen van de biomassa of moeten branders op andere plekken in de ketel worden geplaatst. Gezien het feit dat de kolencentrales eigenlijk ‘dual-fuel’ centrales zijn die net zo gemakkelijk functioneren op aardgas – dat een compleet andere vlam produceert – zal er allicht een route c.q. technologie zijn waarmee dit gerealiseerd kan worden.

Boilers en fornuizen kunnen op termijn ook volledig biomassa gestookt worden door simpelweg bij vervanging van een afgeschreven boiler of fornuis een op de in te zetten brandstof van biologische oorsprong afgestemd ontwerp te plaatsen. Ook fornuizen en boilers met een beperkte beschikbaarheid kunnen ‘biogestookt’ worden door de inzet van plantaardige oliën of pyrolyse-olie, zoals onlangs gedemonstreerd bij de centrale in Harculo.

4 Routes vergeleken

4.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken hebben we de verschillende toepassingen van biomassa in transport en in de elektriciteitsvoorziening apart behandeld, in dit hoofdstuk zetten we de resultaten naast elkaar om tot een vergelijking te komen. Daarbij hebben we naar dezelfde aspecten gekeken die ook in hoofdstuk 2 aan de orde zijn gekomen, namelijk de reductie van de broeikasgasemissies, de kosten, het benodigde landbouwareaal en de kosteneffectiviteit.

Allereerst vergelijken we de toepassingen op twee manieren:

Route 1: als grondslag voor de vergelijking dient het landbouwareaal dat nodig is voor de productie van de biobrandstoffen hebben gebruikt.

Route 2: als grondslag dient de totale energie-inhoud van de in te zetten biobrandstoffen.

Voor deze twee routes geven we de reducties van de broeikasgasemissies en de totale kosten.

Vervolgens gaan we ook in op de kosteneffectiviteiten van de diverse toepassingen. Deze zijn onafhankelijk van de gekozen vergelijkingsroute. Als laatste geven we de conclusies die we uit deze vergelijkingen trekken, en gaan we nog in op de verwachtte ontwikkelingen op de langere termijn.

4.2 Route 1: Landbouwgrond gelijk aan transportroute

Volgens de berekeningen in hoofdstuk 2 is voor realisatie van de in het kader van de EU richtlijn biobrandstoffen neergelegde streefwaarde om in 2010 5,75% van de voertuigbrandstoffen op basis van biomassa te produceren voor de Nederlandse markt respectievelijk ca. 810 miljoen liter biodiesel of ca. 1.250 miljoen liter bio-ethanol uit suikerbieten nodig. In de praktijk is een combinatie van deze twee brandstoffen is ook goed mogelijk, in dit rapport hebben we ter illustratie echter deze twee uitersten als afzonderlijke opties gekeken.

Voor de productie van deze hoeveelheden biobrandstoffen is een landbouwareaal nodig van 400.000 ha – 730.000 ha voor koolzaad (indien de streefwaarden d.m.v. biodiesel wordt bereikt) óf 220.000 – 250.000 ha voor suikerbieten (indien bio-ethanol wordt ingezet). Daarbij gaan we uit dat energie die nodig is voor de teelt, transport en productie van de biobrandstof (ca. 35 – 50% van de energie-inhoud van het eindproduct) van fossiele oorsprong is. Als deze energie ook uit biomassa zou worden gewonnen moet hier ook landbouwgrond voor worden gealloceerd.

Bij deze eerste vergelijkingsroute gaan we ervan uit dat eenzelfde landbouwareaal gebruikt zal worden voor teelt van biomassa voor de productie van elektriciteit en warmte. Dit hoeft niet dezelfde grond te zijn, of hetzelfde soort biomassa. Uitgangspunt is alleen hetzelfde *areaal.*

Gebruik van dit areaal voor de productie van biomassa voor biobrandstoffen vergelijken we nu met het gebruik van dit areaal voor de productie van biomassa voor de elektriciteitsvoorziening. Daarbij kijken we naar de milieuef-

fecten (met name naar de reductie in broeikasgasemissies) en naar de totale jaarlijkse meerkosten. Meerkosten is daarbij gedefinieerd als de extra kosten ten opzichte van de inzet van de fossiele energiedragers die worden vervangen.

De vergelijking wordt enkel voor 2010 uitgevoerd. Een analyse voor 2005 heeft geen zin, omdat alle activiteiten die plaatsvinden voordat de doelstellingen in het Kolenconvenant zijn gerealiseerd óf voordat de doelstellingen van het Klimaatbeleid zijn gerealiseerd, kunnen worden uitgelegd als een initiatief om deze doelstellingen te realiseren. Gezien de huidige stand van zaken op het gebied van duurzame energie valt niet te verwachten dat deze doelstellingen in 2005 zullen zijn gerealiseerd.

4.2.1 Vergelijking op milieueffecten

In Tabel 29 is aangegeven welke CO_2-reductie kan worden gerealiseerd via productie van biofuels of inzet van biomassa bij elektriciteit- en warmteproductie.

Voor opwekking van elektriciteit en warmte is enkel de route via bijstook of meestook in kolencentrales meegenomen. Voor beide andere opties (vervanging stookolie of vervanging aardgas) is waarschijnlijk niet voldoende verwerkingscapaciteit beschikbaar om een vergelijking realistisch te maken. Bijstook of meestook van reststromen in kolencentrales is bij deze vergelijking eveneens buiten beschouwing gelaten, omdat dit geen grondgebruik vergt.

Tabel 29 Overzicht van de emissiereducties van broeikasgassen (Mton CO_2-eq./jaar) in 2010

Vergelijking met Transportroute Optie 1 (biodiesel) **Uitgangspunt: oppervlak 400.000 – 730.000 ha**	
	Emissiereductie (Mton CO_2 eq)
Biodiesel	0,6 – 1,2
Kolencentrale	
- indirect meestoken	3,7 – 6,8
- bijstoken syngas	3,6 – 6,6
Vergelijking met Transportroute Optie 2 (bio-ethanol) **Uitgangspunt: oppervlak 220.000 – 250.000 ha**	
	Emissiereductie (kton CO_2 eq)
Bio-ethanol uit suikerbieten	0.8 – 1.0
Kolencentrale	
- indirect meestoken	2,0 – 2,3
- bijstoken syngas	2,0 – 2,3

Uit de tabel blijkt dat bij benutting van een landbouwareaal van eenzelfde omvang met de inzet van biomassa ten behoeve van transportbrandstoffen 3 tot 10 maal minder CO_2 wordt uitgespaard dan met de inzet voor opwekking van elektriciteit en warmte. Anders gezegd, gebruik van landbouwgrond voor energieteelt in het kader van CO_2-reductie is effectiever wanneer gewassen worden geteeld voor meestook of bijstook in een kolencentrale.

Specifieker blijkt dat de inzet van geteelde biomassa in kolencentrales veel gunstiger is dan productie van biodiesel op basis van een zelfde landbouw-

areaal. Ook ten aanzien van bio-ethanol biedt bij- en meestoken voordelen, hoewel minder groot dan bij de vergelijking met biodiesel. De opbrengst per hectare is bij bio-ethanol uit suikerhoudende gewassen aanzienlijk groter dan bij biodiesel (zowel op basis van brandstofvolume als ook op basis van energie-inhoud).
Indien bio-ethanol (deels) uit graan wordt geproduceerd, is het benodigde landbouwareaal (bij eenzelfde volume geproduceerde bio-ethanol) groter dan in de tabel aangegeven, zodat de vergelijking

4.2.2 Vergelijking kosten

Voor de kosten is een zelfde soort vergelijking gemaakt. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 30. Her betreft hier de macro-economische kosten, eventuele subsidies of gederfde accijnsinkomsten hebben we hierbij niet meegenomen. Bovendien betreft het hier de huidige meerkosten van biodiesel en -ethanol, het is goed mogelijk dat de marktprijs de komende jaren zal veranderen ten gevolge van de toenemende vraag naar deze biobrandstoffen.

Tabel 30 Overzicht van de jaarlijkse meerkosten, zichtjaar 2010, in miljoen Euro

Vergelijking met Transportroute Optie 1 (biodiesel) **Uitgangspunt: oppervlak 400.000 – 730.000 ha**	
	Jaarlijkse meerkosten (M€)
Biodiesel	100 - 200
Kolencentrale	
- indirect meestoken	234 – 427
- bijstoken syngas	285 – 519
Vergelijking met Transportroute Optie 2 (bio-ethanol) **Uitgangspunt: oppervlak 220.000 – 250.000 ha**	
	Jaarlijkse meerkosten (M€)
Bio-ethanol	200 - 450
Kolencentrale	
- indirect meestoken	129 – 146
- bijstoken syngas	157 – 178

De meerkosten voor productie van biodiesel zijn iets tot veel lager (een factor 1,3 - 3) dan de meerkosten bij bijstook of indirect meestoken van houtachtige energiegewassen. Dit hangt onder andere samen met de (huidige) economische waarde van de bijproducten uit de biodiesel route.

Bij de kostenvergelijking met bio-ethanol komt bij- en meestook in kolencentrales als gunstigere toepassingen van het landbouwareaal naar voren. De kosten van bio-ethanol zijn ruim 2 maal zo duur dan van biodiesel (op energiebasis).

4.3 Route 2: Energie gelijk aan transportroute

Bij deze tweede vergelijkingsroute vergelijken we de inzet van biomassa in transport met die in de elektriciteitsvoorziening volgens een (iets) andere invalshoek. We gaan nu uit van de energie-inhoud van de biobrandstoffen c.q. de geproduceerde elektriciteit.

Wanneer de biobrandstoffen richtlijn wordt ingevuld volgens de EU streefcijfers dan moet in 2005 ca. 9 PJ aan energie uit biobrandstoffen worden ingezet in transport, en in 2010 ca. 29 PJ.

In route 2 zijn de effecten in kaart gebracht wanneer dezelfde hoeveelheid energie geproduceerd zou worden in de vorm van elektriciteit. Een groot verschil met de vorige vergelijkingsroute is dat we hierbij niet op voorhand uitgaan van energieteelt, maar dat er ook van reststromen gebruik kan worden gemaakt. In deze studie hebben we geen uitgebreide analyse kunnen maken van de markt voor reststromen, en van de concurrentie van reststromen met geteeld hout. In onderstaande resultaten geven we daarom een bandbreedte, waarbij de onderschatting van de meerkosten en de bovenschatting van de CO_2-reductie is gebaseerde op de inzet van olijfpitten (een reststroom) en de andere uitersten zijn gebaseerd op geteeld hout.

4.3.1 Vergelijking op milieueffecten

In Tabel 31 is aangegeven welke CO_2-reductie kan worden gerealiseerd via productie van biofuels of inzet van biomassa bij elektriciteit- en warmteproductie.

Ook hier is voor opwekking van elektriciteit en warmte enkel de route via bijstook of meestook van geteeld hout in kolencentrales meegenomen. Voor beide andere opties (vervanging stookolie of vervanging aardgas) is waarschijnlijk niet voldoende verwerkingscapaciteit beschikbaar om een vergelijking realistisch te maken. Natuurlijk is wel een mix van gasvervanging, olievervanging en kolenvervanging mogelijk.

Tabel 31 Overzicht van de emissiereducties van broeikasgassen (in Mton CO_2-eq./jaar) in 2010

	Emissiereductie (Mton CO_2 eq)
Biodiesel	0,6 – 1,2
Bio-ethanol	0,8 – 1,2
Kolencentrale	
- indirect meestoken	2,3 - 2,7
- bijstoken syngas	2,3 - 2,7

Ook uit deze vergelijking blijkt dat de grootste emissiereducties worden bereikt als biomassa wordt ingezet ten behoeve van de productie van elektriciteit en warmte. De productie van biodiesel en bio-ethanol leveren minder grote CO_2-reducties op. Dit is uiteraard in lijn met de conclusie uit de vergelijkingsroute 1, omdat de achterliggende reden voor het beter ‘scoren’ van bijstoken/meestoken is gelegen in de veel efficiëntere inzet van de energieinhoud van de biomassa voor de vervanging van fossiele energiedragers. Of dit gebeurt voor 29 PJ of voor 220.000 ha is enkel een verschil in referentiekader.

Voor de vervanging van 29 PJ aan kolen is bij inzet van geteeld hout een oppervlak nodig van 244.000 ha – 250.000 ha. Het benodigd oppervlak is voor indirect meestoken en bijstoken na vergassen ongeveer gelijk doordat de stoomzijdige integratie van vergasser met kolencentrale een vergelijkbare vervanging van steenkool per PJ biomassa mogelijk maakt. De benodigde ruimte is vergelijkbaar met c.q. iets groter dan de ruimte die nodig is voor de productie van 29 PJ aan bio-ethanol uit suikerhoudende gewassen.

4.3.2 Vergelijking kosten

Voor de kosten is eenzelfde soort vergelijking gemaakt. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 32.

Tabel 32 Overzicht van de jaarlijkse meerkosten, zichtjaar 2010, in miljoen Euro

	Meerkosten (M€)
Biodiesel	100 - 200
Bio-ethanol	200 - 450
Kolencentrale	
- indirect meestoken	80 - 130
- bijstoken syngas	110 - 160

Uit de tabel blijkt dat de jaarlijkse meerkosten gerelateerd aan de productie van 29 PJ biodiesel of bio-ethanol minstens 25% hoger zijn (t.o.v. bijstoken) dan de meerkosten gerelateerd aan inzet van geteeld hout in of bij kolencentrales.

4.4 Vergelijking kosteneffectiviteit

Tot slot zijn de verschillende onderzochte toepassingen van biomassa vergeleken op basis van kosteneffectiviteit. Hierbij zijn de kosten voor de reductie van broeikasgassen per type technologie berekend. De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in Tabel 33.

Tabel 33 Overzicht van de kosteneffectiviteit m.b.t. reductie van broeikasgassen.

	Kosteneffectiviteit CO_2 reductie (€ / ton CO_2 eq)
Biodiesel	200 – 250
Bio-ethanol	400 – 500
Kolencentrale	
- indirect meestoken	65
- bijstoken syngas	80
Vervanging stookolie	75 – 80
Vervanging aardgas	110 – 170

In deze tabel zijn ook de specifieke kosten voor vervanging van aardgas en stookolie door uit geteeld hout geproduceerd synthesegas gegeven.

Mee- en bijstoken van biomassa voor de vervanging van stookolie en steenkool zijn uit het oogpunt van kosteneffectiviteit duidelijk de meest gunstige routes. De specifieke kosten zijn 3 – 4 maal lager dan bij vervanging van voertuigbrandstoffen door biodiesel of ethanol.

Vervanging van stookolie scoort ongeveer even efficiënt als vervanging van steenkool. Weliswaar kan hierbij waarschijnlijk niet de totale hoeveelheid van 29 PJ/jaar aan fossiele energie worden vervangen, maar vervanging van stookolie door syngas uit hout kan wel een significante bijdrage leveren.

5 Conclusies

Na de zaak in voorgaande paragrafen van verschillende kanten – grondgebruik, totale jaarkosten, CO_2-reductie – te hebben bekeken, kan worden geconcludeerd dat meestoken en bijstoken van biomassa in kolencentrales duidelijk beter scoort dan omzetting naar biobrandstoffen:

- bij vergelijking met biodiesel op basis van landgebruik zijn de totale reducties in jaarlijkse CO_2-emissies 3 tot 10 keer hoger, terwijl de kosten slechts 1,5 - 3 maal zo hoog zijn. Eenzelfde vergelijking met bio-ethanol levert een emissiereductie op die 2-3 keer zo hoog is, voor minder dan de helft van de kosten;
- bij vergelijking op basis van vervangen hoeveelheid fossiele brandstoffen (29 PJ in 2010) zijn de meerkosten lager terwijl de realiseerbare CO_2-reductie hoger is dan bij beide biobrandstoffen routes. De behoefte aan landbouwareaal is vergelijkbaar met de ruimte nodig voor de productie van 29 PJ aan bio-ethanol uit suikerbieten. Voor biodiesel is een aanzienlijk groter landbouwareaal nodig.

Eén en ander is ook gevisualiseerd in Tabel 34.

Tabel 34 Vergelijking van de verschillende onderzochte toepassingen van biomassa, op verschillende aspecten

	Kosten-effectiviteit (€ / ton CO_2 eq)	Landbouweffectiviteit (Hectare / ton CO_2 eq)	Benodigde hulpenergie als percentage van energie-inhoud eind-product
Biodiesel	200 – 250[a]	0,7 – 0,9	35 – 50%
Bio-ethanol	400 – 500	0,2 – 0,4	40 – 60%
Kolencentrale			
- indirect meestoken	65	0,11	14%
- bijstoken syngas	80	0,11	14%
Vervanging stookolie	75-70	0,14	7%
Vervanging aardgas	110 – 170	0,22	7%

[a] Dit zijn (geschatte) huidige kosten van biodiesel in de EU. De teelt van koolzaad wordt op dit moment echter door de EU gesubsidieerd. Deze cijfers zijn niet gecorrigeerd voor deze subsidie, de werkelijke kosten van biodiesel zullen daarom hoger liggen.

- samenvattend kan worden gesteld dat als het doel is teelt van biomassa voor de reductie van CO_2-emissies van fossiele oorsprong, meestoken van daarvoor geteeld hout de meest kosteneffectieve route is. Ook het bijstoken van syngas bij een kolencentrale en de vervanging van stookolie bij raffinaderijen scoort in deze vergelijking goed. Biomassa als vervanger van aardgas is een vrij dure optie, omdat daarmee een relatief CO_2-arme brandstofsoort wordt vervangen. De verwerking van biomassa tot biobrandstoffen scoort in deze vergelijking het slechtst;
- de belangrijkste oorzaak hiervoor is dat er bij de elektriciteitsproductie geen omzetting plaats hoeft plaats te vinden naar een motorbrandstof die aan hoge kwaliteitseisen moet voldoen. Hierdoor zijn de kosten lager en is er minder procesenergie nodig, waardoor de CO_2-besparing groter is;

- de elektriciteitsproductie uit biomassa vergt daarnaast ook nog eens een gelijke of kleiner landbouwareaal dan de productie van biobrandstoffen, en laten daarmee ruimte over voor andere activiteiten of nog meer energieteelt;
- al deze conclusies gelden des te meer wanneer er (meer) reststromen worden ingezet bij mee- of bijstoken. Hiermee kan een verder kosten- en CO_2-besparing bereikt worden, al moet daarbij wel kritisch worden gekeken naar evt. andere toepassingen van de reststromen, zoals hergebruik of lokale energieproductie. Bij de productie van biobrandstoffen bestaat de mogelijkheid om reststromen te gebruiken op dit moment (nog) niet;
- de effecten op de overige emissies (zoals NO_x, fijn stof en zwavel) zijn bij de biofuels routes voor wat betreft NO_x, fijn stof en zwavel min of meer neutraal. Anders gezegd er treedt door de vervanging van benzine en diesel door biodiesel of andere biobrandstoffen geen substantiële toename of afname van de emissies per GJ brandstof op. Het gebruik van bio-ethanol lijkt een uitzondering hierop: de VOS emissies van deze brandstof zijn hoger dan van benzine. Bij de bijstook- en meestookroutes is er - voor wat betreft de inzet van de in deze studie twee beschouwde biomassa stromen - in geval van stookolie en steenkool vervanging wel een duidelijke afname van de emissies van verzurende en toxische stoffen naar lucht. Dit zal overigens niet het geval zijn wanneer zwaar vervuilde reststromen als zuiveringsslib worden meegestookt. Bij bijstoken zal dit beeld echter onveranderlijk zijn ongeacht de ingezette biomassa vanwege de reiniging van het stookgas voordat het wordt toegepast in kolencentrale of fornuis.

5.1 Lange termijn perspectief en sectorale reductiedoelen

Naast de overweging van kosteneffectiviteit op de korte termijn (tot 2010) lijkt het zinvol om rekening te houden met mogelijke ontwikkelingen op de langere termijn bij de afweging of biomassa nu in transport moet worden ingezet of in de elektriciteitsvoorziening. We hebben deze aspecten in deze studie niet nader onderzocht, maar willen hier toch kort op een aantal belangrijke punten ingaan die bij deze afweging een rol kunnen spelen.
Allereerst bespreken we kort de verwachtingen ten aanzien van toekomstige technologische ontwikkelingen, en de mogelijke gevolgen daarvan voor de keuzes die nu gemaakt moeten worden. Vervolgens gaan we kort in op een aantal andere, vaak gehoorde overwegingen om binnen de sector verkeer en vervoer de CO_2-emissie te reduceren door middel van biobrandstoffen.

Ook de vraag waar de biomassa zal worden geteeld, voorzieningszekerheid, sociale en duurzaamheids aspecten van deze teelt kunnen een rol spelen bij de uiteindelijke keuze. Deze aspecten behandelen we hier verder niet.

Toekomstige technologische ontwikkelingen
Er zijn op dit moment een aantal veelbelovende alternatieve routes voor de productie van voertuigbrandstoffen uit biomassa in ontwikkeling, waarmee deze brandstoffen naar verwachting aanzienlijk goedkoper kunnen worden geproduceerd, en meer CO_2-reductie kan worden behaald. Op dit moment wordt het meest verwacht van bio-ethanol uit hout, FT-synthese en het HTU-proces. Voor Fischer Tropsch synthese bijvoorbeeld worden voor de productiekosten cijfers genoemd van € 10 - € 20 per GJ voertuigbrandstof. Ter vergelijking, de huidige productiekosten voor diesel uit aardolie bedragen € 9 - € 10 per GJ. Voor de efficiency van de route wordt een percentage van 60% verwacht. De huidige productiekosten voor biodiesel en ethanol bedragen € 15/GJ en € 20/GJ. Als de verwachtingen inderdaad uitkomen kan de

productie van Fischer Tropsch diesel dus goedkoper wordt dan de productie van biodiesel.

Bij de elektriciteitsproductie uit biomassa verwachten we geen grote sprong voorwaarts meer. De kosteneffectiviteit van deze route hangt wel sterk af van de fossiele brandstof die wordt vervangen. Zo is de winst hoger bij vervanging van kolen dan van aardgas. Als er op de lange termijn een volledige transitie plaats vindt van kolen naar gas zullen de voordelen van de inzet van biomassa daarom afnemen. Prognoses laten echter zijn dat zeker de komende 10 jaar kolen nog een rol zullen spelen in de elektriciteitsvoorziening in Nederland [ECN 2001], [ECN/KEMA 2001].

We verwachten daarom dat de twee routes (biobrandstoffen en elektriciteitsproductie) de komende decennia weliswaar naar elkaar zullen toegroeien wat betreft kosteneffectiviteit, het is echter zeer de vraag of biobrandstoffen ooit beter zullen scoren dan de toepassing van biomassa in de elektriciteitsproductie. Voor de productie van biobrandstoffen zullen waarschijnlijk altijd extra processtappen nodig zijn, die meer energie zullen vergen dan directe verbranding of vergassing in een elektriciteitscentrale of andere installatie.

Beide routes kunnen ook bij elkaar worden gebracht in de vorm van trigeneratie (als warmte afzetbaar is) of bi-generatie. In feite is dat productie van voertuigbrandstoffen waarbij restproducten worden benut voor de productie van elektriciteit en eventueel ook warmte. Mogelijk biedt tri-/bi-generatie kostenvoordelen of geeft het een betere benutting van de energie-inhoud van de biomassa.

Als er desondanks wordt overwogen op korte termijn biobrandstoffen in transport in te zetten zou men er ook voor kunnen kiezen om de technologische ontwikkeling van milieuvriendelijkere en goedkopere biobrandstoffen nog een aantal jaren af te wachten. Door nu in te zetten op een sterke groei van de productie van biodiesel of bio-ethanol ontstaat er een groot risico dat ofwel de verdere ontwikkeling en marktintroductie van deze technologieën worden bemoeilijkt omdat er minder budget beschikbaar is voor deze nieuwe brandstoffen, ofwel dat de investeringen die in de komende jaren nodig zijn vervolgens vervroegd moeten worden afgeschreven. Het is niet te verwachten dat de inzet van biodiesel of -ethanol de ontwikkeling en introductie van nieuwe biobrandstoffen zal bespoedigen omdat deze routes al zijn uitontwikkeld. De alternatieve, toekomstige routes maken van andere technologieën gebruik, zodat er vrijwel geen technologische spin-off te verwachten is.

CO_2-reductie in de sector verkeer en vervoer

Deze conclusies leven op gespannen voet met een overweging die in de beleidsdiscussie vaak meespeelt: de inzet van biobrandstoffen biedt één van de weinig mogelijkheden om de komende jaren de groei van de CO_2-uitstoot van de sector verkeer en vervoer te beperken. De ervaring leert dat de (met name maatschappelijke en politieke) mogelijkheden om te streven naar zuinigere voertuigen en/of het verminderen van het aantal verreden kilometers beperkt zijn. Brandstofcellen die draaien op duurzaam geproduceerde waterstof zijn in elk geval het komende decennium nog een veel duurdere optie, en ook van elektrisch vervoer (op duurzaam geproduceerde elektriciteit) wordt de komende jaren geen doorbraak verwacht.

Biobrandstoffen bieden de mogelijkheid om met relatief beperkte aanpassingen aan de tankinfrastructuur en de voertuigen te worden geïntroduceerd, in elk geval zolang het aandeel biobrandstoffen nog beperkt blijft tot enkele

tientallen procenten (waarschijnlijk zijn er wat grotere aanpassingen nodig indien het aandeel boven de 10 - 20% komt). Daarnaast kunnen biobrandstoffen vrij eenvoudig worden gestimuleerd in verkeer en vervoer door een korting op c.q. vrijstelling van de accijnzen op biobrandstoffen te verlenen. De accijnzen op benzine en diesel zijn voldoende hoog om de meerkosten van de biobrandstoffen te compenseren.

Bij deze overwegingen moet echter niet worden vergeten welk doel men wil bereiken met de inzet van biobrandstoffen, en welke kosten men daarvoor over heeft. De kosten van biobrandstoffen zijn aanzienlijk, en de milieukundige baten lijken zeer beperkt. De inzet van biobrandstoffen is uit oogpunt van kosteneffectief milieu- en klimaatbeleid daarom - in ieder geval momenteel - niet zinvol.

De kosteneffectiviteit van de biobrandstoffen is de komende jaren waarschijnlijk niet veel beter dan ca. 200 Euro per ton CO_2-eq. De toepassing van biomassa in de elektriciteitsvoorziening scoort weliswaar aanzienlijk beter, maar is met een kosteneffectiviteit van minimaal ca. 65 Euro per ton CO_2-eq. ook nog een dure maatregel. Ter illustratie: in de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid [VROM, 1999] was een prijs van ca. 65 Euro per ton de afkapprijs voor binnenlandse maatregelen. Wanneer er in de toekomst een Europese CO_2-emissiehandel wordt opgezet zal de prijs van een ton CO_2-emissierecht op minder dan 10 Euro per ton uitkomen, zo laten recente berekeningen van het RIVM zien [RIVM, 2002].

De resultaten van deze studie leiden daarom tot de conclusie dat de inzet van transportbrandstoffen uit biomassa in elk geval op de korte termijn zeer duur is, en dat het goed intersectoraal afwegen van klimaatmaatregelen veel ruimte en geld kan opleveren. De vraag welke toepassing van biomassa het meeste toegevoegde waarde heeft is daarbij zeer relevant, en moet in een breed kader worden beantwoord. Zo is in de elektriciteitsproductie windenergie ook een reëel alternatief, en als serieus CO_2 moet worden gereduceerd is het waarschijnlijk goedkoper om over te schakelen op aardgas, dan om geteeld hout te importeren. In de chemische industrie zijn er daarentegen geen duurzame alternatieven voor biomassa als vervanger van fossiele koolstof.

Daarnaast maakt de opkomst van emissiehandel als belangrijk beleidsinstrument ‘intersectorale optimalisatie’ van het klimaatbeleid steeds belangrijker omdat emissiehandel de prijs van klimaatbeleid transparant maakt. Het is overigens sterk de vraag of in een vrije ‘emissiemarkt’ biomassa überhaupt in enige omvang zou worden ingezet omdat de kosten van alle bekeken routes hoger zijn dan de verwachte handelsprijs.

Literatuurlijst

[ADEME, 2003]
Liquid biofuels network Activity Report, European Bioenergy Networks, ADEME, 2003.

[ADL, 1999]
Analyse en evaluatie van GAVE-ketens - Management Summary, Arthur D Little International Inc., GAVE-rapport 9908, deel 1 van 3, Novem, 1999

[BenH 2002] L.C. Kuiper
Fase 2 van het project Flevo-Energieteelt
Stichting Bos en Hout, Wageningen, 2002.

[Boer, 2002]
Oil Ages? An assessment of conventional and on natural gas and biomass based alternative transportation fuel chains, E. den Boer, EIndhoven Universtiy of Technology, 2002

[BTG] Website BTG: www.btgworld.com

[BTG/KEMA 1996] M.L.Beekes et al
Bijstoken van geïmporteerde biomassa uit Estland in de centrale Maasvlakte (EZH) en de centrale Borssele (EPZ): economische haalbaarheid
BTG en KEMA, 16 oktober 1996
Uitgegegeven door KEMA, Arnhem

[CE, 2003]
To shift or not to shift, that's the question, The environmental performance of the principal modes of freight and passenger transport in the policy-making context, CE and RIVM, 2003

[CONCAWE, 2002]
Energy and greenhouse gas balance of biofuels for europe - an update, CONCAWE, 2002

[ECN 2000] R. van Ree et al
Mee-/bijstookpotentieel biomassa in kolencentrales en aardgas-gestookte installaties
ECN, Petten, november 2000

[ECN 2001] Th. de Lange
Energie markt trends 2001
ECN, Petten, 2001

[ECN, 2002]
Grootschalige toepassing van biobrandstoffen in wegvoertuigen, Een transitie naar emissiearm vervoer in Nederland, E. van Thuijl, ECN, ECN-I--02-008, 2002

[ECN, 2003]
An overview of biofuel technologies, markets and policies in Europe, E. van Thuijl, C.J. Roos, L.W.M. Beurskens, ECN, ECN-C-003-008, 2003-06-20

[ECN/KEMA 2002] E.J.W. van Samsbeek, T.J. de Lange, W.J.A. Ruijgrok, A.E. Pfeiffer
Invulling van het wetsvoorstel MEP voor duurzame elektriciteit
ECN en KEMA, 5 november 2002
Uitgegeven door ECN Beleidsstsudies, Petten.

[ECN/RUU 1995] R. van Ree, A.B.J. Oudhuis, A. Faaij, A.P.W.M. Curvers
Modelling of a biomassa-integrated gasfier/combined system with the flowsheet simulation programme ASPEN^{plus}
ECN en RU Utrecht, 1995
Uitgegeven door ECN, Petten

[EEB, 2002]
EEB Background paper 18-03-2002, on the use of biofuels for transport, European Environmental Bureau, 2002

[EP, 2003]
Richtlijn 2003/30/EG van het Europees parlement en de raad, ter bevordering van het gebruik van biobrandstoffen of andere hernieuwbare brandstoffen in het vervoer, 8 mei 2003.

[IEA, 1996a]
Automotive Fuels Survey, Part 1: Raw materials and conversion, IEA/AFIS, 1996

[IEA, 1996b]
Automotive Fuels Survey, Part 2: Distribution and use, IEA/AFIS, 1996

[IEA Coal] Greenhouse gas emissions reduction by
co- utilisation of coal with other fuels
Irene Smith
IEA Clean Coal Centre, London, UK

[Jager, 1998]
Kosten-effectiviteit van transportbrandstoffen uit biomassa, D. de Jager, A.F.C. Faaij, W.P. Troelstra, Ecofys, 1998

[KEMA 1996 A]
MER Houtvergassing bij eenheid 9 Amercentrale te Geertruidenberg
KEMA, Arnhem, 1996

[KEMA 1996 B]
MER Voorbehandelen en bijstoken papierslib op het Amercentralecomplex te Geertruidenberg
KEMA, Arnhem, 1996.

[NOVEM/KEMA 2003] M. Raats et al
Advies Differentiatie binnen de MEP-categorie 'Zuivere Biomassa'
NOVEM en KEMA, april 2003.
Uitgegeven door NOVEM, Utrecht

[PWC, 2000]
GAVE-ketens - Helicopterview: GAVE-kansen in Nederland 2000 - 2010, PricewaterhouseCoopers NV, GAVE-rapport 9918, 2000.

[RIVM, 2000]
Verkeer en vervoer in de Nationale Milieuverkenning 5, RIVM rapport 408129014, 2000.

[RIVM 2001] Wesselink LG; Elzenga HE; Booij H; Peek K; Thomas R; Duvoort GL; Schijndel MW van
Industrie in de MV5. Milieudruk door de industrie in de periode 1980-2020, achtergronddocument bij de 5e nationale Milieuverkenning
RIVM, Bilthoven 2001.

[RIVM, 2003]
Scenario's voor duurzame energie in verkeer en vervoer, Beoordeling van CO_2-arme scenario's op overige emissies, ruimtegebruik en kosten, RIVM rapport 773002/0$$/2002 - *to be published*

[RRU, 2003]
Carbon and energy balances for a range of biofuel options, Resources Research Unit and Sheffield Hallam University, 2003

[SAC 2001] www.sac.ac.uk/envsci/External/WillowPower/GrowCrop.htm (last updated 05/02/01)

[Stork/Comprimo 1998] R.J. van der Velde et al
Reductiepotentieel van NO_x emissies bij de industrie, raffinaderijen en centrales met de samenhangende kosten
Stork Engineering Consultancy B.V. en Comprimo Protech, 1998
Uitgegeven door Stork Engineering Consultancy milieu en veiligheidsgroep,

[Woody 1996] www.woodycrops.org/paducah/spinelli.html