



Energy research Centre of the Netherlands

Effect biobrandstoffen op fijn stof in de buitenlucht

H.P.J. de Wilde

L.W.M. Beurskens

P. Kroon

A. Bleeker

M.K. Cieplik

R. Korbee

ECN-C--06-010

Juni 2006

Verantwoording

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Infomil ten behoeve van het ministerie van VROM.

Het project 'PM-emissie biomassa-inzet' is bij ECN geregistreerd onder projectnummer 7.7755. Deze studie is uitgevoerd door Hein de Wilde, Luuk Beurskens en Pieter Kroon van de unit Beleidsstudies en Albert Bleeker, Mariusz Cieplik en Rob Korbee van de unit Biomassa, Kolen en Milieuonderzoek. De ECN interne co-reader was Ad Seebregts.

Externe begeleiding heeft plaatsgevonden door André Peeters Weem en Wim Burgers van Infomil en Meindert Timmer van het ministerie van VROM.

Abstract

This study provides an overview of the impact of the future use of biomass on the PM₁₀ concentration in the Netherlands. We conclude that the present and future biomass-based emissions have a limited impact on the PM₁₀ concentration in the atmosphere.

- In 2020 industrial biomass emissions will have increased by about a factor 3, contributing about 1% to the total domestic PM₁₀ emission of anthropogenic origin. This emission corresponds to a PM₁₀ concentration in the atmospheric air of about 0,02 µg/m³.
- Emissions from private stoves have been estimated to decrease slightly, in 2020 contributing about 3% to the total domestic PM₁₀ emission of anthropogenic origin. This emission contributes in the order of 0,05 µg/m³ to the PM₁₀ concentration in the atmospheric air. The average size of particles emitted by private stoves is large compared to particles emitted by industrial plants.
- The impact of foreign biomass emissions on the air quality in the Netherlands is small. In 2020 the biomass-based PM₁₀ emissions in Belgium, France and Germany together will increase the PM₁₀ concentration in the atmospheric air of the Netherlands by about 0,01 µg/m³.

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	5
Samenvatting	5
Summary	7
1. Inleiding	9
1.1 Doelstelling	9
1.2 Aanpak	9
2. Ontwikkeling biomassa-inzet	10
2.1 Brandstofinzet	10
2.2 Recente trends en verwachtingen 2010	11
2.3 Van brandstofinzet naar emissies	12
3. Emissienormen en rookgasreiniging	13
3.1 Emissienormen	13
3.2 Rookgasreiniging	14
4. Biomassa installaties en emissiefactoren	15
4.1 Meestook gascentrales	16
4.2 Bij- en meestoken biomassa in kolencentrales	17
4.2.1 Zwavelgehalte en SO ₂ emissies	19
4.3 Industriële installaties	20
4.4 Dieselmotoren op plantenzie	22
4.5 Gasmotoren	23
4.6 Kachels en openhaarden	24
4.7 Afvalverbrandingsinstallaties (AVI's)	27
4.8 Bijstook in cementovens	27
4.9 Overige kleinschalige biomassa en experimentele installaties	27
4.10 Grootschalige biomassa stand-alone	28
5. Overzicht huidige en verwachte fijn stof emissies	28
6. Gevolgen voor de buitenluchtkwaliteit	30
6.1 Effect van Nederlandse emissies	30
6.2 Effect van buitenlandse emissies	30
7. Verdieping aard en samenstelling PM ₁₀	33
8. Conclusies en aanbevelingen	34
8.1 Conclusies	34
8.2 Aanbeveling	35
Referenties	36
Lijst van afkortingen	39

Lijst van tabellen

Tabel 2.1 <i>Brandstofverbruik aan biomassa in Nederland</i>	11
Tabel 4.1 <i>Vloeibare biomassa: emissiefactoren SO₂, NO_x en fijn stof</i>	18
Tabel 4.2 <i>Stof-emissiefactoren van kolencentrales in g/GJ brandstof</i>	20
Tabel 4.3 <i>Fijn stof emissiefactoren bij het meestoken van biomassa</i>	21
Tabel 4.4 <i>Gemiddelde SO₂-emissiefactoren</i>	21
Tabel 4.5 <i>Zwavelgehalte van biomassa</i>	21
Tabel 4.6 <i>Emissiefactoren voor twee houtkachels bij ECN</i>	22
Tabel 4.7 <i>Stofemissie factoren</i>	22
Tabel 4.8 <i>Andere emissie factoren (gemiddeld)</i>	22
Tabel 4.9 <i>Emissiefactoren wervelbedketel in Cuijck (24 MW_e)</i>	23
Tabel 4.10 <i>Emissiefactoren houtresten in 45 MW_{th} installatie</i>	23
Tabel 4.11 <i>Emissiefactoren (g/GJ) van stro gestookte installaties van 50-70 MW_{th}</i>	23
Tabel 4.12 <i>Emissiefactoren CFB biomassa vergasser (in g/GJ; aanname 6% O₂)</i>	24
Tabel 4.13 <i>Diverse emissies van dieselmotoren op plantenzie</i>	24
Tabel 4.14 <i>Emissiefactoren uit Denemarken</i>	25
Tabel 4.15 <i>Emissiefactoren voor stortgas</i>	26
Tabel 4.16 <i>Stofemissiefactoren van diverse typen kleine houtkachels</i>	27
Tabel 4.17 <i>Emissiefactoren niet industriële verbrandingsprocessen op hout</i>	27
Tabel 4.18 <i>Emissiefactoren voor hout en andere vaste biobrandstoffen in kachels, kleine ketels en kleine commerciële installaties</i>	28
Tabel 4.19 <i>Emissiefactoren voor hout en andere vaste biobrandstoffen (verbeterde technologie)</i>	28
Tabel 4.20 <i>Emissiefactoren Afval verbrandingsinstallaties</i>	29
Tabel 4.21 <i>Fijn stof emissiefactoren voor stand-alone installaties</i>	30
Tabel 5.1 <i>Totaaloverzicht energie-inzet en stofemissies: industrie</i>	31
Tabel 5.2 <i>Totaaloverzicht energie-inzet en stofemissies: particuliere kachels</i>	31
Tabel 6.1 <i>PM₁₀-emissies in België, Frankrijk en Duitsland en gevolgen voor Nederland</i>	34
Tabel 6.2 <i>Biomassa gerelateerde PM₁₀-emissies in België, Frankrijk en Duitsland</i>	34
Tabel 6.3 <i>Bijdrage van biomassa PM-uitstoot in B, F, en D op de Nederlandse luchtkwaliteit</i>	35

Lijst van figuren

Figuur 3.1 <i>Voorbeeld van diverse internationale PM-emissienormen voor grote zuigermotoren op diesel en gas</i>	15
Figuur 3.2 <i>Internationale emissienormen voor PM en NO_x voor zware vrachtwagens en binnenvaart.</i>	15
Figuur 4.1 <i>Overzicht van de technologieën voor elektriciteit- en warmteopwekking uit biomassa</i>	17
Figuur 4.2 <i>Mee- en bijstoken van biomassa in een (kolengestookte) elektriciteitscentrale</i>	19
Figuur 7.1 <i>Deeltjesgrootte-afhankelijke concentratie van stofdeeltjes in het rookgas (na de ESP) van een kolengestookte elektriciteitscentrale met en zonder biomassa meestoken</i>	36

Samenvatting

Momenteel wordt veel tijd en energie gestoken in beleid gericht op het verlagen van de PM₁₀-concentratie in Nederland, vanwege de invloed op de volksgezondheid en het voorkomen van overschrijdingen van de huidige en toekomstige EU-richtlijnen. Inzet van biomassa leidt tot meer emissie van fijn stof dan alternatieven zoals het verbranden van aardgas of inzet van kernenergie. Daarom is het van belang om inzicht te hebben in de gevolgen van toekomstige biomassa-inzet op de fijn stof concentraties. Deze studie beoogt inzicht te geven in de invloed van de toekomstig voorziene inzet van biomassa op de PM₁₀-concentratie in Nederland (2020).

Ontwikkeling emissiebronnen

Een belangrijke conclusie is dat de emissie van fijn stof door biomassastook in Nederland de komende jaren op een aantal plaatsen gaat toenemen. De grootste toename in inzet van biomassa zit bij de bijstook in kolencentrales. Vanwege de reeds bestaande goede filterinstallaties heeft dit weinig milieueffecten. Omdat hier emissie van kolen verdrongen wordt zal er per saldo geen substantiële toename of afname van de fijn stof emissie (uitgedrukt in PM₁₀) zijn.

Het totale energieverbruik in industriële biomassa installaties stijgt met ongeveer een factor 2,5 van 55 naar 136 PJ in de periode 2004-2020 (zie de overzichtstabel onderaan deze samenvatting). De bijbehorende PM₁₀-emissies stijgen in dezelfde periode met een factor 3,4 van 140 naar 470 ton en komen in 2020 overeen met ongeveer 1% van de Nederlandse PM₁₀-emissie uit niet-natuurlijke bronnen. De meer dan evenredige toename in emissies uit biomassa wordt vooral veroorzaakt door inzet van bio-olie in dieselmotoren. In 2020 is hiervoor een emissie voorzien van ca. 160 ton PM₁₀. Deze emissie zou mogelijk met ca. 80% kunnen worden gereduceerd door inzet van na-geschakelde roetfilters.

De fijn stof emissies uit particuliere houtkachels dragen buitenproportioneel bij aan de totale biomassagerelateerde emissies in Nederland (orde 70 - 90%). In het gehanteerde scenario (GE) daalt het energieverbruik uit biomassa in de huishoudens van 9,3 naar 7,5 PJ, terwijl de emissie evenredig afneemt van 1400 naar 1100 ton. In 2004 is de PM₁₀-emissie van de huishoudens bijna 10 maal hoger dan de totale emissie uit de industrie. In 2020 stoten de huishoudens nog steeds ca. 2,5 maal zoveel fijn stof uit als de industrie. Aangezien de filters die in de industrie worden gebruikt selectief de grotere deeltjes afvangen, dient te worden opgemerkt dat industriële installaties veel kleinere deeltjes uitstoten dan particuliere houtkachels die deze filters niet hebben. Uitgedrukt in *aantallen* deeltjes is de industriële emissie naar verwachting veel groter dan de totale uitstoot uit particuliere kachels.

Gevolgen buitenluchtkwaliteit

De bijdrage van de huidige en toekomstige biomassa-emissies aan de PM₁₀-concentratie in de buitenlucht is beperkt.

- De industriële biomassa emissies dragen in 2020 ongeveer 1% bij aan de totale binnenlandse emissies van antropogene aard. Dit correspondeert met een bijdrage aan de PM₁₀concentratie in de buitenlucht van ongeveer 0,02 µg/m³.
- Particuliere kachels zullen in 2020 naar verwachting circa 3% bijdragen aan de totale binnenlandse emissies van antropogene aard. Dit correspondeert met een bijdrage aan de PM₁₀concentratie in de buitenlucht in de orde van 0,05 µg/m³.
- De invloed van biomassa-inzet in het buitenland op de Nederlandse luchtkwaliteit is klein. De biomassagerelateerde PM₁₀-uitstoot in België, Frankrijk en Duitsland tezamen resulteert in 2020 in een bijdrage aan de PM₁₀-concentratie in de Nederlandse buitenlucht in de orde van 0,01 µg/m³.

Overige bevindingen

Bij vervanging van kolen door biomassa treedt er waarschijnlijk een beperkte daling van de hoeveelheid emissie op (uitgedrukt in de eenheid voor massa PM₁₀). Gelijktijdig zal er, door de verandering in brandstof, ook een verandering optreden in de deeltjesgrootte verdeling en aard van de emissie. Er zijn indicaties dat de emissie van heel kleine deeltjes (PM₁) toeneemt, maar hierover is nog maar weinig bekend.

Een nieuwe biomassa installatie of bijstook van bio-olie in een gascentrale kan wel effect hebben op lokale milieusituatie. Per situatie moet dan gekeken worden of milieunormen hierdoor overschreden gaan worden.

De emissieschattingen voor particuliere kachels bevatten cumulatieve onzekerheden in: (1) de hoeveelheid brandstof die zal worden ingezet, (2) de emissiefactor van particuliere kachels gestookt op hout; en (3) de emissie-effecten van het stoken van andere brandstoffen dan hout, zoals turf en stro. De berekende emissie-effecten, zoals gegeven in onderstaande tabel, zijn kleiner dan de onzekerheden.

De ‘verzameleenheid’ PM₁₀ geeft een weinig gedetailleerd beeld van de biomassagerelateerde fijn stof emissies uit de verschillende bronnen, omdat de samenstelling, deeltjesgrootteverdeling en deeltjesoppervlak voor de verschillende bronnen sterk verschilt. Een succesvol beleid voor biomassa gerelateerd fijn stof vereist, naast inzicht in de herkomst, ook informatie over de samenstelling en deeltjesgrootteverdeling. Dit is van belang voor de beoordeling van de schadelijkheid voor de gezondheid en de mogelijkheden van specifieke emissiereductietechnologieën.

Totaaloverzicht energie-inzet en stofemissies: industrie

Installatie	Brandstof	Brandstof	Stof emissiefactor [g/GJ]	Stof emissies	
	verbruik 2004 [PJ]	verbruik 2020 [PJ]		PM ₁₀ 2004 [ton]	PM ₁₀ 2020 [ton]
Meestook kolencentrale	11,1	79,5	2	22	159
Meestook gascentrale		8,1	10	28	81
Bijstook kolencentrale (zie meestook)			2		
Bijstook gascentrale	2,8	0,0	10	28	0
Kleinschalige biomassa	3,3	4,1	5	16	21
Bio-olie in grote dieselmotoren		6,5	25		162
Bijstook cement	1,7		?		

Grootschalige biomassa stand-alone		0,0	5	0	0
Vuilverbranding 50% duurz. genomen	27,7	31,0	0,5	14	16
Mest- en GFT-vergisting	0,2	2,0	0,5	0	1
Stortgas	2,8	1,2	0,5	1	1
(waarvan fakkels)	0,8				
AWZI/RWZI	3,3	1,6	0,5	2	1
(waarvan fakkels)	0,2				
Houtkachels industrie	1,9	1,9	15	29	29
Totaal	54,8	135,9		141	471

Totaaloverzicht energie-inzet en stofemissies: particuliere kachels

Installatie	Brandstof verbruik 2004 [PJ]	Brandstof verbruik 2020 [PJ]	Stof emissiefactor [ton/PJ]	Stof emissies 'M ₁₀ 2004 [ton]	Stof emissies 'M ₁₀ 2020 [ton]
Houtkachels particulieren	9,3	7,5	150	1395	1120

Summary

Presently a lot of effort is put in policies to reduce the PM₁₀ concentration in the Netherlands, because of its negative impact on human health and to prevent the exceeding of the present and future EU regulations. This study aims to identify the impact of the future use of biomass on the PM₁₀ concentration in the Netherlands.

Emission sources

An important conclusion is that the emission of PM₁₀ resulting from the use of biomass will increase. The largest increase on biomass use will be co-firing in coal-fired power plants. The environmental impacts will be limited, due to the existing filtration systems, which are very efficient. Since the biomass will replace coal, the net effect on the total amount of emitted PM₁₀ will be small (expressed as mass in the unit PM₁₀).

The total energy use in industrial biomass plants will increase by about a factor 2.5, from 55 to 136 PJ in the time frame 2004-2020 (see the overview table at the end of this summary). The associated PM₁₀ emission will increase in the same time frame by a factor 3.4 from 140 to 470 ton, in 2020 corresponding to about 1% of the total domestic PM₁₀ emission of anthropogenic origin. This more than linear increase in emissions especially results from use of bio-oil in diesel engines. In 2020 the bio-oil diesel emissions are estimated at about 160 tons. This emission could possibly be reduced by 80%, through applications of soot filters.

The emissions from private wood stoves play a dominant role with a contribution of 70-90% to the total biomass related emissions in the Netherlands. In the scenario applied (GE), the biomass-based energy use in households decreases from 9.3 to 7.5 PJ, while the associated emissions decrease from 1400 to 1100 tons. In 2004 the PM₁₀ emission from households is higher by about one order of magnitude, compared to the total biomass-based emissions from the industry. In 2020 households are still expected to emit about 2.5 times as much as the industry. Because the filtration equipment applied in industry selectively captures the larger particles, industrial plants emit much smaller particles than the simple private wood stoves without filters. This implies that the industry - although characterized by relatively low emissions expressed in the unit for

mass PM₁₀ - likely emits much more particles, compared to private stoves, if expressed in the unit particle numbers.

Air quality

The contribution of present and future biomass-based emissions to the PM₁₀ concentration in the atmosphere is limited.

- In 2020 industrial biomass emissions will contribute about 1% to the total domestic PM₁₀ emission of anthropogenic origin. This emission corresponds to about 0,02 µg/m³ of the PM₁₀ concentration in the atmospheric air.
- Private stoves have been estimated to contribute about 3% to the total domestic PM₁₀ emission of anthropogenic origin. This emission contributes in the order of 0,05 µg/m³ to the PM₁₀ concentration in the atmospheric air.
- The impact of foreign biomass on the air quality in the Netherlands is small. In 2020 the biomass-based PM₁₀ emissions in Belgium, France and Germany together will increase the PM₁₀ concentration in the atmospheric air by about 0,01 µg/m³.

Additional findings

The substitution of coal by biomass will likely result in a limited reduction of PM₁₀ emissions (expressed as mass). At the same time, this shift to biofuel will also result in a shift in the sizedistribution and the composition of the particles emitted. There are indications that the emission of very small particles (<PM₁) will increase. However, little is known yet on these phenomena.

The *local* environmental situation may be effected more substantially by a new biomass plant, or by the co-firing of bio-oil in a gas-fired plant. The potential exceeding of the environmental regulations should be evaluated for each separate case.

The high uncertainty in the emissions from the household sector is caused by the poorly known amount of wood that is burned. In addition, the average emission factor is rather uncertain (up to a factor 2). The calculated effects on PM₁₀ emissions are smaller than the underlying uncertainties. The uncertainty is further increased by the possibility of burning other fuels than wood, like peat and straw.

The ‘bulk parameter’ PM₁₀ does not provide a complete view of the biomass related fine dust emissions from the various sources, because the particles in the exhaust of the various sources are likely to vary in composition, size distributions, and surface area. A successful policy on fine dust emissions therefore not only requires information on the origin of particles, but also information on the composition and the size distribution of the particles. This approach enables to evaluate specific health risks and options to apply emission reduction technologies. *Total fuel use and PM₁₀ emissions power plants and industry*

Type	Fuel use 2004 [PJ]	Fuel use 2020 [PJ]	Emission factor PM ₁₀ [g/GJ]	PM ₁₀ emissions 2004 [ton]	PM ₁₀ emissions 2020 [ton]
Co-firing coal power plant	11.1	79.5	2	22	159
Co-firing gas power plant		8.1	10	28	81
Co-combustion coal power plant (see co-firing)			2		
Co-combustion gas power plant	2.8	0.0	10	28	0
Small scale biomass plant	3.3	4.1	5	16	21
Bio-oil in stationary diesel engines		6.5	25		162
Co-combustion in cement production	1.7		?		
Large scale biomass power plant (stand-alone)		0.0	5	0	0
Municipal Waste Incineration (only biomass part: 50% of waste)	27.7	31.0	0.5	14	16

Fermentation of manure and organic waste	0.2	2.0	0.5	0	1
Landfill gas (of which flares)	2.8 0.8	1.2	0.5	1	1
Wastewater treatment and sewage purification (of which flares)	3.3 0.2	1.6	0.5	2	1
Industrial wood stoves	1.9	1.9	15	29	29
Total	54.8	135.9		141	471

Total fuel use and PM₁₀ emissions power household wood stoves and fire places

Type	Fuel use 2004 [PJ]	Fuel use 2020 [PJ]	Emission factor PM ₁₀ [g/GJ]	PM ₁₀ emissions 2004 [ton]	PM ₁₀ emissions 2020 [ton]
Household wood stoves and fire places	9.3	7.5	150	1395	1120

1. Inleiding

Momenteel wordt veel tijd en energie gestoken in beleid gericht op het verlagen van de PM₁₀concentratie in Nederland, vanwege de invloed op de volksgezondheid en het voorkomen van overschrijdingen van de huidige en toekomstige EU-richtlijnen. Inzet van biomassa leidt tot meer emissie van fijn stof dan alternatieven zoals het verbranden van aardgas of inzet van kernenergie. Uit onderzoek blijkt dat, hoewel de onzekerheden substantieel zijn, kleine veranderingen in de achtergrondconcentratie van fijn stof een groot effect hebben op de aantallen verwachte planknelpunten (Van de Ven et al., 2005). Daarom is het van belang om inzicht te hebben in de gevolgen van toekomstige biomassa-inzet op de fijn stof concentraties.

Nederland wil meer duurzame energie opwekken uit biomassa. De doelstelling voor 2010 is om 9% van de totale elektriciteitsproductie duurzaam op te wekken, waarvan ca. 75% uit biomassa. Voor 2020 wordt een bijdrage van 17% duurzame elektriciteit voorzien. In de totale energieopwekking (ook warmte) moet het aandeel duurzame energie 10% bedragen.

De problematiek van fijn stof staat al langer in de belangstelling (MNP/RIVM, 2005). De bijdrage van de elektriciteitscentrales aan de fijnstofemissies is inmiddels relatief beperkt dankzij regelgeving en daarop volgende maatregelen (ECN/MNP, 2005). Met name kolengestookte centrales zijn de afgelopen decennia zeer veel schoner geworden. De bijdrage aan de concentraties fijn stof in de omgeving van een moderne kolencentrale is verwaarloosbaar geworden (Meij en Te Winkel, 2005). De bijdrage van de energiesector als totaal was in 2002 1% van de totale niet-natuurlijke PM₁₀-emissie (met 1% van 46 kton, dus minder dan 0,5 kton).

1.1 Doelstelling

De voorliggende studie beoogt inzicht te geven in de invloed van de toekomstig voorziene groeiende inzet van biomassa op de PM₁₀-concentratie in Nederland (2020).

1.2 Aanpak

De biomassagerelateerde fijn stof emissies zijn geschat op basis van een recent en veel gebruikt scenario (GE; Global Economy; ECN/MNP; 2005) van het opgestelde biomassavermogen, de gebruikte conversietechniek, de hoeveelheid verstoekte biobrandstof en opgewekte energie nu en 2020. Hierbij zijn de Nederlandse beleidsinstrumenten uitgangspunt. Combinatie met de in de literatuur gevonden emissiecoëfficiënten voor fijn

stof levert een beeld van de totale biomassagerelateerde fijn stof uitstoot. Tevens wordt aandacht besteed aan de relatie tussen het type biomassa en de bijbehorende emissie. Daarnaast wordt de schatting van de totale toekomstige biomassagerelateerde uitstoot van fijn stof afgezet tegen de heersende niveaus van fijn stof concentraties in Nederland. Hierbij is het van belang dat de meeste biomassa inzet zal leiden tot substitutie van kolen. Tenslotte wordt geëvalueerd wat de te verwachten biomassa-inzet in de ons omringende landen is op de Nederlandse luchtkwaliteit.

2. Ontwikkeling biomassa-inzet

Nederland wil meer duurzame energie opwekken uit biomassa. De minister van EZ heeft aangegeven dat in 2010 duurzame energie een bijdrage moet leveren van 9% op de totale elektriciteitsopwekking. In 2020 zou dit 17% moeten zijn. In de totale energieopwekking (ook warmte) moet het aandeel duurzame energie 10% bedragen in 2020 (EZ, 2001).

Elektriciteitsproductie

Die 9% van de totale elektriciteitsopwekking is haalbaar door inzet van zon, wind, water en vooral biomassa (EZ, 2005). Naar verwachting draagt biomassa voor circa 3/4^e deel bij aan de beoogde 9%.

Een groot deel van die bijdrage bestaat uit de inzet van biomassa in kolencentrales en uit het verstoken van afval van biologische oorsprong in afvalverbrandingsinstallaties (AVI's).

Een klein deel van die inzet van biomassa bestaat uit verbranden van biomassa in kleinschalige installaties voor elektriciteitsopwekking. De schattingen voor het aantal, de grootte en het type van kleinschalige biomassa-installaties kennen een grote spreiding (o.a. Daey Ouwens, 2005).

Warmteproductie

Naast biomassa voor elektriciteit is er ook biomassaverbranding voor opwekking van warmte. Dit kan warmte zijn voor ruimteverwarming op basis van kleine houtkachels, of warmte voor stadsverwarming of proceswarmte.

2.1 Brandstofinzet

In Tabel 2.1 is een overzicht opgenomen van de biomassa-inzet in stationaire installaties in 2004 en een scenariobeeld voor 2020. Voor vuilverbranding is aangenomen dat de helft van de energie-inhoud betrekking heeft op biomassa (hier opgenomen) en de andere helft op producten gemaakt uit fossiele brandstof (niet opgenomen). De diverse biomassastromen kunnen met verschillende technologieën worden omgezet in elektriciteit en/of warmte. De hiervoor gebruikte biomassa-installaties, zoals genoemd in Tabel 2.1, worden in Hoofdstuk 4 nader toegelicht.

Tabel 2.1 *Brandstofverbruik aan biomassa in Nederland*

Installatie	Brandstof verbruik 2004 [PJ]	Brandstof verbruik 2020 'GE-scenario' [PJ]
Meestook kolencentrale	11,1	79,5
Meestook gascentrale		8,1
Bijstook kolencentrale (zie meestook)		
Bijstook gascentrale	2,8	0,0
Kleinschalige biomassa	3,3	4,1
Bio-olie in grote dieselmotoren		6,5 (Niet in GE-scenario)
Bijstook cement	1,7	
Grootschalige biomassa stand-alone		0,0
Vuilverbranding 50% duurz genomen	27,7	31,0

Mest- en GFT-vergisting	0,2	2,0
Stortgas	2,8	1,2
(waarvan fakkels)	0,8	
AWZI/RWZI	3,3	1,6
(waarvan fakkels)	0,2	
Houtkachels particulieren	9,3	7,5
Houtkachels industrie	1,9	1,9
Totaal	64,1	143,4

De cijfers voor 2004 zijn afkomstig van het CBS (CBS, 2005) aangevuld met cijfers van SenterNovem (Daey Ouwens, 2005). De hoeveelheid overig gas bij het CBS is verminderd met de inschatting van mest- en GFT-vergisting van SenterNovem (getal van vermeden fossiele energie) en toegerekend aan AWZI. De post overige biomassaverbranding bij het CBS is verminderd met de inschatting van cementovens van SenterNovem (getal van vermeden fossiele energie) en toegerekend aan kleinschalige biomassa. Tenslotte kan nog opgemerkt worden dat het CBS de onzekerheid bij houtkachels particulieren inschat op 25%. (De verdeling van deze post is 1,6 in openhaarden, 3,4 in inzethaarden en 4,2 in vrijstaande kachels.)

De cijfers van 2020 zijn afkomstig van het GE-scenario uit de Referentieramingen (ECN/MNP, 2005). Hierop zijn wel een aantal correcties aangebracht voor meer recente inzichten.

Voor inzet van bio-olie in grote dieselmotoren zijn anno 2004 nog geen installaties in gebruik. Wel bestaan er plannen voor enkele grote eenheden. Voor 2020 is daarom in de tabel een schatting gemaakt voor een totaal geïnstalleerd vermogen van 150 MW_e met een bedrijfstijd van 6000 uren per jaar, wat resulteert in een brandstofinzet van 6,5 PJ_{prim}. De inzet van bio-olie in grote dieselmotoren is nog niet voorzien in het GE-scenario, maar toch opgenomen in deze studie, omdat er inmiddels initiatieven worden ondernomen door diverse marktpartijen. Of deze installaties er werkelijk zullen komen is sterk afhankelijk van het beleid. Het voorgestelde penetratieniveau van 6,5 PJ_{prim} in 2020 heeft voornamelijk ten doel te kwantificeren wat de implicaties zijn van deze biomassa-optie.

In het huidige subsidiebeleid in Nederland geldt voor het bedrijven van kleine biomassagestookte installaties een MEP-tarief. Speciaal voor de inzet van bio-olie (palmolie) in grote dieselmotoren is er een apart tarief bepaald. Eind 2005 was dit 7,7 ct/kWh (De Vries et al., 2005). Actuele informatie, gespecificeerd naar vermogen en brandstof, is te vinden op www.enerq.nl. De MEP-subsidie maakt dat het opwekken van elektriciteit volgens deze route financieel rendabel wordt. De maximale grootte om in aanmerking te komen voor deze subsidie 50 MW_e. Vanwege de schaalvoordelen bij grotere vermogens is in de praktijk te zien dat de bio-olie installaties inderdaad op het maximaal toegestane vermogen ontworpen worden. Bijvoorbeeld het parallel schakelen van drie scheepsdiesels met een nageschakelde stoomcyclus teneinde een hoog rendement te halen. Rendementen kunnen in deze configuratie oplopen tot 50% (De Vries et al., 2005).

2.2 Recente trends en verwachtingen 2010

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de recente hoge energieprijzen lijken te leiden tot een toename van inzet van biomassa door particulieren. Dit wordt versterkt door verschillende marktpartijen die hierop inspelen. Zo gaat het 'Actieplan Biomassa' er van uit dat het opgestelde vermogen bio-WKK verbranding zal toenemen van 2,3 PJ in 2004 tot 8 - 18 PJ vermeden inzet van fossiele energie in 2010. Of deze voorgenomen plannen inderdaad gerealiseerd gaan worden hangt onder andere af van de vergunningverlening. In november 2005 had nog geen enkel project groter dan 10 MW_e een onherroepelijke vergunning (Daey Ouwens, 2005).

Daarnaast zal een aantal WKK-installaties op bio-olie gaan draaien, vooral in de glastuinbouw. Het bedrijf BIOX heeft concrete plannen om een aantal grote met bio-olie gestookte WKKinstallaties te bouwen (BioX, 2006). Aangenomen is dat voor deze toepassing in 2010 ongeveer 1,3 PJ/jaar aan bio-olie nodig zal zijn. In de glastuinbouw worden tevens ketels gestookt met bio-olie om de pieken in het aardgasverbruik op te vangen.

De verwachtingen voor bio-WKK installaties op hout lopen sterk uiteen, vooral omdat de verwachtingen rondom B-hout veel verschillen vertonen. In dit overzicht is ervan uitgegaan dat er in Nederland enkele installaties komen die hout met verontreinigingsklasse B stoken (o.a. bij Twence in Hengelo en Bruins en Kwast in Goor). De totale vraag naar B-hout uit deze installaties ligt dan in de orde grootte van 250 kton/jaar, omdat het in een aantal gevallen om relatief grote installaties gaat (15-25 MW_e). (Koppejan en De Boer-Meulman, 2005).

Volgens een recent door TNO uitgevoerde analyse naar de inzet van houtgestookte sfeerkachels bij particulieren werd er in 2003 ca. 5 PJ aan fossiele energiebesparing gerealiseerd door de verbranding van ca. 600 kton aan houtblokken (ca. 11 PJ) per jaar in 792.000 houtgestookte sfeerkachels (open haarden, vrijstaande kachels en inbouwhaarden) in Nederlandse huishoudens. Deze toepassing toont een licht dalende trend, vooral door een dalend aantal houtkachels in de huishoudens maar ook omdat de kachels die er staan wat minder vaak worden gebruikt. In de afgelopen vijf jaar zijn er aanzienlijk minder houtkachels verkocht dan in de jaren daarvoor. Bij de sfeerkachels kan dit worden verklaard door de overstap van houtgestookte naar gasgestookte sfeerkachels. Voor 2010 wordt nog een bijdrage van 5 PJ vermeden fossiel verwacht door het verstoken van 600 kton/jaar aan hout. Voor de langere termijn wordt verwacht dat de bijdrage van de houtkachels aan de duurzame energievoorziening in Nederland zal gaan afnemen (Koppejan en De Boer-Meulman, 2005). In tegenstelling hiermee, meldt het Duitse 'Umwelt Bundes Amt', voor Duitsland juist een toename in het aantal particuliere houtkachels (UBA, 2006a; 2006b). Misschien is deze trend mede ingegeven door de recente hoge olieprijsen, en zal dit ook in Nederland leiden tot extra biomassa-inzet door particulieren.

2.3 Van brandstofinzet naar emissies

De relatieve bijdrage van een biomassa installatie aan de totale Nederlandse biomassa gerelateerde PM-emissie hangt af van het product van (1) de brandstof inzet en (2) de emissiefactor per type installatie.

De biomassa opties met het grootste vermogen - met name bij- en meestook in kolencentrales - hebben een relatief goed te voorspellen omvang én een lage stofemissiefactor. Bij- en meestook in kolencentrales is daarmee een robuust onderdeel van de voorspelde totale biomassa gerelateerde PM-emissie in 2020. Tegenovergesteld hieraan resulteren onzekerheden in de inzet van relatief kleine biomassa-opties, met relatief hoge stof emissiefactoren, juist in relatief grote onzekerheden in de totale PM-raming voor 2020.

Met name de houtkachels van particulieren hebben een grote invloed op de onzekerheid in de geraamde totale emissie. Dit komt door de extreem hoge emissiefactor ten opzichte van andere opties. Kleine veranderingen in de inzet van particuliere houtkachels resulteren dus in relatief grote verandering in de totale geraamde emissie voor 2020. Om deze reden zijn de houtkachels particulieren ook opgenomen in een aparte tabel (Hoofdstuk 5, Tabel 5.2).

3. Emissienormen en rookgasreiniging

3.1 Emissienormen

In Nederland bestaan verschillende emissie-eisen voor houtstook. Voor de kleinere installaties <1 MW_{th} geldt momenteel de eis uit de Nederlandse emissierichtlijn (NER; artikel 3.3 F7, installaties voor verbranding van schoon resthout) van 50 mg/nm³ bij 11% O₂ (25 g/GJ). In de praktijk is dit moeilijk te handhaven en kan de waarde oplopen tot 100 mg/nm³. Deze waarde lijkt ook meer in lijn met de ondergrens van de in de praktijk gerapporteerde ondergrens van emissies van kleine installaties. In 2007 wordt deze eis mogelijk aangescherpt naar 13 mg/nm³ (circa 6,6 g/GJ) (Meuleman, 2002; op basis van VROM-circulaire voor stand alone verbranding van schone stromen). Door TNO wordt verder opgemerkt dat op dit moment de gemeente al toepassing van een doekfilter kan eisen (emissie wordt dan lager dan 10 mg/nm³ (5 g/GJ). Voor kleine installaties die de brandstof moeten inkopen is de investering in een houtgestookte installatie dan niet meer rendabel (Meulman en Koppejan, 2002).

Kolencentrales

Voor de emissies uit bijstook in kolencentrales van 'vuile' biomassa of afval geldt de mengregel (Meij en Te Winkel, 2003), waarbij voor het biomassa-aandeel een stof grenswaarde van 7,5 mg/m³ geldt. De emissiegrenswaarde van de brandstofmix voor stof (en daarnaast ook SO₂, NO_x, CO, HF en VOS) hangt daarbij af van de fractie meegestookte vuile biomassa en wordt als volgt berekend:

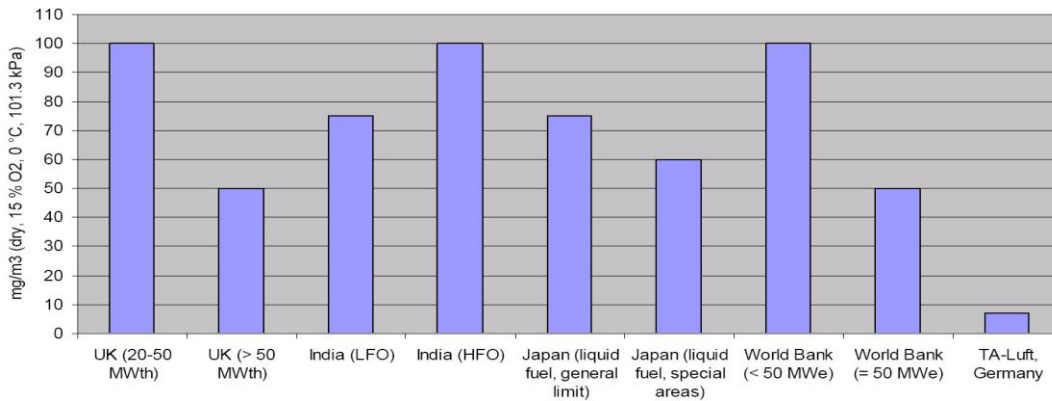
$$C = \frac{V_{afval} \times C_{afval} + V_{steenkool} \times C_{steenkool}}{V_{afval} + V_{steenkool}}$$

Waarin 'V' staat voor het volume van rookgasstromen en 'C' voor de PM₁₀-grenswaarde in de bij een brandstofstroom behorende rookgasstroom

Het komt er op neer dat de emissiegrenswaarde voor meestoken een gewogen gemiddelde is van de emissie voor puur kolenstoken en de eis voor het verbranden van alleen afval. De weging gebeurt op grond van de volumina van de rookgassengassen (V in bovengenoemde formule) afkomstig van kolen en van de secundaire brandstof (Meij en Te Winkel, 2003).

Grote diesel- en gasmotoren

Gegeven de toenemende initiatieven voor inzet van plantaardige oliën in dieselmotoren (zie ook Paragraaf 4.4) is in Figuur 3.1 een overzicht gegeven van enkele internationale PM-emissienormen voor grote dieselmotoren (100 mg/m³ komt in deze figuur overeen met 87 g/GJ). Tevens is in Figuur 3.2 ter vergelijking een grafiek opgenomen met de trends voor internationale regelgeving van PM₁₀- en NO_x-emissies in de transportsector. Het wegtransport is een sector die vooraan loopt vanwege de steeds strenger worden emissienormen (zie Figuur 3.2). (0,2 g PM/kWh komt in deze figuur overeen met ca. 20 g/GJ). De roetfilters uit de trucksector, beschikbaar voor motorvermogens tot ca. 0,5 MW, zullen naar verwachting ook worden toegepast in de binnenvaartsector tot motorvermogens van enkele MW's, een vermogensrange die in de buurt komt van kleine bio-WKK dieselmotoren. (zie bijvoorbeeld Van Rens en De Wilde, 2006), voor een overzicht van de beschikbare emissiereductietechnologieën voor dieselmotoren).

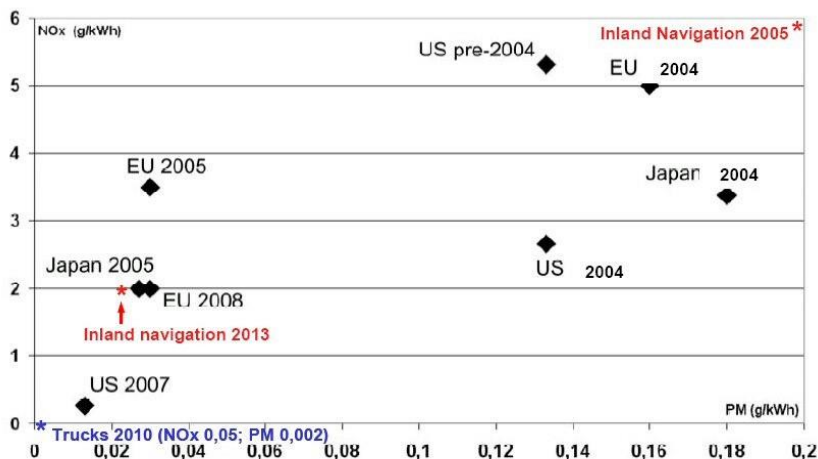


Figuur 3.1 Voorbeeld van diverse internationale PM-emissienormen voor grote zuigermotoren op diesel en gas

Bron: Hellén, 2006

Daarnaast noemt Hellén (2006) voorstellen voor verdergaande normstelling, waaronder:

- Een Amerikaans EPA-voorstel (Juni 2005) voor een deeltjesgrenswaarde in uitlaatgas van: $<0,12 \text{ g/kWh} = \text{ongeveer } >17 \text{ mg/nm}^3$ bij 15% O₂ (Methode ISO 9096). Dit is ca. 15 g/GJ.
- Een voorstel in Californië, USA, voor een deeltjesgrenswaarde $<0,01 \text{ g/kWh} = \text{ongeveer } >1,8 \text{ mg/nm}^3$ bij 15% O₂ (Methode 8178), voor PM₁₀. Dit is ca. 1,2-1,6 g/GJ (een exacte omrekening vanuit de publicatie is niet geheel duidelijk, vandaar de marge).



Figuur 3.2 Internationale emissienormen voor PM en NO_x voor zware vrachtwagens en binnenvaart.

Noot: Compilatie op basis van Acid News, 2004 en huidige en verwachte internationale normstelling voor de binnenvaart.

3.2 Rookgasreiniging

Bij het bijstoken wordt de voorverbrande of vergaste biomassa in de vuurhaard ingevoerd. Bij meestoken wordt de biomassa gelijk met de brandstof toegevoerd. Dit betekent dat de rookgassen van de biomassa dezelfde nabehandeling passeren als de rookgassen van de kolen. Dit komt neer op de elektrofilters waarin de vliegashouding wordt verwijderd, soms een De-NO_x installatie (waarvan er de komende jaren nog enkele bijkomen) en een rookgaswasser (FGD) die de SO₂ verwijdert. Naast het elektrostatische filter verwijdert ook de hierachter geschakelde rookgaswasser nog stof.

Volgens een recent overzicht over de historische ontwikkeling van stofemissies van kolencentrales (Meij, 2005) hangt de stofverwijderingsgraad van de rookgaswasser af van de stofconcentratie die reeds bereikt is door inzet van de voorgeschakelde elektrostatische filterinstallatie. Voor de nageschakelde rookgasontzwavelingsinstallatie (natte wasser) lijkt het hanteren van een verwijderingsgraad van 80% het

meest realistisch, met dien verstande dat bij hele lage stofconcentraties ($<10 \text{ mg/m}^3$) de verwijderingsgraad afneemt. Een dergelijke verwijderingsgraad is gebaseerd op de totaal verwijderde massa. De efficiency van een scrubber om stof te verwijderen is echter deeltjesgrootte afhankelijk. Bij kleine deeltjes neemt de efficiency af, tot zelfs zeer lage waarden voor sub-micron grootte. Het doorgelaten stof bestaat daardoor juist uit zeer fijn materiaal (waarschijnlijk $<PM_{2.5}$). Mogelijk neemt de verwijderingsgraad bij lage stofconcentraties af mede omdat lage concentraties bijna synoniem zijn met een groot percentage kleine deeltjes. Bij een hoge concentratie wordt 89% van de stof verwijderd. Bij een lage concentratie (4 mg/m^3 voor de rookgasontzwavelingsinstallatie) kan dit dalen naar 50%. Bij nog lagere concentraties (ca. 1 mg/m^3) is geen extra reductie met natte rookgaswassing waar te nemen. Hierbij moet wel gemeld worden dat soms 50% van de stof na de rookgaswassing bestaat uit kalk/gipsresten die gevormd zijn door het verdampen van kleine waterdruppeltjes. Gesteld wordt dat de gemiddelde emissie van kolencentrales in Nederland beneden de 5 mg/m^3 ligt. Dit wordt opgebouwd uit 20 mg/m^3 voor de FGD en 80% reductie. Dit is 4 mg/m^3 (ongeveer $1,5 \text{ g/GJ}$ kolen) na de rookgasontzwavelingsinstallatie (afgerond in $<5 \text{ mg/m}^3$; $1,8 \text{ g/GJ}$ kolen).

Overigens meldt KEMA de nodige problemen met het meten van de deeltjes. Om te kijken of voldaan wordt aan de limiet van 20 mg/m^3 ($7,2 \text{ g/GJ}$), wordt er continue gemeten voor de FGD en met apparatuur die voor 100 mg/m^3 geschikt is. Wordt er voor de FGD een lagere concentratie dan 100 mg/m^3 gemeten, dan kan er van uitgegaan worden dat na de FGD aan de Nederlandse emissie-eis wordt voldaan. Na de FGD wordt de continue meting verstoord door de aanwezigheid van kleine waterdruppeltjes, zodat de meting dus vóór de FGD moet gebeuren.

Dieselroetfilters

Een dieselroetfilter, (particulate trap/filter) is een relatief simpel apparaat. Afhankelijk van het filtertype kan meer dan 80% van de massa roet worden afgevangen. Of roetfilters ook de oplosbare organische deeltjesfractie afvangen, hangt af van de uitlaatgastemperatuur en het soort filterregeneratie techniek dat wordt gebruikt. De afgevangen deeltjes resulteren namelijk in een steeds verder oplopende tegendruk van de motor. Deze tegendruk beïnvloedt het brandstofverbruik van de motor, zodat de deeltjes periodiek moeten worden verwijderd door regeneratie van het filter. Zie Van Rens en De Wilde (2005) voor een overzicht van de verschillende technologieën.

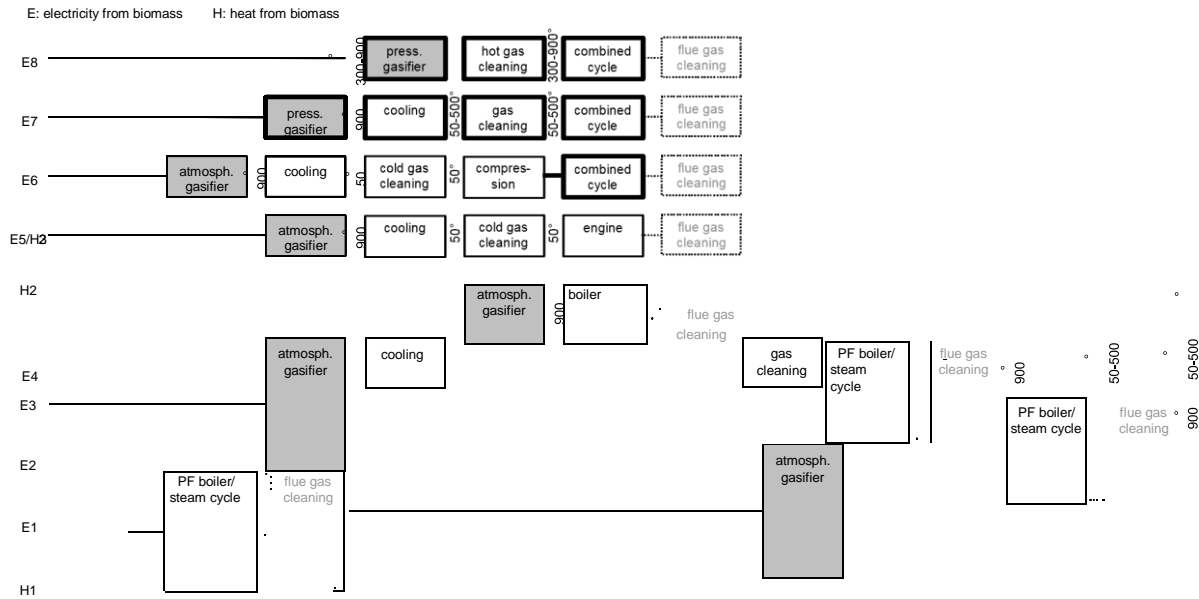
Elektrostatisch filter

Een elektrostatisch filter (ESP; Electrostatic Precipitation Filter) wordt gebruikt voor deeltjesverwijdering uit de rookgassen van elektriciteitscentrales. Daarnaast kan een dergelijk filter eveneens worden gebruikt voor het verwijderen van deeltjes uit een stationaire dieselmotor (Van Rens en De Wilde, 2005). In principe is deze techniek ook geschikt voor zware dieselmotoren zoals die mogelijk voorzien zijn voor bio-oliegestookte dieselmotoren (zie ook Hellén, 2006).

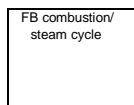
4. Biomassa installaties en emissiefactoren

De verschillende technieken voor het valoriseren van energie uit biomassa in gebruik in Nederland zijn samengevat in Tabel 2.1. De belangrijkste processen zijn gebaseerd op verbranding, waarvan de vrijkomende energie gebruikt wordt voor de opwekking van elektriciteit en/of warmte. Een kleine bijdrage komt van enkele vergistingsprocessen. Bovenstaande processen worden in de hierna volgende paragrafen besproken, gebaseerd op een nog te verschijnen publicatie (Daniëls et al., 2006).

De meest relevante technologieën voor het opwekken van elektriciteit (en warmte) uit biomassa zijn kort samengevat in Figuur 4.1 (Van der Drift, 2005).

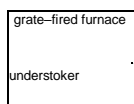


Figuur 4.1
biomassa



Overzicht van de technologieën voor elektriciteit- en warmteopwekking uit

De conversie chemische hetgeen het Overigens biomassa



van biomassa levert altijd reststromen, met name de as. De hoeveelheid en de samenstelling van de biomassa as verschilt significant van kolen (of olie/gas), functioneren van de gasreiniging kan beïnvloeden (zie ook Paragraaf 3.2). blijkt uit diverse studies dat de vermeden CO₂ emissie door inzet van deels teniet wordt gedaan door emissies van het broeikasgas lachgas (N₂O), met name bij gebruik van kunstmest tijdens de biomassateelt. Over de omvang van dit effect bestaan nog veel onzekerheden (zie o.a. Croetzen en Kampman, 2005).

4.1 Meestook gascentrales

In Nederland is er in het huidige elektriciteitspark ongeveer 10000 MW_e aan gasgestookt vermogen beschikbaar. Het is mogelijk om in een deel van dat vermogen biomassa in te zetten. Daartoe is het noodzakelijk om de biomassa in te zetten in een vorm die in te passen is in de gascentrale, waarbij het uitmaakt of het een conventionele gascentrale betreft of een STEG. Meestoken is mogelijk op twee manieren, waarbij steeds de technische randvoorwaarden van de centrale van belang zijn. Is er sprake van een gasgestookte stoomketel, dan kan er bio-olie meegestookt worden in die ketel, met speciale branders. Ook is het technisch mogelijk om bio-olie te verbranden in een gasturbine (tenminste als de specificaties van de gasturbine dat toestaan), maar dat levert tegelijkertijd een aantal technische problemen op. De eerste optie kan gebruikt worden bij alle gasgestookte stoomketels, de tweede alleen bij combi-eenheden (gasturbine voorgeschakeld aan een stoomketel). Meestoken van bio-olie gebeurt in Nederland in centrales die ontworpen zijn om op twee brandstoffen te kunnen functioneren: dit zijn de Harculocentrale (350 MW, Electrabel) en de Clauscentrale (1280 MW, Essent). In het jaar 2004 ging het om 0,4 PJ olie in de Harculocentrale en 3,1 PJ olie voor de Clauscentrale (cijfers afkomstig uit overheidsmilieujaarverslag). Overigens is ook in de kolencentrale Gelderland 13 bio-olie bijgestookt.

Het overheidsmilieujaarverslag van de Clauscentrale in Maasbracht (eenheid A en eenheid vermeld (gemiddelde) emissiefactoren van 4 g SO₂/GJ, 10 g stof/GJ en 60 g NO_x/GJ bio-olie (Seebregts en Volkers, 2005). Hierin zijn de cijfers voor aardgasstook en bio-oliestook separaat opgenomen. De centrale van Harculo vermeldt in het milieujaarverslag voor het bio-oliedeel echter geen aparte stofemissies, zwavelgehaltes of SO₂-emissie. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de beschikbare emissiefactoren voor SO₂, NO_x en fijn stof voor meestook van vloeibare biomassa. Overigens is de duurzaamheid van palmolie omstreden, omdat

verschillende partijen wijzen op ecologische problemen (kap primair tropisch regenwoud voor olieplantages) en sociale problemen (landonteigening lokale bevolking, beperking voedselvoorziening).

Tabel 4.1 *Vloeibare biomassa: emissiefactoren SO₂, NO_x en fijn stof*

	SO ₂ [g/GJ]	NO _x [g/GJ]	Fijn stof [g/GJ]
Gemeten 1	4,4	66,5	12,2
Gemeten 2	2,6	53,8	7,2
Gemiddeld	ca. 4	ca. 60	ca. 10

Bijstook gascentrale

Hier geldt, net als bij bijstoken in kolencentrales, dat de biomassa eerst voorberekt wordt. De meest voor de hand liggende configuratie is de vergassing van biomassa en het bijstoken van het syngas in de gasturbine. De belangrijkste beperking hierbij is de energieinhoud van het gas uit de vergassingsinstallatie, en de beperkingen die het ontwerp van de gasturbine stelt aan de samenstelling van de brandstof (voornamelijk de hoeveelheid waterstof). Het maximale bijstookpercentage hangt af van het type vergasser dat gekozen wordt. Deze techniek wordt pas op grote schaal inzetbaar geacht vanaf het jaar 2015. Hiervoor zouden alleen STEG-installaties in aanmerking komen. Mogelijkheden zijn de STEG eenheden van de Eemscentrale en diverse in bedrijf zijnde WKK-STEGs.

4.2 Bij- en meestoken biomassa in kolencentrales

Een groot deel van de elektriciteit wordt in Nederland opgewekt met (geïmporteerde) steenkool. Vele soorten biomassa kunnen op een makkelijke manier worden gebruikt ter verdringing van kolen in de bestaande kolengestookte centrales. Door de MEP subsidieregeling kan dit ook op een kosteneffectieve wijze. In principe zijn er twee technologische opties om dit te realiseren, zoals schematisch is weergegeven in Figuur 4.2.

Meestook kolencentrale

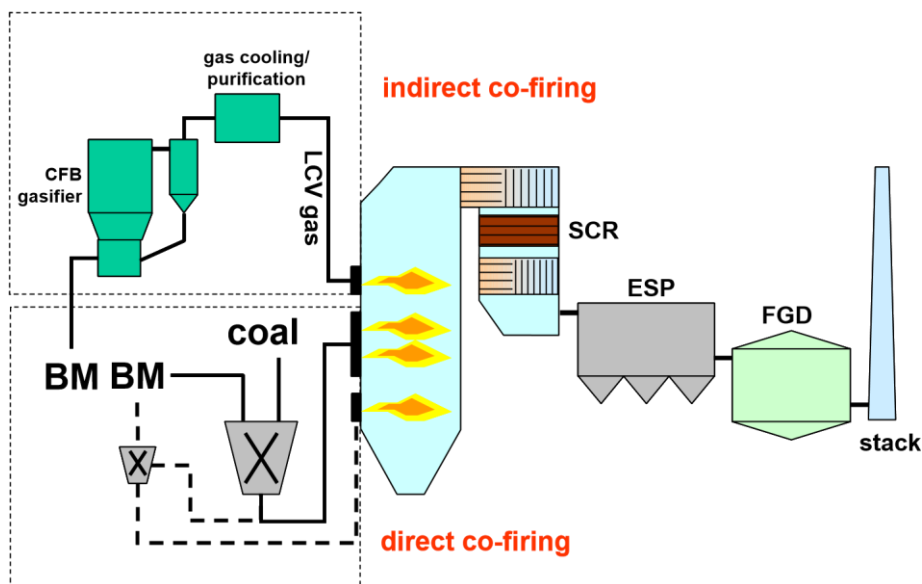
In kolencentrales kan biomassa worden meegestookt. In de meest eenvoudige situatie wordt biomassa zonder thermische voorbereking verstoekt samen met steenkool in de bestaande branders. Dit kan bijvoorbeeld met brandstoffen als olijfpitten, cacaodoppen. De biomassa wordt dan op de kolenband gemengd met de kolen, aansluitend verkleind in de reeds aanwezige kolenmolens en samen met het kolenpoeder via de bestaande branders aan de centrale gevoed en verbrand m.b.v. conventionele kolenbranders (directe meestook). Niet alle biomassastromen lenen zich daarvoor, wat vooral samenhangt met de maalbaarheid van de biomassa. Daarom wordt in sommige gevallen de biomassa separaat verpoederd en aan de centrale gevoed m.b.v. speciale branders. Er wordt dan gesproken over indirecte meestook. In beide bovengenoemde gevallen, komen alle (organische zowel als anorganische) biomassa bestanddelen terecht in de ketel, en kunnen zij de kwaliteit van vliegas alsmede de rookgassamenstelling beïnvloeden. Deze opties vallen onder de term *meestoken* (direct co-firing), en komt overeen met de technologische route E2 in Figuur 4.1. Het stoken van bio-olie in gasgestookte centrales valt ook onder deze categorie E2.

Bijstook kolencentrale

Op de langere termijn kan het noodzakelijk zijn om naast het meestoken ook bijstookinstallaties in gebruik te nemen. Bij deze route wordt biomassa in een aparte installatie vergast of verbrand, waarna het aldus opgewekte syngas of verbrandingsgas doorgeleid wordt naar de conventionele kolencentrale. Deze optie wordt *bijstoken* (indirect co-firing) genoemd, en is overeenkomstig met de route E3 en E4 in Figuur 4.1 Ook de voorbereking torrefactie (het thermisch voorbehandelen van biomassa waardoor de maalbaarheid toeneemt) is een mogelijke extra processtap.

Een voordeel van bijstoken is dat de assamenstelling, t.o.v. kolen as, vrijwel niet wordt beïnvloed. De kwaliteit van de vliegas is namelijk een parameter die zeer belangrijk is voor het gebruik van deze reststroom

in bij voorbeeld de cementindustrie. Een tweede voordeel van bijstoken betreft de mogelijkheid om gemengde afvalstromen (zoals RDF, een afgescheiden homogene hoogcalorische (meng)stroom uit afval) in te zetten. Dergelijke brandstoffen zijn vaak goedkoop kunnen zelfs een negatieve prijs hebben. Dat kan dan compenseren voor de hogere investeringslasten van bijstook ten opzichte van meestook. Op langere termijn is het echter mogelijk dat ook voor bijstoken andere, duurdere brandstoffen nodig zijn om doelen te halen of vanwege beperkingen in het aanbod. Omdat er in Nederland nu nog volop mogelijkheid is om biomassa in bestaande centrales mee te stoken wordt er van de duurdere bijstookroute vooralsnog weinig verwacht.



Figuur 4.2 Mee- en bijstoken van biomassa in een (kolengestookte) elektriciteitscentrale

De rookgassen van de biomassa passeren dezelfde nabehandeling als de rookgassen van de kolen. Dit komt neer op de elektrofilters waarin de vliegas wordt verwijderd, soms een De-NO_x installatie (waarvan er de komende jaren nog enkele bijkomen) en een natte wassing in een rookgasontzwavelingsinstallatie (ROI; Engels: Flue Gas Desulfurisation, FGD), die de SO₂ verwijdert. Na het elektrostatische filter verwijdert ook de rookgaswasser nog stof.

Allereerst blijkt uit de milieujaarverslagen van bedrijven dat bij kolenstook de meeste emissie van fijn stof vaak niet uit de schoorsteen komt, maar vrijkomt bij de kolenopslag en de opslag van vliegas en bodemas. In het geval van stofemissies uit de kolenopslag betreft dus onverbrand materiaal met een andere samenstelling en deeltjesgrootteverdeling (grover materiaal). De opslag is ook de grootste bron van grof stof. Bij een aantal verslagen is niet duidelijk of dit alleen de schoorsteenemissies betreft of de totale emissies. In de tabel is in dat geval de emissie neer gezet op de plaats waar deze het best leek te passen.

Tabel 4.2 Stof-emissiefactoren van kolencentrales in g/GJ brandstof

Eenheid	Bors. 12	Bors. 12	Geld. 13	Amer 8	Amer 9	MV1	MV2	Hemw. 8	KV STEG
Jaar	2003	2004	2001	2004	2004	2004	2004	2004	2004
Verbranding									
Fijn stof	0,5	1,5		0,2	0,2			0,3	0,1
Grof stof	0,1	0,4		1,3	0,1			0,4	0,6
Hele locatie									
Fijn stof	2,3	2,4	1,4			2,0	2,4		0,8
Grof stof	12,7	10,5							5,3

Specifieke emissiecijfers voor biomassa bijstook worden beperkt in de literatuur gerapporteerd. Wel is in 2003 door KEMA een uitvoerige meetcampagne uitgevoerd tijdens het meestoken van 12% biomassa op massa

basis in de Centrale Maasvlakte. De onderzochte eenheid was net helemaal gereviseerd, zodat de elektrostatische filterinstallatie optimaal werkte. De gemeten stofconcentratie, zowel voor als na de ROI bedroeg ca. 1 mg/m³. Daarnaast is er eind 2004 een vergelijkbare meetcampagne uitgevoerd bij de Amercentrale 8, tijdens het meestoken van 20% schoon hout op massa basis. De voorlopige cijfers geven aan dat de stofconcentratie voor de ROI ca. 53 mg/m³ bedroeg en na de ROI ca. 10 mg/m³ (deze concentraties zijn relatief hoog vanwege de samenstelling van de kolen, die resulteerde in een ongunstig afvangrendement van het ESP; namelijk laagzwavelige kolen, <0,6% in combinatie met een kritische assamenstelling; zie Meij en Te Winkel (2005) voor details)¹.

De meeste biomassa, bijvoorbeeld houtachtige stromen, hebben een (veel) lager asgehalte dan steenkool zowel op basis van gewicht als per eenheid energie input. Vanwege het lagere asgehalte in biomassa zou een lagere emissie verwacht kunnen worden. Echter hier is een nuancering op zijn plaats gegeven het feit dat biomassa naar verwachting fijnere as produceert dan steenkool, terwijl de efficiëntie van de filterinstallaties sterk terug loopt bij kleine deeltjesdiameters, met name in het sub-micron (<PM₁) bereik. De uiteindelijke emissie wordt echter ook bepaald door de efficiëntie van de rookgasreiniging, die wordt beïnvloed door de elektrische eigenschappen van een asdeeltje en de deeltjesgrootte (zie ook Paragraaf 3.2, Rookgasreiniging). Ook zijn er de emissies bij brandstofvoorbereiding en asverwerking. Bovendien kan nog opgemerkt worden dat de stofdeeltjes van biomassastook voor een deel een ander karakter hebben dan de deeltjes van kolenstook.

In Tabel 4.3 staan berekende PM₁₀-emissiefactoren voor het meestoken van biomassa in kolengestookte e-centrales.

Tabel 4.3 *Fijn stof emissiefactoren bij het meestoken van biomassa*

Brandstof (verhouding % w/w)	Vermogen [MW _e]	Rookgasreiniging	Emissiefactor [g/GJ]
Kolen/diermeel/hout (90/8/2)	520	ESP/ROI	0,3
Kolen	750	SCR/ESP/ROI	0,6
Kolen/rioolslib (95/5)	750	SCR/ESP/ROI	0,5
Kolen	485	ESP	8,7
Kolen/graaan bijproduct (93/7)	450	ESP	6,2

Noot 1: Onder PM₁₀-emissies worden hier de totale stofemissies bedoeld, omdat het grootste deel deeltjes gemeten na de ESP een kleiner diameter heeft dan 10 µm (zie Figuur 4.2).

Noot 2: De stofemissie, zowel bij kolen alsmede bij kolen/biomassa meestoken, komen overeen qua ordegrrootte met simpele som: (emitted dust %) = (fuel flow)*(fuel ash %)*(fly ash %)*(1-ηESP)*(1- ηFGD), waarbij de deeltjes verwijdering efficiency (η) van de ESP en ROI respectievelijk 99,7 en 95% bedragen.

4.2.1 Zwavelgehalte en SO₂ emissies

Bijstook of meestook van biomassa zal niet direct grote effecten op de SO₂ emissie hebben. In Tabel 4.4 staan gemiddelde emissiecijfers voor Nederlandse kolencentrales (Seebregts en Volkens, 2005). Nagegaan is wat het zwavelgehalte van biomassa is (Tabel 4.5). Dit blijkt sterk te variëren, maar komt voor de biomassa(afval)stromen dicht in de buurt van laagzwavelige kolen (zie onderste rij in Tabel 4.5). Schone biomassa(rest)stromen hebben over het algemeen een lager zwavelgehalte en zullen naar verwachting tot een daling van de SO₂-emissie van de centrale leiden. Zoals in besproken in Paragraaf 3.1 speelt het zwavelgehalte eveneens een belangrijke rol (althans voor kolen) voor het stofverwijderingsrendement, vanwege de vorming van een laagje zwavelzuur op de as. Dit laagje bevordert de elektrische geleidbaarheid, en daarmee de afvangefficiëntie in het elektrostatisch filter.

Tabel 4.4 *Gemiddelde SO₂-emissiefactoren*

[g/GJ]	2000	2001	2002	2003	2004
--------	------	------	------	------	------

¹ Storingen aan de ontzwavelingsinstallatie komen wel eens voor. De stof emissie neemt dan tijdelijk met een factor 5 toe, maar uitgemiddeld over een jaar is het effect nauwelijks merkbaar. Storingen aan de stofafvangst geven direct een grote overlast in de directe omgeving en blijken in de praktijk nauwelijks voor te komen. Door continue meting wordt de efficiency van de stofafvangst en de werking van de filters in de gaten gehouden.

SO ₂	64	61	52	41	41
NO _x	104	110	102	103	95

Tabel 4.5 *Zwavelgehalte van biomassa*

	Gewichtspercentage zwavel [%]	Bron
Centrale met biomassa (afval)stromen	0,57 (range <0,1 tot 0,7%)	Milieujaarverslag
Centrale met bio-olie	0,008%	Milieujaarverslag
Centrale met mix van biomassa reststromen	0,25% / 0,3%	Milieujaarverslag
Centrale met vooral hout	0,14% (waarvan hout 0,12)	Milieujaarverslag
Centrale met vooral hout Raapolie	0,1 / 0,09%	Milieujaarverslag
Zuivere hout Chips	0,0015 / 0,0009%	
Stro	0,004%	(Huber, 1998)
Hele plant	0,047%	(Huber, 1998)
Amer centrale; eenheid 9	0,097%	(Huber, 1998)
	0,09 (deels houtvergassing)	

Ter vergelijking:

Kolen (Amer 8, 9; 2001-2004) 0,59 - 0,84% (Seebregts en Volkers, 2005)

Noot: Het zwavelgehalte in steenkool varieert veel sterker (range ca. 0,3 - 3%). Door menging van verschillende partijen kolen wordt een constanter zwavelgehalte bereikt.

4.3 Industriële installaties

Industriële installaties kunnen kachels bevatten die sterk vergelijkbaar zijn degene die nog in woningen gebruikt worden. Zie bijvoorbeeld de door ECN geteste kachel uit Tabel 4.6 (ECN, 1999). Dit kan oplopen naar grotere ketels van 1 MW. Daarna komen er nog grotere installaties voor, die niet meer voor ruimteverwarming worden gebruikt maar bijvoorbeeld voor stoomopwekking al dan niet gecombineerd met elektriciteitsproductie uit de vrijkomende stoom. Tenslotte zijn er installaties die beginnen met een vergassingstap waarna er met een gasturbine of gasmotor gewerkt kan worden voor de elektriciteitsproductie. Omdat in dit laatste concept het door vergassing ontstane stookgas, na vergaande gasreiniging, eerst in een gasmotor verbrand wordt, resulteert dit traject in relatief lage emissies PM₁₀.

Tabel 4.6 *Emissiefactoren voor twee houtkachels bij ECN*

[g/GJ]	Merantibriketten		Bekistingshout
	50 kW		70 kW
CO	112,5		21,5
CxHy	6		1,5
NO _x	112,5		300
Stof	5		21,5
SO ₂	-		18

Voor industriële installaties noemt (Huber, 1998) diverse emissiefactoren voor stof. Het gaat hierbij om installaties met een zekere stofafvang. Dit maakt duidelijk dat bij schone biomassa en een filter een emissie van 10 g/GJ haalbaar is, tenzij een speciaal product als stro gestookt wordt.

Tabel 4.7 *Stofemissie factoren*

	Plant 1	Plant 2	Plant 3
--	---------	---------	---------

Type	WKK	Warmte	Warmte
Capaciteit	11 MW	1 MW	0,6 MW
Rookgasreiniging	Elektrostatisch filter	Cycloon en zakfilter	Cycloon en elektrostatisch filter
Brandstof	Hout chips; en hele gewas	Hout chips; en hele gewas	Hout chips en stro
Stof emissiefactor [g/GJ]			
Situatie 1	2,9	4,6	124
Situatie 2	9,3	19	174
Situatie 3		6,1	187

Tabel 4.8 *Andere emissiefactoren (gemiddeld)*

[g/GJ]	SO ₂	NO _x [g/GJ]
Hout	5	71
Stro	51	132
Hele plant	74	127

In Nederland is er de Houtinstallatie in Cuijk. In deze installatie wordt schoon hout via de wervelbedtechniek verbrand. De centrale van Essent te Cuijk heeft rookgasreiniging, bestaande uit elektrostatische filtering en niet-selectieve katalytische NO_x-reductie met behulp van injectie van ammonia in de vuurhaard. De centrale heeft een vermogen van 24 MW_e, valt niet onder de MER-plicht (ECN, 1998)). Uit het milieujarverslag (Essent, 2005) kunnen emissiefactoren berekend worden. Er staan ook maandwaarden in het rapport. Voor SO₂ variëren deze tussen de 0 (komt vaak voor) en de 2 g/GJ. De hoogste maandwaarde voor stof ligt rond de 6 g/GJ. Tabel 4.9 *Emissiefactoren wervelbedketel in Cuijk (24 MW_e)*

SO ₂ [g/GJ]	NO _x [g/GJ]	Fijn stof [g/GJ]
0,3	48	3,1

In het referentiedocument van de IPPC, 'Integrated Pollution and Prevention Control' (IPPC, 2005) staan de emissies van twee grote ketels (45 MW_{th}) die gestookt worden op houtresten van een spaanplaatfabriek (zie Tabel 4.3). De installatie heeft een pulserend zakkenfilter (IPPC, 2005; pag 307). Met de stoom die wordt geproduceerd wordt ook elektriciteit gemaakt. In hetzelfde document wordt ook een houtgestookte installatie genoemd met een zakkenfilter en een emissie van circa 2 g/GJ fijn stof (3,4 tot 4,3 mg/nm³ bij 11% O₂; pag. 313). Ook zijn er gegevens opgenomen van een aantal installaties die stro stoken (zie Tabel 4.11).

Tabel 4.10 *Emissiefactoren houtresten in 45 MW_{th} installatie*

	g/GJ
Stof	1,1
SO ₂	0,9
NO _x	91,3
CO	59,0
HCL	2,9
HF	0,0

Tabel 4.11 *Emissiefactoren (g/GJ) van stro gestookte installaties van 50-70 MW_{th}*

Vermogen (th)	13 MW	21 MW	20 MW
Filter	Zakkenfilter	Elektrostatisch filter	Zakken filter
	13	21	20
CO	65	24	17
	107	81	73
Stof	4,8	7,1	0,2
	4,8	9,5	0,7
NO _x	180	111	84
	219	151	108
SO ₂	53	45	54
	57	56	65

De technologie die in deze optie genoemd wordt is de circulerend wervelbedvergasser gekoppeld aan een STEG. Omdat deze installatie nog in ontwikkeling is zijn geen meetgegevens over de overige emissies. In Tabel 4.12 zijn emissiegegevens overgenomen uit het Värnamo Project (Babu, 2002), een kleine wervelbedvergasser van 18 MW_{th}.

Tabel 4.12 *Emissiefactoren CFB biomassa vergasser (in g/GJ; aanname 6% O₂)*

	Factor laag	Factor hoog	Gemiddeld g/GJ biomassa
NO _x	34	87	60,5
SO ₂	5	10	7,5
CO	20	80	50
CH	0	1	0,5
Dust		2	1

Gezien het voorgaande kan geconcludeerd worden dat kleinere houtverbrandingsinstallaties een PM₁₀-emissie van circa 10-20 g/GJ zullen hebben (variatie van 2 tot >100). Voor de grote installaties zal meestal een vorm van stofafvang beschikbaar zijn. Emissie zullen dan uitkomen in de range van 1 tot 10 g/GJ.

Opgemerkt kan nog worden dat installaties die gestookt worden op stro of geperste planten (resten van koolzaadolie) een relatief hoge stofemissie te hebben van 100 tot 150 g/GJ. Dit is 3 tot 5 keer zo hoog als bij hout. Ook NO_x emissies liggen hoger en wel een factor 2 tot 3. Van de stofemissie bij verbranding van éénjarige gewassen is 65 tot 95% van de asdeeltjes kleiner dan 10 µm. Bij halmgewassen is het aantal submicrondeeltjes zelfs erg groot (circa 80% <1 µm). Bij Houtverbranding is dit circa 35%. (LfU, 2000, Pag 112).

4.4 Dieselmotoren op plantenolie

Installaties die op bio-olie gestookt worden zijn eigenlijk een sub-categorie van de kleinschalige biomassa installaties. Deze installaties kunnen bijvoorbeeld bestaan uit meerdere parallel geschakelde dieselmotoren met een nageschakelde stoomcyclus. Ook is toepassing mogelijk in gasmotoren en dual-fuel motoren, maar deze opties zijn technisch lastiger (bijvoorbeeld vanwege de noodzakelijke vergassingsstap). Bio-olie (mee)stoken in hout- of gasketels is ook mogelijk maar dat levert een lager rendement op.

Voor gebruik in scheepsdieselmotoren is kwalitatief goede palmolie nodig, zonder vetzuren. Ook is een zuiveringsstap nodig om het fosfor uit de palmolie te halen, hetgeen belangrijk is voor NO_x-filters. Het elektrisch rendement van bio-olie in een grote dieselmotor ligt met 40-45% vrij hoog. Wanneer een afgassenketel met een stoomturbine wordt nageschakeld, kan met de 'combined cycle' een elektrisch rendement van rond de 50% worden gehaald (De Vries et al., 2005). Speciaal voor de inzet van bio-olie (palmolie) in grote dieselmotoren is er een apart tarief bepaald (zie ook Paragraaf 2.1). Op dit moment wordt gesproken over enkele initiatieven in de markt, met een gezamenlijke omvang in de orde van 150 MW_e.

Globale meetgegevens van een drietal dieselmotoren op plantenzie olie die in WKK voor blokverwarming worden gebruikt (Widmann, 2002). De rapportage bevat ook gegevens over op en afregelen en over deellast die van de hier gepresenteerde emissies afwijken. De grootste motor is voorzien van een roetfilter. Bij regeneratie van dit filter ontstaan er tijdelijk veel hogere emissies. De in Tabel 4.13 gepresenteerde stofemissies liggen duidelijk hoger dan de meeste grenswaarden voor grote dieselmotoren zoals gegeven in Figuur 3.1 (Hellén, 2006). Tabel 4.13 *Diverse emissies van dieselmotoren op plantenzie olie*

	Vermogen [kW _e]	CO [g/GJ]	CxHy [g/GJ]	NO _x [g/GJ]	Stof [g/GJ]
Motor 1	110	64	4	912	25 zonder en 1 met roetfilter
Motor 2	40	16	8	1024	29
Motor 3	8	7	1,4	632	29

Op pagina 378 en 405 van het referentiedocument over vuurhaarden van de IPPC wordt ingegaan op de stofemissie van grote dieselmotoren (IPPC, 2005). Daar wordt geconstateerd dat voor motoren tot 1,3 MW filters beschikbaar zijn en emissies beneden de 20 mg/nm³ bij 15% O₂ (17 g/GJ) mogelijk zijn. Voor de grotere motoren zijn filters nog in ontwikkeling en ligt het haalbare niveau op dit moment op 30 mg/nm³ (26 g/GJ).

4.5 Gasmotoren

Onder vergistingsopties vallen mest- en GFT-vergisting, energieopwekking uit stortgas en afvalwaterzuiveringsinstallaties (AWZI) en rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI). In al deze technieken gaat het echter om het verbranden van een brandbaar gas (in een gasmotor danwel in fakkelininstallaties).

Bij het Deense gasinstituut wordt veel onderzoek gedaan naar rookgasreiniging bij gasmotoren. Bij 1 van de onderzoeken is een inventarisatie gemaakt van de emissies van gasmotoren en kleine gasturbines (alle <25 MW). Hieruit bleek o.a. dat de emissie van VOS tussen de 1 en 6% van het brandstofverbruik bedraagt (Kritensen, 2004). Hoewel er veel gasmotoren op biogas zijn in Denemarken wordt er omdat er geen emissie-eisen zijn, weinig aan gemeten. In het Deense onderzoek zijn 14 oude data sets gebruik en nog 7 nieuwe metingen uitgevoerd. Het gaat om gasmotoren die werken op biogas uit mest, maar ook om stortgas en gistinggas van waterzuiveringinstallaties. Het gistinggas bestaan voor ongeveer 65% uit CH₄ en voor 35% uit CO₂. In de onderstaande tabel zijn de gemiddelde meetgegevens van een aantal gemeten componenten opgenomen. Ter vergelijking zijn in Tabel 4.14 ook cijfers van aardgasmotoren en gasturbines opgenomen. De gemiddelde emissiefactor voor biogasmotoren van PM₁₀ ligt op 0,5 g/GJ. Deze stofemissies liggen een factor 2 á 3 hoger dan stofemissies bij inzet van aardgas in een gasmotor. Bij de hele kleine deeltjes, de fractie PM₁, is het verschil kleiner (Tabel 4.14). Tabel 4.14 *Emissiefactoren uit Denemarken*

Emissie	Unit	Gasmotor aardgas	Gasmotor biogas	Gasturbine
NO _x	[g/GJ]	168	540	124
UHC (VOS)	[g/GJ]	485	254	<2,3
waarvan CH ₄	[g/GJ]	520	323	<1,5
waarvan NMVOC	[g/GJ]	117	14	<1,4
CO	[g/GJ]	175	>273	6
N ₂ O	[g/GJ]	1,3	0,5	2,2
Totaal vaste deeltjes	[g/GJ]	0,76	2,63	0,1
PM ₁₀	[g/GJ]	0,19	0,45	0,061
PM _{2,5}	[g/GJ]	0,16	0,21	0,051
PM ₁	[g/GJ]	0,14	0,13	0,038
PAK (benz[a]pyren-equivalent)	[mg/GJ]	<0,023	<0,003	<0,005
Formaldehyde	[g/GJ]	24	21,2	0,01
Acetaldehyde	[g/GJ]	1,88	0,11	0

SO ₂	[g/GJ]	x	19	x
Geur (Odour)	[OU/m ³]	8229	18516	2027
Efficiëncie (kracht)	[%]	38,3	36	28,8
Brandstofverbruik Denemarken	[PJ in 2000]	34,8	2,2	9,3

In een andere studie heeft LQM (2002) specifiek gemeten bij gasmotoren op stortgas. Ook hier liggen de stofemissies laag. Zie Tabel 4.15. Er is ook gemeten aan een dieselmotor die stortgas gebruikte aangevuld met 6% diesel voor de ontsteking. Hier liggen de stofemissies hoger. De stofemissie is hier bepaald door een filter te wegen. Het kan dan ook zijn dat ook deeltjes groter dan 10 micrometer zijn meegewogen. Voor fakkels is niet gemeten. In het rapport wordt een getal genoemd van 5,5 mg/nm³ rookgas bij 3% zuurstof (circa 1,5 g/GJ) afkomstig uit een database.

Tabel 4.15 *Emissiefactoren voor stortgas*

[g/GJ]	Gasmotor (gemiddelde van 7)	Dual fuel dieselmotor, gebruikt ook 6% diesel
CO ₂	83.800	93.400
Sox	27	42
NO _x	211	523
CO	421	521
HCl	29	0,6
HF	3,0	1,0
PAH	0,0	0,0
Particulates (fijn stof)	1,4	8,9
NMVOS	12	25
CH ₄	516	1904

In Duitsland heeft het stoken van biogas in een dieselmotor ook de nodige aandacht. Voor de vergunningverlener wordt een richtwaarde aanbevolen van 7 g stof/GJ en een grenswaarde 16 g/GJ (20 respectievelijk 50 mg/nm³ bij 5% O₂). Dit geldt voor dieselmotoren op biogas <1 MW (LfU, 2002, pag 65). Voor grotere motoren tussen de 1 en 3 MW is de stofemissie eis van 130 mg/m³ (42 g/GJ) in 1986 naar 20 mg/nm³ (7 g stof /GJ) in 2001 gegaan (LfU, 2003, pag 8). Hellén (2006) geeft voor Duitsland een TA-Luft waarde van 7 mg/nm³ bij 15% O₂ (zie Figuur 3.1.). Voor deze laag waarden is wel een roetfilter nodig.

4.6 Kachels en openhaarden

In Nederland is het gebruik van houtkachels bij particulieren meestal een additionele vorm van verwarming. De basisverwarming wordt verzorgd door een cv-installatie op gas, terwijl de houtkachel slechts op bepaalde tijden gebruikt wordt. Omdat er in dergelijke installaties geen filters gebruikt worden zorgen de houtkachels voor relatief veel emissies. Er is een aantal technische en gedragsgerelateerde opties bekend om emissies van open haarden en houtkachels te verminderen. Het stellen van emissie-eisen (naar Duitse norm) is hierin de belangrijkste en meest voor de hand liggende maatregel. Andere belangrijke bronnen van emissie zijn de zogenaamde vuurkorven en tuinovens. Deze worden momenteel niet gemonitord en zijn derhalve ook niet opgenomen in de emissieregistratie.

In de periode 1997 - 2003 geeft het centrale emissieregistratiesysteem van het Duitse Umweltbundesamt een jaarlijkse toename van 4% voor de stofemissie uit houtstook, oplopend tot een totale jaarvrucht van 24 kton in 2003, vrijwel gelijk in omvang aan de totale PM₁₀-emissie uit het Duitse wegverkeer (UBA, 2006a).

Tabel 4.16 geeft een recent overzicht van emissies van verschillende typen kleine houtkachels in Duitsland (UBA, 2006a). Tabel 4.16 laat zien dat de emissies per type kachel aanzienlijk uiteenlopen. Open haarden emitteren rond de 150 g/GJ, terwijl de betere typen kachels tussen de 70 en 100 g/GJ uitstoten. UBA, 2006a

geeft aan dat de daadwerkelijk emissies van houtkachels sterk wordt beïnvloed door de wijze van stoken, de onderhoudstoestand en de kwaliteit van de brandstof. In de praktijk zullen de emissies dus hoger liggen dan de waarden zoals gerapporteerd in Tabel 4.16. De in de onderhavige studie gekozen emissiewaarde van 150 g/GJ lijkt dus in lijn met de door de Duitse UBA gegeven waarden (2006a).

Houtkachels industrie. Deze kachels zijn voornamelijk te vinden bij de houtverwerkende industrie. Er worden hier twee functies gecombineerd: het opwekken van energie voor de lokale energiebehoefte (vaak alleen warmte, soms ook elektriciteit) en het verwerken van houtafval. Dit is voor de bedrijven gunstig omdat er bespaard wordt op afvalverwerkingskosten en op energiekosten.

In een ECN-studie van 1992 (Okken, 1992) wordt wel een emissiefactor genoemd voor CO 10.000 g/GJ en CH₄ 150 g/GJ maar niet voor fijn stof. De CO-emissie verschilt sterk per installatie. Bij een openhaard is deze door de veel hogere luchtvermaat lager. Gesproken wordt er wel over de emissiefactor voor PAK (Poly Aromatische Koolwaterstoffen) die voor een kachel op 0,01 g/GJ zou liggen en voor een openhaard op 0,001 g/GJ. Tabel 4.16 *Stofemissiefactoren van diverse typen kleine houtkachels*

Type kachel	Vermogen [kW]	PM ₁₀ [g/GJ]
Dauerbrandöfen	<15	71
Kachelöfen (tegelkachel)	<15	111
Kamine (open haard)	<15	158
Kaminöfen	<15	113
Heizkessel (verwarmingsketel)	4-25	22

Bron: UBA, 2006a.

Door TNO worden in een oud rapport van 1987 voor houtstook ook emissiecijfers genoemd. deze zijn opgenomen in Tabel 4.16. Aangenomen is dat 50% van de stofemissie tot fijnstof (PM₁₀) gerekend mag worden. De werkelijke stofemissiefactor is dus twee keer hoger. Een interne notitie van TNO noemt in 1993 voor houtverbranding een cijfer van 160 g stof /GJ. Tabel 4.17 Emissiefactoren niet industriële verbrandingsprocessen op hout

	SO ₂ [g/GJ]	NO _x [g/GJ]	Fijn stof [g/GJ]
Houtkachel	6	100	150
Openhaard	6	100	75
Overig hout	6	60	150

Inmiddels is er de nodige ontwikkeling geweest bij houtkachels. Deze richten zich onder andere op het voorkomen van verbranding met te weinig lucht. Hetzij door een naverbranding in te bouwen (secundaire luchttoevoer) hetzij door kleppen die bij hogere temperatuur opengaan (extra luchttoevoer). Beneden de 18 kWth vielen houtkachels namelijk tot voor kort onder de daarvoor ingestelde typekeuring uit het Besluit typekeuring houtkachels luchtverontreiniging koolmonoxide (VROM, 2002). Deze regeling is echter per 26 januari 2005 vervallen.

Een belangrijke ontwikkeling is de opkomst van de houtgestookte verwarmingsketels in de vermogensrange voor huishoudens. Dergelijke installaties vallen op door hun relatief lage emissies, met waarden rond de 22 g/GJ (zie Tabel 4.16). Dit heeft vooral te maken met de brandstof houtpellets die in deze ketels wordt gebruikt. Houtpellets zijn een zeer homogene en fijnverdeelde brandstof. In combinatie met een vraaggestuurde luchttoevoer resulteert dit in relatief lage emissies. Knoppers (2006) vermeldt dat houtpellets gestookte cv ketels van de fabrikant Biocv (vermogensrange 2,4 - 9,2 kW) een stofemissie hebben van slechts 13 g/GJ. In deze ketels wordt de zuurstoftoevoer geregeld middels een lambdasonde.

Een omvangrijk Duits onderzoek (TFZ, 2005) constateert dat bij een groot aantal installaties de Duitse norm van 150 mg stof/nm³ bij 13% O₂ (95 g/GJ) overschreden wordt. In veel gevallen blijkt dan ook de CO norm

van 4000 mg/nm³ (2500 g/GJ) overschreden te worden. Het vermogensbereik van de gemeten kachels lag tussen de 15 tot 1000 kW zowel handgestookte als automatische ketels. Afgaande op de figuren met meetgegevens ligt het gemiddelde op 60 g stof en 600 g CO per GJ (respectievelijk 100 en 1000 mg/m³). De emissiewaarde van veel kachels ligt lager, maar een groot aantal ligt hier aanzienlijk boven. Een brochure van LfU (LfU, 2003) geeft voor houtstook in kachels emissiewaarden in g/GJ aan van 5 voor SO₂, 68 voor NO_x, 205 voor organische verbindingen en 207 voor stof.

In het kader van Europese emissie-inventarisaties worden ook emissiefactoren verzameld. Voor kleine installaties ('small combustion installations') staan de cijfers in Tabel 4.17. In Tabel 4.18 staan de algemene waarden voor verbeterde technologie. Opgemerkt moet worden dat het niet alleen om hout gaat maar ook om turf, hout afval, en agrarisch afval als stro en maïskolven. Omdat het in Nederland meestal om hout gaat zal de Nederlandse emissie lager liggen. Bovendien hebben er een aantal jaren CO-eisen² gegolden in Nederland wat ook een reductie in stofemissie tot gevolg heeft. De vraag is of hout in de toekomst de enige brandstof in Nederland blijft tengevolge van bijvoorbeeld krapte in de beschikbaarheid van hout en/of een hoge prijzen.

Het stoken van andere brandstoffen dan schoon hout, zoals stro en turf, geeft een ca. 3-5 maal hogere stofemissie (zie o.a. Paragraaf 4.3). Inzet van 10% van dit soort brandstoffen leidt dan tot een 20-40% hogere stofemissie.

Tabel 4.18 *Emissiefactoren voor hout en andere vaste biobrandstoffen in kachels, kleine ketels en kleine commerciële installaties*

[g/GJ]	Gebouwde omgeving	Kachel in huishouden	Ketel in huishouden <50 kW _{th}	Ketel 50 kW _{th} - 1 MW _{th}	1 MW _{th} - 50 MW _{th}	Kleine commerciële installaties
SO ₂	20	10	50	50	30	40
NO _x	80	50	150	150	150	150
Totaal stof	800	900	500	250	50	200
PM ₁₀	700	800	440	220	40	180
PM _{2.5}	700	800	440	220	40	180

Tabel 4.19 *Emissiefactoren voor hout en andere vaste biobrandstoffen (verbeterde technologie)*

[g/GJ]	Kachel	Kachel op pellets (geperste blokken)	Ketel handbediening	Ketel automatisch
SO ₂	30	30	30	30
NO _x	150	150	150	150
Totaal stof	450	130	250	80
Pm 10	400	120	230	70
Pm 2,5	400	120	230	70

Gezien het voorgaande wordt voor houtverbranding bij huishoudens een emissiefactor van circa 150 g/GJ gehanteerd³. Er wordt hierbij vanuit gegaan dat de emissie-eisen in Nederland tot betere houtkachels geleid hebben dan het Europese gemiddelde. Deze waarde is eveneens in lijn met de recente bevindingen uit de UBA-studie (2006a), zoals weergegeven in Tabel 4.16.

² Bij hoge CO-emissies is er sprake van onvolledige verbranding door te weinig lucht toevoer. In deze situaties neemt de stofemissie ook aanzienlijk toe.

³ CBS geeft voor de huishoudsector in 2004 een emissie van 3,4 kton (2005b). Bij een houtverbranding van 10 PJ betekent dit een maximale emissiefactor van 340 g/GJ, maar er zijn ook andere emissiebronnen.

4.7 Afvalverbrandingsinstallaties (AVI's)

In een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) wordt afval (zowel laagcalorisch huishoudelijk afval als hoogcalorisch bedrijfsafval) verbrand, teneinde het volume van deze stromen te reduceren. De traditionele verwerkingsmanier, het storten van afval, is namelijk om een aantal redenen onwenselijk, en daarom ook bij wet verboden voor brandbaar huishoudelijk afval. Wanneer afvalpreventie, hergebruik en recyclen van materialen niet meer mogelijk is, kan uit de afvalstromen energie (zowel warmte als elektriciteit) opgewekt worden. Het is daarbij belangrijk om geen schadelijke stoffen uit te stoten. Het aandeel duurzame energie dat opgewekt wordt, heeft per definitie alleen betrekking op het niet-fossiele biogene deel van de afvalstromen. Dit aandeel bedraagt in de laatste jaren ongeveer de helft van al het verwerkte afval.

Emissies van afvalverbranding zijn afgeleid uit het milieujarverslag van Twence (Twence, 2005). Hierbij is ook gebruik gemaakt van gegevens van een kleinere installatie van Sita. Uit het milieujarverslag van Sita is het verband tussen hoeveelheid verbrand afval en rookgasconcentraties gehaald. Dit verband is daarna gebruikt om de cijfers van de grote AVI 'Twence' te vertalen naar bruikbare cijfers in g/GJ afval.

Tabel 4.20 *Emissiefactoren Afval verbrandingsinstallaties*

	[g/GJ]
SO ₂	2
NO _x	60
CO	10
VOS	4
Stof	0,5
NH ₃	0,1

4.8 Bijstook in cementovens

In de cementindustrie zijn grote hoeveelheden warmte nodig. Traditioneel wordt dit geleverd door fossiele brandstoffen, maar deze kunnen ook gesubstitueerd worden door brandstoffen van biogene oorsprong. Belangrijk aspect bij dit proces is het restproduct na het verbranden van de biomassa: omdat de as in het eindproduct cement terechtkomt is het belangrijk er zeker van te zijn dat die geen nadelige invloed heeft op de kwaliteit ervan.

4.9 Overige kleinschalige biomassa en experimentele installaties

Naast de reeds in de vorige paragrafen besproken kleinschalige toepassingen zijn er nog diverse andere kleinschalige en experimentele installaties, corresponderend met de in Figuur 4.1 gegeven routes H1, H2, E1, E5/H3 en E6-E8). De emissies van deze installaties zijn sterk afhankelijk van de mate van de gasreiniging. Vanwege het zeer beperkte marktaandeel van deze installaties zijn er momenteel niet veel data m.b.t. fijn stof emissies. Uit ECN onderzoek (Verhoef et al., 2004) blijkt dat in een minst gunstige situatie, waarbij het stookgas na ontstopping d.m.v. een conventionele cycloon, direct in de ketel wordt verstoekt (route H2), de fijn stof emissie vrij hoog kan zijn, zelfs bij gebruik van schone biomassa (zie Tabel 4.21). Echter, bij de koppeling met een gasmotor (route E5/H3 in Figuur 4.1), liggen de emissies veel lager (Boerrigter et al., 2005), omdat voor deze toepassing het stookgas veel verdergaand gereinigd wordt.

Ter vergelijking worden in Tabel 4.21 ook emissiefactoren vermeld voor directe verbranding van biomassa in een roosteroven en een 'understoker' oven (route H1 in Figuur 4.1), met (multi)cycloon voor de ontstopping van het rookgas (Hasler et al., 1998). De emissies van een wervelbed-verbrandingsinstallatie, uitgerust met een ESP (FBC, route E1), zijn geschat volgens de toelichting onder aan Tabel 4.21.

Tabel 4.21 *Fijn stof emissiefactoren voor stand-alone installaties*

Brandstof	Installatie type	Vermogen [kW _{th}]/[kW _e]	Stook-/rookgasreiniging	Emissiefactor [g/GJ]
A-houtpellets	CFB vergasser/ketel	500	Cycloon/-	73

A-houtpellets	CFB vergasser/ gasmotor	500/140	Cycloon+ teerverwijdering+ scrubber/-	0,1
A-houtpellets	Roosteroven	450/-	-/cycloon	23
Gras(pellets)	Roosteroven	450/-	-/cycloon	176
A-houtpellets	Understoker	170	-/cycloon	53
<u>A-houtpellets</u>	<u>FBC/stoomcyclus</u>	<u>80/24 [MW_{th}/e]</u>	<u>-/cycloon+ESP</u>	<u>2,5^a - 5^b#</u>

geen data beschikbaar voor stofconcentratie; waarden zijn berekend op basis van a) 2% asgehalte en 99,7% ESP efficiency b) maximum toegestane rookgas stofconcentratie van 30 mg/m³.

4.10 Grootschalige biomassa stand-alone

Deze techniek behelst een nieuwe centrale die zo ontworpen is dat deze direct geschikt is voor bij- en meestook van biomassa en/of afval. Het economisch rendement van een centrale die met aardgas en/of biomassa gestookt wordt is sterk afhankelijk van de prijs van de brandstof. Uitgaande van een negatieve (of licht positieve) prijs van biomassa ligt voor de lange termijn de keuze voor de hand van een nieuw te bouwen stand-alone biomassavergassings STEG-centrale (500 MW) met warmteproductie. De techniek voor grootschalige biomassa-inzet is op dit moment nog niet beschikbaar: naar verwachting is de beoogde techniek en schaalgrootte, een circulerend wervelbedvergasser gekoppeld aan een STEG, vanaf 2015 commercieel beschikbaar.

Fleuren et al. (2004) hebben de haalbaarheid geëvalueerd van een 1000 MW_e biomassacentrale, bestaande uit 4 fluidised bed eenheden van 250 MW_e elk. Fleuren et al. (2004) concluderen dat het technisch mogelijk is om een dergelijke centrale binnen 10 jaar te bouwen.

5. Overzicht huidige en verwachte fijn stof emissies

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de biomassa-gerelateerde PM₁₀-emissies, gebaseerd op de in de voorgaande hoofdstukken gepresenteerde informatie. In Hoofdstuk 2 is de ontwikkeling van de biomassa-inzet per technologie geraamd. In Hoofdstuk 4 zijn voor alle verschillende biomassatechnologieën stofemissiefactoren gegeven. De meest waarschijnlijk geachte inzet van biomassatechnologie en bijbehorende stofemissiefactoren zijn samengevat in tabel Tabel 5.1 en Tabel 5.2., waardoor een overzicht ontstaat van alle biomassa-emissies in Nederland (met uitzondering van de transportsector). Er is onderscheid gemaakt tussen industriële emissies en particuliere emissies. Emissies uit particuliere kachels leveren namelijk een buitenproportionele bijdrage aan de totale biomassagerelateerde PM-emissies, vanwege de afwezigheid van rookgasreinigingsinstallatie.

Tabel 5.1 *Totaaloverzicht energie-inzet en stofemissies: industrie*

Installatie	Brandstof	Brandstof	Stof emissiefactor	Stof	Stof
	verbruik 2004 [PJ]	verbruik 2020 [PJ]		emissies PM ₁₀ 2004 [ton]	emissies PM ₁₀ 2020 [ton]
Meestook kolencentrale	11,1	79,5	2	22	159
Meestook gascentrale		8,1	10	28	81
Bijstook kolencentrale (zie meestook)			2		
Bijstook gascentrale	2,8	0,0	10	28	0
Kleinschalige biomassa	3,3	4,1	5	16	21
Bio-olie in grote dieselmotoren		6,5	25		162
Bijstook cement	1,7		?		
Grootschalige biomassa stand-alone		0,0	5	0	0
Vuilverbranding 50% duurz genomen	27,7	31,0	0,5	14	16
Mest- en GFT-vergisting	0,2	2,0	0,5	0	1

Stortgas	2,8	1,2	0,5	1	1
(waarvan fakkels)	0,8				
AWZI/RWZI	3,3	1,6	0,5	2	1
(waarvan fakkels)	0,2				
Houtkachels industrie	1,9	1,9	15	29	29
Totaal	54,8	135,9		141	471

Tabel 5.2 *Totaaloverzicht energie-inzet en stofemissies: particuliere kachels*

Installatie	Brandstof	Brandstof	Stof emis-	Stof emisverbruik	Stof
	verbruik	siefactor	sies PM ₁₀	2004	emissies
	2004	2020		2004	PM ₁₀
	[PJ]	[PJ]	[ton/PJ]	[ton]	2020
					[ton]
Houtkachels particulieren	9,3	7,5	150	1395	1120

Noot bij Tabel 5.1 en 5.2

- (Bio)dieselroet, is o.a. qua deeltjesgrootteverdeling, uit gezondheidsoogpunt mogelijk meer schadelijk dan de deeltjes die worden geëmitteerd door andere processen voor energieopwekking uit biomassa.
- Fijn stof uit houtkachels en andere kleine installaties zonder rookgasreiniging betreft naar verwachting veel grote deeltjes die in massa zwaar meetellen, maar in deeltjesaantallen niet. Dit vanwege de afwezigheid van rookgasreiniging, die bij de andere bronnen juist de grote (en zware!) deeltjes afvangt vanwege de hoogste efficiëntie voor grotere deeltjes (>1 micrometer). De fractie rond 0,05-0,1 micrometer heeft echter de grootste depositie in de longblaasjes etc. Omdat de massa van deeltjes ca. tot de derde macht afhangt van de diameter geeft afvangen van bijvoorbeeld 99% massa, en dus een gunstige score in de tabel, bepaald geen garantie dat de gezondheidsconsequenties ook met 99% zijn verminderd.

De voornaamste conclusie is dat de emissie door biomassastook in Nederland de komende jaren op een aantal plaatsen gaat toenemen. De grootste toename zit bij de bijstook in kolencentrales. Omdat hier emissie van kolen verdrongen wordt zal er per saldo geen substantiële toename of afname van de fijnstof emissie (uitgedrukt in gewicht PM₁₀) zijn. Emissie-effecten die berekend worden zijn kleiner dan de onzekerheden.

De totale energieverbruik in industriële biomassa installaties stijgt met ongeveer een factor 2,5 van 55 naar 136 PJ in de periode 2004-2020. De bijbehorende PM₁₀-emissies stijgen in dezelfde periode met een factor 3,4 van 141 naar 471 ton. De meer dan evenredige toename wordt vooral veroorzaakt door inzet van bio-olie in dieselmotoren. Aanvullende roetverwijderingstechnologieën bieden hier kansen voor lagere uitstoot

Bij vervanging van kolen door biomassa treedt er waarschijnlijk een beperkte daling van de hoeveelheid emissie op (uitgedrukt in gewicht PM₁₀). Gelijktijdig zal er, door de verandering in brandstof, ook een verandering optreden in de deeltjesgrootte verdeling en aard van de emissie. Hierover is echter nog weinig bekend.

Een nieuwe biomassa installatie of bijstook van bio-olie in een gascentrale kan wel effect hebben op de lokale milieusituatie. Per situatie moet dan gekeken worden of milieunormen hierdoor overschreden gaan worden.

De emissies uit particuliere houtkachels dragen buitenproportioneel bij aan de totale biomassagerelateerde emissies in Nederland. In het gehanteerde scenario daalt het energieverbruik uit biomassa in de huishoudens van 9,3 naar 7,5 PJ, terwijl de emissie evenredig afneemt van 1395 naar 1120 ton. In 2004 is de PM₁₀-emissie uit de huishoudens bijna 10 maal hoger dan de totale emissie uit de industrie. In 2020 stoten de huishoudens nog steeds ca. 2,5 maal zoveel fijn stof uit als de industrie. Niet alleen de hoeveelheid hout die in Nederland in de huishoudelijke sector gestookt wordt heeft een grote onzekerheid, maar ook de gemiddelde emissiefactor is zeer onzeker. Deze onzekerheid wordt versterkt door mogelijke effecten van het eventueel stoken van een andere brandstof dan hout (bijvoorbeeld turf, stro) in particuliere kachels.

6. Gevolgen voor de buitenluchtkwaliteit

De bijdrage van de biomassa-emissies aan de PM₁₀-concentratie in de buitenlucht is in het onderstaande geraamd. Hierbij is alleen gekeken naar reeds in de schoorsteen aanwezige deeltjes (primair fijn stof) en niet naar deeltjes die pas ontstaan na de uitstoot in de atmosfeer door reacties tussen gasvormige componenten in het uitlaatgas (secundair fijn stof). Daarnaast is eveneens een inschatting gemaakt van de mate waarin buitenlandse de biomassa-emissies de Nederlandse buitenlucht beïnvloeden.

6.1 Effect van Nederlandse emissies

De totale Nederlandse PM₁₀-emissie uit niet-natuurlijke bronnen neemt in de periode 2004 - 2020 af van ca. 54 naar 49 kton (zie Tabel 6.1). Ten opzichte van deze totale emissie is de emissies uit biomassa gering. Uit Tabel 5.1 en Tabel 5.2 blijkt dat de totale industriële biomassa gerelateerde PM₁₀-emissie in Nederland stijgt van ca. 0,14 tot 0,47 kton per jaar in de periode 2004-2020. In dezelfde periode daalt de geschatte uitstoot door particuliere houtkachels licht van ca. 1,4 naar 1,1 kton per jaar. Zoals beschreven in Paragraaf 4.6 zijn met name de emissieschattingen uit particuliere kachels onzeker vanwege onzekerheden in: (1) de hoeveelheid brandstof die zal worden ingezet, (2) de emissiefactor van particuliere kachels; en (3) de effecten van het stoken van brandstoffen zoals turf en stro.

Industriële emissies

Uit het bovenstaande volgt dat de industriële biomassa emissies in 2020 minder dan 1% bijdragen aan de totale binnenlandse emissies van antropogene aard. Uit de Tabel 6.1 kan worden afgeleid dat de industriële emissie correspondeert met een bijdrage aan de PM₁₀-concentratie in de buitenlucht van ongeveer 0,02 µg/m³.

Particuliere emissies

Particuliere kachels zullen in 2020 naar verwachting minder dan 3% bijdragen aan de totale binnenlandse emissies van antropogene aard. Uit de Tabel 6.1 kan worden afgeleid dat de emissie uit particuliere kachels correspondeert met een bijdrage aan de PM₁₀-concentratie in de buitenlucht in de orde van 0,05 µg/m³.

Opmerking:

De relatieve invloed van biomassa emissies op de PM₁₀-concentratie in de buitenlucht is lastiger te geven, omdat dit kan worden uitgedrukt ten opzichte van de achtergrondconcentratie of tegen de gemodelleerde primaire concentratie. (De totale gemodelleerde primair PM₁₀-concentratie in de buitenlucht, uit Nederland en het buitenland, wordt in 2020 geraamd op ca. 4,0 µg/m³, ten opzichte van een gemiddelde totale PM₁₀-achtergrondconcentratie van ca. 25 µg/m³ bestaande uit primair en secundair aerosol).

6.2 Effect van buitenlandse emissies

Het effect van buitenlandse biomassa-emissies op de Nederlandse luchtkwaliteit is berekend. Hierbij is gebruik gemaakt van de zogenaamde 'CAFE baseline scenario's'. In deze scenario's zijn ramingen beschikbaar van de totale PM₁₀-emissies in veel Europese landen. Eveneens zijn gegevens beschikbaar over de mate waarin ieder land de Nederlandse PM₁₀-concentratie in de buitenlucht beïnvloedt. Combinatie van deze gegevens met de biomassagerelateerde PM₁₀uitstoot per land geven een schatting van de mate waarin een bepaald land de Nederlandse luchtkwaliteit beïnvloedt.

Tabel 6.1 geeft voor België, Frankrijk en Duitsland (B, F, D) de totale PM₁₀-vracht uit nietnatuurlijke bronnen voor 2010 en 2020, alsmede de invloed van deze landen op de Nederlandse buitenluchtconcentratie. De 'CAFE baseline scenario's' laten zien dat B, F, en D tezamen het meest bepalend zijn voor de Nederlandse situatie. Andere landen zijn daarom niet meegenomen in deze studie.

Tabel 6.1 *PM₁₀-emissies in België, Frankrijk en Duitsland en gevolgen voor Nederland*

	PM ₁₀ -vracht 2010 [kton]	PM ₁₀ -vracht 2020 [kton]	Effect op PM ₁₀ -conc. NL 2010 [µg/m ³]	Effect op PM ₁₀ -conc. NL2020 [µg/m ³]
België	44	42	0,30	0,27
Frankrijk	276	245	0,26	0,22
Duitsland	208	191	0,46	0,41
Nederland	50	49	2,18	2,33

Vervolgens is een schatting gemaakt van de biomassagerelateerde PM₁₀-emissies voor elektriciteitsproductie in België, Frankrijk en Duitsland, met behulp van het model ADMIRE-REBUS (Uyterlinde et al., 2003). Om inzicht te krijgen in de bandbreedte van biomassa-inzet in andere landen is gerekend met drie intensiteiten van financiële stimulering, namelijk 1, 5 en 10 cent/kWh_e. Per land is een raming gemaakt van de omvang van de verschillende opties voor biomassa gerelateerde elektriciteitsproductie. Voor deze studie is in eerste instantie gerekend met het 'midden-niveau' van 5 cent / kWh_e. Bij de keuze voor het hogere subsidiescenario wordt het effect niet significant anders. Vervolgens is per land voor iedere biomassa optie een schatting gemaakt van de PM₁₀-emissies in 2010 en 2020 (Tabel 6.2), op basis van: (1) de elektrische rendementen zoals genoemd in (De Noord, 2004); en (2) de emissiefactoren uit de voorliggende studie.

Tabel 6.2 *Biomassa gerelateerde PM₁₀-emissies in België, Frankrijk en Duitsland*

Gemiddeld emissie scenario op basis van 'midden-niveau' subsidie van 5 cent / kWh _e		[ton]	
		2010	2020
België	Biomass CHP	24	36
	Biomass cofiring	2	2
	Biomass combustion	79	123
	Biomass digestion	1	1
	Biomass gasification	0	5
Duitsland	Biomass CHP	439	788
	Biomass cofiring	30	31
	Biomass combustion	722	1478
	Biomass digestion	14	11
	Biomass gasification	0	44
Frankrijk	Biomass CHP	34	108
	Biomass cofiring	140	140
	Biomass combustion	1779	3214
	Biomass digestion	10	13
	Biomass gasification	0	98

Afkortingen: CHP = Combined Heat and Power; i.e. gelijktijdige opwekking van warmte en elektriciteit

Cofiring = meestoken van biomassa (zie Paragraaf 4.2)

Digestion = Vergisting van biomassa; het gevormde gas wordt verbrand in een gasmotor

Gasification = vergassing van biomassa, waarbij de gasvormige brandstof syngas wordt gevormd

De verhouding van de totale PM₁₀-emissie per land en het effect op de Nederlandse concentratie (Tabel 6.1), leveren in combinatie met de biomassa emissies per land (Tabel 6.2), een schatting van de bijdrage die B, F, en D leveren aan de Nederlandse PM₁₀-concentratie, zoals samengevat in Tabel 6.3.

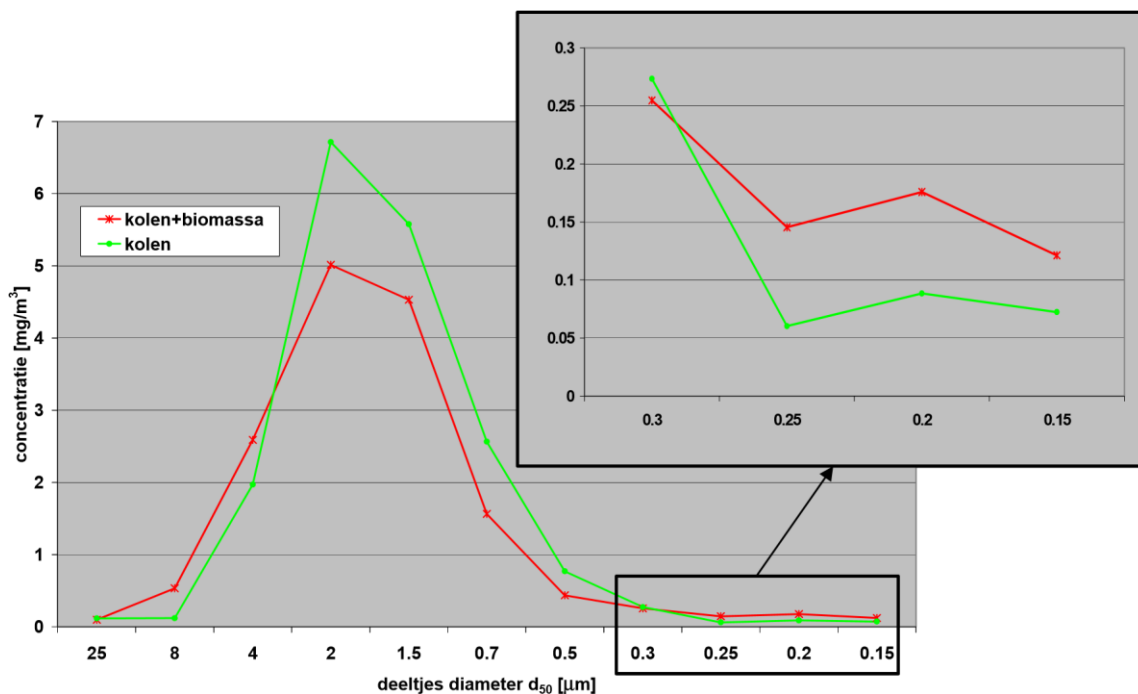
Tabel 6.3 *Bijdrage van biomassa PM-uitstoot in B, F, en D op de Nederlandse luchtkwaliteit*

	Effect op PM ₁₀ -conc. NL 2010 [µg/m ³]	Effect op PM ₁₀ -conc. NL 2020 [µg/m ³]
België	0,00071	0,00106
Frankrijk	0,00197	0,00337
Duitsland	0,00265	0,00493
Totaal (B, F, D)	0,00533	0,00935

De totale gemodelleerde PM₁₀-concentratie (primair) in de buitenlucht bedraagt in 2010 ca. 4,1 µg/m³ en in 2020 ca. 4,0 µg/m³ (ten opzichte van een gemiddelde totale PM₁₀-achtergrondconcentratie van ca. 25 µg/m³ (primair + secundair). Vergelijking van deze waarden met Tabel 6.3 laat zien dat de invloed van biomassagerelateerde PM₁₀-uitstoot uit België, Frankrijk en Duitsland tezamen in 2010 ongeveer 0,13% beslaat van de gemodelleerde concentratie in de Nederlandse buitenlucht. In 2020 zal deze bijdrage opgelopen zijn naar ca. 0,23%. Dit komt overeen met een PM₁₀-concentratie in de buitenlucht van ca. 0,01 µg/m³. Samenvattend kan dus worden geconcludeerd dat de invloed van biomassa-inzet in het buitenland beperkt zal zijn.

7. Verdieping aard en samenstelling PM₁₀

Uit lopend onderzoek van ECN in een Europees project (ToMeRed, 2006) en diverse literatuurbronnen (o.a. Meij en Te Winkel, 2005) mag geconcludeerd worden dat biomassa meestoken in kolengestookte centrales, voorzien van ESP en ROI, niet leidt tot een noemenswaardige verhoging van de PM₁₀-schoorsteenemissies. Dit is in grote mate te danken aan de zeer uitgebreide rookgasreiniging, waarmee de Nederlandse (EU) elektriciteitscentrales zijn uitgerust. Bovendien bevatten de meeste biomassastromen die gebruikt worden (b.v. hout) significant minder as dan kolen (<5 vs 14% op gewichtsbasis), wat tot een lagere stofbelading in het rookgas leidt. Niettemin is het recent door ECN aangetoond, dat zelfs bij lagere PM₁₀-emissies bij meestoken van schone biomassa met een laag asgehalte, de concentratie submicron deeltjes significant kan oplopen. Dit wordt hoogst waarschijnlijk veroorzaakt door de sterk afwijkende samenstelling van de biomassa. De anorganische biomassa componenten bevatten met name alkali- en calciumhoudende verbindingen, die in het afkoeltraject van de installatie een zeer fijne aërosol vormen. Zowel de elektrostatische filters als de rookgasontzwavelingsinstallatie hebben een lage efficiency van de verwijdering van deze zeer fijne aërosolen. Een voorbeeld hiervan is gepresenteerd in Figuur 7.1, waarin data van de stofconcentratie en deeltjesgrootteverdeling van schoon rookgas (na de ESP) bij biomassa meestoken zijn vergeleken met de situatie waarbij alleen kolen gebruik werd (ToMeRed, 2006).



Figuur 7.1 Deeltjesgrootte-afhankelijke concentratie van stofdeeltjes in het rookgas (na de ESP) van een kolengestookte elektriciteitscentrale met en zonder biomassa meestoken

De invloed van de rookgasontzwavelingsinstallatie op de PM-emissies is ook onderzocht (ToMeRed, 2006). Uit de resultaten blijkt dat in de ROI een deel van fijn stof verwijderd wordt (met name de grovere fractie $>1 \mu\text{m}$), maar ook extra emissies kunnen ontstaan, doordat het rookgas een deel van het wasmedium (kalkslurrie) met zich meeneemt in een vorm van een dauw. Ook een deel van de resulterende gipsuspensie wordt op deze manier meegevoerd naar de schoorsteen. In totaal kunnen de ROI-gebonden emissies (in een grote mate brandstof onafhankelijk) tot 60% (w/w) van de totale stofemissies zorgen.

Bij het bijstoken van biomassa via vergassing, is de invloed van biomassa op de vliegaskwaliteit veel kleiner. Met name de aërosolen zullen echter voor het grootste deel met het stookgas in de poederkoolketel terecht komen, met het in het voorgaande beschreven effect op de emissie. De hoeveelheid aërosolen kan wel iets lager zijn door de relatief lage procestemperatuur van de vergasser.

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Ontwikkeling emissiebronnen

Een belangrijke conclusie is dat de emissie van fijn stof door biomassastook in Nederland de komende jaren op een aantal plaatsen gaat toenemen. De grootste toename in inzet van biomassa zit bij de bijstook in kolencentrales. Vanwege de reeds bestaande goede filterinstallaties heeft dit weinig milieueffecten. Omdat hier emissie van kolen verdrongen wordt zal er per saldo geen substantiële toename of afname van de fijn stof emissie (uitgedrukt in gewicht PM_{10}) zijn. Emissie-effecten die berekend worden zijn kleiner dan de onzekerheden.

Het totale energieverbruik in industriële biomassa installaties stijgt met ongeveer een factor 2,5 van 55 naar 136 PJ in de periode 2004-2020 (zie de overzichtstabel 5.1). De bijbehorende PM_{10} -emissies stijgen in dezelfde periode met een factor 3,4 van 140 naar 470 ton. De meer dan evenredige toename wordt vooral veroorzaakt door inzet van bio-olie in dieselmotoren. In 2020 is hiervoor een emissie voorzien van ca. 160 ton PM_{10} . Deze emissie zou mogelijk met ca. 80% kunnen worden gereduceerd door inzet van na-geschakelde roetfilters.

De emissies uit particuliere houtkachels dragen buitenproportioneel bij aan de totale biomassagerelateerde emissies in Nederland (orde 70 - 90%). In het gehanteerde scenario (GE) daalt het energieverbruik uit biomassa in de huishoudens van 9,3 naar 7,5 PJ, terwijl de emissie evenredig afneemt van 1400 naar 1100 ton (zie de overzichtstabel 5.2). In 2004 is de PM_{10} -emissie uit de huishoudens bijna 10 maal hoger dan de totale emissie uit de industrie. In 2020 stoten de huishoudens nog steeds ca. 2,5 maal zoveel fijn stof uit als de industrie. Aangezien de filters die in de industrie worden gebruikt selectief de grotere deeltjes afvangen, dient te worden opgemerkt dat industriële installaties veel kleinere deeltjes uitstoten dan particuliere houtkachels die deze filters niet hebben. Uitgedrukt in *aantallen* deeltjes is de industriële emissie naar verwachting veel groter dan de totale uitstoot uit particuliere kachels.

Gevolgen buitenluchtkwaliteit

De bijdrage van de huidige en toekomstige biomassa-emissies aan de PM_{10} -concentratie in de buitenlucht is beperkt.

- De industriële biomassa emissies dragen in 2020 ongeveer 1% bij aan de totale binnenlandse emissies van antropogene aard. Dit correspondeert met een bijdrage aan de PM_{10} concentratie in de buitenlucht van ongeveer $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Particuliere kachels zullen in 2020 naar verwachting circa 3% bijdragen aan de totale binnenlandse emissies van antropogene aard. Dit correspondeert met een bijdrage aan de PM_{10} concentratie in de buitenlucht in de orde van $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- De invloed van biomassa-inzet in het buitenland op de Nederlandse luchtkwaliteit is klein. De biomassagerelateerde PM_{10} -uitstoot in België, Frankrijk en Duitsland tezamen resulteert in 2020 in een bijdrage aan de PM_{10} -concentratie in de Nederlandse buitenlucht in de orde van $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Overige bevindingen

Bij vervanging van kolen door biomassa treedt er waarschijnlijk een beperkte daling van de hoeveelheid emissie op (uitgedrukt in de eenheid voor massa PM_{10}). Gelijktijdig zal er, door de verandering in brandstof, ook een verandering optreden in de deeltjesgrootte verdeling en aard van de emissie. Er zijn indicaties dat de emissie van heel kleine deeltjes (PM_1) toeneemt, maar hierover is nog maar weinig bekend.

Een nieuwe biomassa installatie of bijstook van bio-olie in een gascentrale kan wel effect hebben op lokale milieusituatie. Per situatie moet dan gekeken worden of milieunormen hierdoor overschreden gaan worden.

Niet alleen de hoeveelheid hout die in Nederland in de huishoudelijke sector gestookt wordt heeft een grote onzekerheid, maar ook de gemiddelde emissiefactor is zeer onzeker (emissiefactor kan ook 2 maal zo hoog zijn). De berekende emissie-effecten zijn kleiner dan de onzekerheden. Deze onzekerheden worden versterkt door mogelijke effecten van het eventueel stoken van een andere brandstof dan hout (bijvoorbeeld turf, stro) in particuliere kachels.

8.2 Aanbeveling

De ‘verzameleenheid’ PM_{10} geeft een weinig gedetailleerd beeld van de biomassagerelateerde fijn stof emissies uit de verschillende bronnen, omdat de samenstelling, deeltjesgrootteverdeling en deeltjesoppervlak voor de verschillende bronnen sterk verschilt. Een succesvol beleid voor biomassa gerelateerd fijn stof vereist, naast inzicht in de herkomst, ook informatie over de samenstelling en deeltjesgrootteverdeling. Dit is van belang voor de beoordeling van de schadelijkheid voor de gezondheid en de mogelijkheden van specifieke emissiereductietechnologieën.

Referenties

- Acid News (2004): *Emission standards for light and heavy road vehicles*; Environmental Factsheet No. 17, September 2004 (www.acidrain.org).
- Babu, P. (2002): *An overview of activities within countries participating in Task 20/33*; Task: 33: Thermal Gasification of Biomass. International Energy Agency (IEA), IEA bioenergy, http://www.ieabioenergy.com/media/18_AR1999Task20colour.pdf, Parijs, June 2002.
- Bakkum, A., et.al. (1987): *Emissieregistratie van vuurhaarden*, R86/207b, TNO-Milieu en Energie, Delft, 11 oktober 1987.
- Biox (2006): Website BIOX company: www.biox.com.
- Boerrigter, H., S.V.B. van Paasen, P.C.A. Bergman, J.W. Könemann, R. Emmen, A. Wijnands (2005): *“OLGA” Tar removal Technology*; ECN-rapport ECN-C--05-009.
- CBS (2005): *Duurzame Energie in Nederland 2004*. Centraal Bureau voor de Statistiek.
- CBS (2005b): *Luchtverontreiniging, emissies berekend volgens het NEC-protocol*. Via Statline van www.cbs.nl.
- Croezen, H. en B. Kampman (2005): *Op (de) weg met pure plantenolie? De technische, milieuhygiënische en kostengerelateerde aspecten van plantenolie als voertuigbrandstof*. SenterNovem Rapport, 2GAVE-05.05, juni 2005, pp. 1-96.
- Daey Ouwens, J. (2005): *Statusdocument Bio-energie 2005*, SenterNovem, 16 november 2005.
- Daniëls, B.J. et al. (2006): *Optiedocument energie en emissies 2010/2020*, ECN-rapport C--05105/NMP rapport 773001038, 001-96.
- De Noord, M., L.W.M. Beurskens, H.J. de Vries (2004): *Potentials And Costs For Renewable Electricity Generation, A data overview*, ECN-C--03-006, Februari 2004.
- ECN (1998): *Energieverslag Nederland 1997*. <http://www.energie.nl/dossier/evn97f-2.pdf>.
- ECN (1999): *Houtkachels*. Brochure, ECN-B-99-006.
- ECN/MNP (2005): *Referentieramingen Energie en Emissies 2005-2020*, ECN-C--05-018, ECN, Petten.
- Electrabel (2002): *Milieujaarverslag 2001 Markt, maatschappij en milieuzorg*, Electrabel Nederland n.v., Zwolle. 2002.
- Electrabel Overheidsmilieujaarverslag Centrale Harculo 2004.
- Elektronisch milieujaarverslag 2004.
- EMEP/CORINAIR (2004): *Emission Inventory Guidebook - 2004*. <http://reports.eea.eu.int/EMEP/CORINAIR4/en>, EEA, Kopenhagen 19 Januari 2004.
- EPZ (2004): *Milieu overheids jaarverslag NV EPZ Koleneenheid Borselle 12*. N.V. EPZ.
- Essent (2005): *Milieujaarverslag 2004 middelgrote eenheden*. Essent Energieproductie BV Eindhoven.
- Essent Energie Productie BV (Clauscentrale Maasbracht).
- Essent (2004): *Milieu overheidsjaarverslag 2003* Vestigingsplaats Geertruidenberg Amer en Dongecentrale. Essent, *Elektronisch milieujaarverslag 2004* Essent Energie Productie BV (Clauscentrale Maasbracht)
- EZ (2001): *Brief minister van EZ aan Tweede Kamer*, 21 februari 2001.
- EZ (2005): *Energierapport; nu voor later*. Ministerie van EZ, juli 2005, publicatienummer 05E01, pp 1-63.
- Fleuren, W., A.J.A. Konings, J.W.H. Lindeman, A.E. Pfeiffer, H. Pustjens, R.D. Smeets (2004): *Opportunities for a 1000 MW_e biomassfired power plant in the Netherlands*; KEMA rapport 50461976-KPS/PIR 04-1114, pp. 1-84.

- Hasler, P., T. Nussbaumer (1998): *Particle Size Distribution from Biomass Combustion; Biomass for Energy and Industry*, 10th European Conference and Technology Exhibition; June 8-11 1998, Würzburg (Germany).
- Hellén, G. (2006): Hoofd van de Wärtsilä Afdeling "Emission Control". Presentatie maart 2006, down te loaden via:
http://webserv2.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/Kaynnissa/FINE/fi/Dokumennttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Seminaarit/Paatosseminaari_2006/Aineisto/Maanant_ai/Hellen.pdf.
- [Http://wetten.overheid.nl/](http://wetten.overheid.nl/).
- Huber, S., K. Frieß (1998): *Emission of Biomass Combustion Plants. Landesamt für Umweltschutz (LfU), Referat 1/2 - Immissionsschutz I, Augsburg*, <http://www.bayern.de/lfu/luft/emicontrol/index.html>.
- IPPC (2005): *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. <http://eippcb.jrc.es>, May 2005.
- Jaarsveld, J.A. van (1989): *Een operationeel atmosferisch transportmodel voor prioritair stoffen; specificatie en aanwijzingen voor gebruik*, RIVM-rapport nr. 228603008.
- Knoppers, R. (2006): *Houtkachel brandt efficiënt op pellets*. Technisch weekblad, 13 april 2006, pagina 3.
- Koppejan, J. en P.D.M. Boer - Meulman (2005): *De verwachte beschikbaarheid van biomassa in 2010*, SenterNovem, Oktober 2005.
- Kristensen, P.G., et.al. (2004): *Emission Factors for gas fired CHP units <25 MW*. http://www.dgc.dk/publikationer/konference/pgk_igr04.pdf, Danish Gas Technology Centre, Hørsholm, Denmark
- LfU (2000): *Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage - Emissionen und Aschequalität*. Abschlussbericht 176, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, September 2000.
- LfU (2002): *Biogasanlagen - Anforderungen zur Luftreinhaltung*. Fachtagung am 17 Oktober 2002 Augsburg, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, 2002
- LfU (2003): *Heizen mit Holz in Scheitholz kesseln; Tipps für Käufer und Betreiber von Zentralheizungsanlagen*. (Brochure) www.lfu.bayern.de, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, Januar 2005
- LfU (2003): *Biogasanlagen - Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas - Blockheizkraftwerken*. Abschlussbericht 175, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, Februar 2003
- LQM (2002): *Landfill Gas Engine Exhaust and flare emissions*; Final Report. LQM 158, Land Quality Management Ltd., Nottingham, September 2002
- Meij, R. en B.H. te Winkel (2003): *Meestoken van biomassa in kolencentrales*. Arena (het Dossier), Nr. 7, 135-137.
- Meij, R. en B.H. te Winkel (2005): *Stofemissies van de Nederlandse kolencentrales* Arena (het Dossier), Nr. 5, september 2005, 65-68.
- Meulman, P.D.M. en J. Koppejan (2002): *Blokverwarming met hout als brandstof - algemene technische informatie*. http://www.bioheat.info/pdf/brochure_nl_techn.pdf, TNO-MEP, Apeldoorn, augustus 2002.
- Milieujaarverslag 2004, Via Twence. Nummer 14, 5e jaargang, juni 2005.
- Milieujaarverslag SITA ReEnergy 2004.
- MNP/RIVM (2005): *Fijn stof nader bekeken*. Milieu- en Natuurplanbureau, en sector Milieu en Veiligheid van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Okken, P.A. et.al. (1992): *Houtkachels in Nederland; Bijdrage aan energievoorziening en milieubelasting*. ECN-C--92-021, Petten, ECN, april 1992

- Ruijgrok W.J.A. en E.J.W. van Sambeek (2003): *Kosten duurzame elektriciteit - kleine zelfstandige biomassa-installaties*, ECN--C-03-074/D, Augustus 2003.
- Schmoeckel, G. (1998): *Emissionsuntersuchungen an einer Rapsölf Feuerung*; . Bayer. Landesamt für Umweltschutz (LfU), 1998) <http://www.bayern.de/lfu/luft/ropsfeuer/index.html>
- Seebregts, A.J. en C.H. Volkens (2005): *Monitoring Nederlandse elektriciteitscentrales 2000-2004*. ECN-C--05-090, ECN, Petten, November 2005.
- ToMeRed (2006): *EU onderzoeksproject ENK5-CT-2002-00699 "Reduction of Toxic Metal Emissions from Industrial Combustion Plants - Impact of Emission Control Technologies -"*.
- TFZ. (2005): *Vereinfachte Überwachung der Staubemissionen bei Holz-Kleinf Feuerungsanlagen (Delta-pMethode)*. Abschlussbericht 183, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, Januar 2005.
- UBA (2006a): *Umwelt Bundes Amt, "Hintergrundpapier: Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit: Feinstaub aus Kamin und Holzöfen."* pp. 1-8.
- UBA (2006b): *Umwelt Bundes Amt Presse-Information 013/2006, "Feinstaub aus Kaminen und Holz-Öfen verringern; Moderne Holzfeuerungsanlagen, strengere Auflagen und mehr Aufklärung helfen gegen den gesundheitsschädlichen Feinstaub"*. Beschikbaar op internet via: www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2006/pd06-013.htm.
- Uyterlinde, M.A., B.W. Daniëls, M. de Noord, H.J. de Vries, C. de Zoeten - Dartenset (ECN, Petten (Netherlands)); Skytte, K. (Risoe); Meibom, P. (Risoe); Lescot, D. (Observer); Hoffmann, T. (ZEW); Stronzik, M. (ZEW); Gual, M. (CSIC); Rio, P. del (CSIC); Hernández, F. (CSIC) (2003): *Renewable electricity market developments in the European Union*. Final report of the ADMIRE REBUS project ECN-C--03-082 (October 2003) <<http://www.ecn.nl/library/reports/2003/c03082.html>>.
- Van de Ven, H. (DHV) Joost Wesseling (TNO), ans van der Reijden (RIGO), Marjolein Demmers, Arno Fluitman, Erik Regterschot (DV) (2005): *Lucht voor ruimtelijke plannen; Inventarisatie van de invloed van beleid en regelgeving voor lucht kwaliteit op knelpunten bij de realisatie van ruimtelijke plannen in Nederland*.
- Van Rens, G.L.M.A. en H.P.J. de Wilde (2006): *Pre- and after-treatment techniques for diesel engines in inland navigation*. Technical report in the framework of EU project CREATING (M06.03, Task II), ECN-RX--05-175 , Maart 2006.
- Van Tilburg X. et al. (2005): *Inzet van biomassa in zelfstandige kleinschalige installaties voor de opwekking van elektriciteit - Berekening van de onrendabele top*, ECN-C--05-016, September 2005.
- Verhoeff, F., C.M. van der Meijden, H. Ratering, E. de Kant, H. Bos (2004): *Branderonderzoek; t.b.v. de verbranding van laag calorisch ammoniakrijk biomassa stookgas*, ECN rapport ECN-C--04-104, 2004.
- Voorburg/Heerlen, 2005
- Vries, H.J. de, X. van Tilburg (ECN), A.E. Pfeiffer, M. Beekes, J.W. Cleijne (KEMA) (2005): *Aanvulling Inzet van bio-olie in zelfstandige kleinschalige installaties voor de opwekking van elektriciteit*, ECN-C--05-096, October 2005.
- VROM (2002): *Circulaire: Emissiebeleid voor energiewinning uit biomassa en afval* (Geldigheid: geldig tot inwerkingtreding gewijzigd BEES A & B en BLA), KVI2002023389.
- Van der Drift, A. (2005): *Vision on biomass gasification*, ECN rapport ECN-CX--05-00.
- Widmann, B.A. et.al. (2002): *Pflanzenölbetrieben Blockheizkraftwerke; Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen Schwachstellenanalyse aund Bewertung*. Abschlussbericht 176, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, Juli 2002.

Lijst van afkortingen

CFB	Circulating Fluidised Bed (Circulerend wervelbed)
CRT™	Continuously Regenerating Technology (Continue regeneratie van een roetfilter)
ESP	ElectroStatic Precipitator (elektrostatisch filter)
IPPC	Integrated Pollution and Prevention Control; Een EU richtlijn met regels voor het vergunnen en handhaven van industriële installaties.
NO _x	Nitrogen Oxides (Stikstofoxiden; het totaal van de verbindingen NO ₂ en NO ₃)
PM ₁₀	De massa van alle stofdeeltjes (Particulate Matter; fijn stof) met een (aërodynamische) diameter kleiner dan 10 micrometer.
ROI	Rookgas Ontzwaveling Installatie