

# De mogelijke aanscherping van vijf eisen in het Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties

A.J. Plomp  
P. Kroon

Mei 2013  
ECN-E--13-029



# Verantwoording

Dit rapport is in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu opgesteld. Bij ECN is dit project bekend onder de projectnummers 50580 en 51894.

## Abstract

To control local air quality and to prevent greenhouse gas emissions, the Dutch government has established legislation to restrict such emissions from medium-sized stationary gas engines and heating installations, the so-called Bems legislation. These medium-sized stationary engines, turbines, boilers and other installations are mainly in use in the industry, greenhouse horticulture and services sector. When the Bems legislation entered into force, five possible emission limit values (ELVs) were discussed but not implemented at that time, partly due to the limited availability of knowledge at that time within the market about the required technical measures to meet these ELVs. On request of the Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment, the current available knowledge on these five ELVs with respect to  $\text{NO}_x$ , dust and methane emissions, has been explored and the results are discussed in this report. To that purpose, technical knowledge, foreign environmental legislation, potential emission reductions and costs have been analyzed. The ELVs discussed here are set at an  $\text{O}_2$  concentration of 3% in the flue gas according to Bems legislation. The indicated ELVs have no official status and have a recommendatory meaning to the Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment. The Ministry decides on implementation and the value of the discussed ELVs.

It is technically feasible to meet the proposed  $\text{NO}_x$  ELV for small gas engines (up to 2.5  $\text{MW}_{\text{th}}$  or 1  $\text{MW}_{\text{e}}$ ) and biogas engines of 100  $\text{mg NO}_x/\text{Nm}^3$  in the flue gas (the current ELV is 340  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) via Selective Catalytic Reduction (SCR). Using Exhaust Gas Recirculation, turbo engines can be deployed while using the cheaper three-way catalyst. Turbo engines are in use in the USA and Switzerland and have generally higher  $\text{NO}_x$ -emissions as compared to SCR-equipped engines. For biogas engines, problematic compounds such as siloxanes in the biogas need to be removed with commercially available filter techniques in order to protect the engine and the required catalysts. What could be considered here is to implement an ELV of 140  $\text{mg NO}_x/\text{Nm}^3$  for small natural gas and biogas engines (up to 2.5  $\text{MW}_{\text{th}}$  or 1  $\text{MW}_{\text{e}}$ ), while for larger biogas engines an ELV could be set at a value of 100  $\text{mg NO}_x/\text{Nm}^3$ .

Currently, the dust ELV for (bio)diesel engines is 50  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ . It is technically feasible to meet the proposed dust ELV for (bio)diesel engines of 15  $\text{mg PM}_{10}/\text{Nm}^3$  in the flue gas. Some installations already meet this ELV by using a commercially available dust filter. Despite the fact that large, stationary diesel engines are rarely equipped with dust filters, mainly because of the required fuel qualities, the Ministry could implement the proposed ELV, especially since the USA is implementing comparable ELVs in the period 2014-2017. Therefore, a large engine and filter market is expected by that time, enabling operators of engines to meet the proposed ELV.

“Hoewel de informatie in dit rapport afkomstig is van betrouwbare bronnen en de nodige zorgvuldigheid is betracht bij de totstandkoming daarvan kan ECN geen aansprakelijkheid aanvaarden jegens de gebruiker voor fouten, onnauwkeurigheden en/of omissies, ongeacht de oorzaak daarvan, en voor schade als gevolg daarvan. Gebruik van de informatie in het rapport en beslissingen van de gebruiker gebaseerd daarop zijn voor rekening en risico van de gebruiker. In geen enkel geval zijn ECN, zijn bestuurders, directeuren en/of medewerkers aansprakelijk ten aanzien van indirecte, immateriële of gevolgschade met inbegrip van gederfde winst of inkomsten en verlies van contracten of orders.”

The proposed NO<sub>x</sub> requirement for (bio)diesel engines of 140 mg/Nm<sup>3</sup> (current ELV is 450 mg/Nm<sup>3</sup>) is difficult to meet, especially for large engines. This is mainly due to the required high removal efficiency of 97 to 98% with SCR, which is necessary to meet the proposed ELV. This high removal efficiency is technically difficult to reach and is very expensive. Since the USA is tightening its ELVs for this compound for diesel engines in the period 2014-2017, many manufacturers are currently developing engines to meet the future ELVs of the USA. An ELV of 250 mg/Nm<sup>3</sup> could be implemented, which approaches the USA ELV for mid-sized diesel engines.

The proposed methane requirement for large gas engines of 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> (the current ELV is 1500 mg C/Nm<sup>3</sup>) is technically feasible for particular engine types. Purchasing the correct engines enables to meet this requirement without additional flue gas treatments. Therefore, it could be considered to implement the proposed ELV for new engines. Technically, it is possible to equip existing engines with end-of-pipe techniques. Regenerative afterburners seem to be particularly suitable. These techniques will result in very low methane emissions. For existing engines, a transition arrangement could be considered.

Currently, small gas engines (up to 2.5 MW<sub>th</sub> or 1 MW<sub>e</sub>) do not have to comply with a methane ELV as they generally have low methane emissions. However, if the air-to-fuel ratio is changed to leaner burning conditions due to stricter NO<sub>x</sub> ELVs, methane emissions may increase. Gas engines are often used for CHP applications. Higher methane emissions from especially small, natural gas engines will undo a substantial part of the CO<sub>2</sub> savings achieved by CHP engines. Therefore, what could be considered here is to also implement the proposed ELV of 1200 mg/Nm<sup>3</sup> for small, natural gas engines.

Currently, biogas engines do not have to comply with a methane ELV. Emission measurements demonstrate that these engines can meet methane ELVs too. Due to the variable composition of biogas and the fact that utilization of biogas in engines reduces diffuse methane emissions resulting from spontaneous digestion, implementation of an ELV could be considered, but not at a strict level. Therefore, an ELV for biogas engines at a level of 1500 mg/Nm<sup>3</sup> could be considered.



# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Algemeen	11
1.2	Aanwijzingen voor de lezer	12
<b>2</b>	<b>NO<sub>x</sub> eis voor kleine aardgasmotoren</b>	<b>14</b>
2.1	Aanscherping NO <sub>x</sub> -eisen gasmotoren	14
2.2	Toepassing katalysatoren bij kleine aardgasmotoren (tot 1 MW <sub>e</sub> /2,5 MW <sub>th</sub> )	15
2.3	Wetgeving kleine gasmotoren (tot 1 MW <sub>e</sub> /2,5 MW <sub>th</sub> )	22
2.4	Verwachte kosten en effecten	26
2.5	Conclusies kleine gasmotoren	27
<b>3</b>	<b>Scherpere NO<sub>x</sub>-eis voor Biogasmotoren</b>	<b>28</b>
3.1	Aanscherping NO <sub>x</sub> -eisen biogasmotoren	28
3.2	Technische analyse biogasmotoren	29
3.3	Reiniging van het biogas	37
3.4	Wetgeving biogasmotoren	39
3.5	Verwachte kosten en effecten	41
3.6	Conclusie biogas in gasmotoren	42
<b>4</b>	<b>Aanscherping fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren</b>	<b>43</b>
4.1	Aanscherping fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren	43
4.2	Technische analyse stof-eis (bio)dieselmotoren	44
4.3	Wetgeving stofemissie	47
4.4	Verwachte kosten en effecten	52
4.5	Conclusie fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren	54
<b>5</b>	<b>Scherpere NO<sub>x</sub>-eis bij (bio)dieselmotoren</b>	<b>56</b>
5.1	Aanscherping NO <sub>x</sub> -eis bij (bio)dieselmotoren	56
5.2	Technische analyse NO <sub>x</sub> -eis (bio)dieselmotoren	56
5.3	Wetgeving NO <sub>x</sub> -emissie (bio)dieselmotoren	59
5.4	Verwachte kosten en effecten	60

5.5	Conclusie NO <sub>x</sub> -eis voor (bio)dieselmotoren	60
<b>6</b>	<b>Aanscherping methaan-eis bij gasmotoren</b>	<b>62</b>
6.1	De methaan-eis bij gasmotoren	62
6.2	Metingen aan methaanemissies	64
6.3	Reductie van de methaanemissie bij gasmotoren	69
6.4	Wetgeving methaanemissie gasmotoren	76
6.5	Verwachte kosten en effecten	78
6.6	Conclusie methaan-eis bij gasmotoren	79
<b>7</b>	<b>Invoering methaan-eis bij biogasmotoren en kleine aardgasmotoren</b>	<b>81</b>
7.1	Invoering methaan-eis bij biogasmotoren en kleine aardgasmotoren	81
7.2	Technische analyse methaanemissie biogasmotoren en kleine gasmotoren	82
7.3	Wetgeving methaanemissie	83
7.4	Verwachte kosten en effecten	84
7.5	Conclusie methaan-eis bij biogasmotoren	85
	<b>Referenties</b>	<b>87</b>
Bijlage A.	Afkortingen & Omrekeningen	102
Bijlage B.	Methaanemissie versus vermogen	104
Bijlage C.	Commentaar van PlaGaMo	105
Bijlage D.	Commentaar van Platform Bio-energie	110

# Samenvatting

## Aanleiding onderzoek

Stookinstallaties kleiner dan 50 MW<sub>th</sub> dienen aan emissienormen te voldoen, volgens het Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties (Bems). De Bems-wetgeving is sinds 1 april 2010 van kracht en is sinds 1 januari 2013 integraal verplaatst naar het Activiteitenbesluit, paragraaf 3.2.1. Bij de invoering van Bems zijn een vijftal mogelijke aanscherpingen uitgesteld, voornamelijk vanwege onvoldoende kennis rondom beschikbare technische maatregelen om aan deze eisen te voldoen. Er is toen besloten om bij evaluatie van de Bems-wetgeving deze mogelijke aanscherpingen opnieuw te inventariseren. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu heeft in het kader van voornoemde evaluatie ECN de opdracht gegeven een studie uit te voeren naar de huidige stand van kennis rond deze vijf mogelijke aanscherpingen. De volgende mogelijke aanscherpingen lagen indertijd ter tafel:

## Initiële voorstel voor mogelijke aanscherpingen van Bems eisen

- NO<sub>x</sub>-eis bij kleine aardgasmotoren (tot 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub>) en biogasmotoren van 340 mg/Nm<sup>3</sup> naar 100 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>.
- Totaal stof-eis bij (bio)dieselmotoren van 50 mg/Nm<sup>3</sup> naar 15 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Gezien het karakter van de stofemissies uit (bio)dieselmotoren, kleiner dan PM10, wordt deze eis in dit rapport gerefereerd als fijnstof-eis.
- NO<sub>x</sub>-eis bij (bio)dieselmotoren van 450 mg/Nm<sup>3</sup> naar 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>.
- Methaan-eis bij grote aardgasmotoren van 1500 mg/Nm<sup>3</sup> naar 1200 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>.
- Methaan-eis bij biogasmotoren en kleine aardgasmotoren. Voor deze categorie geldt momenteel geen methaan-eis; ook is er bij de toenmalige discussie geen eenduidig voorstel ter tafel gekomen.

Er wordt hier benadrukt dat de in dit rapport genoemde waarden voor mogelijke emissie-eisen geen officiële status hebben. Omtrent alle voornoemde aanscherpingen formuleert ECN in dit rapport haar conclusies op grond van technologische kennis, buitenlandse wetgeving, reductiepotentiëlen en kosten. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu beslist omtrent eventuele invoering en het eventuele niveau van de voornoemde eisen. In Bems staat een overgangsrecht voor installaties geplaatst voor 1 april 2010, waarbij diverse typen van deze installaties in de toekomst moeten gaan voldoen aan dezelfde emissie-eisen als de nieuw geplaatste installaties. Indien de wetgeving wordt aangescherpt ten aanzien van de emissie-eisen voor middelgrote

stookinstallaties, beslist het Ministerie omtrent een overgangsrecht voor bestaande installaties.

Voor kleine aardgasmotoren (tot 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub>) is er geen technische belemmering om aan de voorgestelde NO<sub>x</sub>-eis te voldoen. De specifieke reductiekosten nemen toe bij kleinere motoren, maar in de praktijk worden reeds installaties technisch zodanig uitgerust dat de NO<sub>x</sub>-emissies onder de voorgestelde eis liggen. Dit gebeurt meestal bij glastuinders, waar het rookgas wordt toegepast als CO<sub>2</sub>-bemesting voor de teelt. Er is weinig wetgeving in het buitenland op het niveau van de voorgestelde aanscherping. Alleen in de VS en in Zwitserland zijn er regio's waar scherpe eisen ten aanzien van NO<sub>x</sub>-emissies uit gasmotoren van kracht zijn. Overwogen kan worden om op termijn een aangescherpte eis in te voeren voor nieuwe motoren, maar niet op het niveau van het hier besproken voorstel. Een soepelere emissie-eis op het niveau van 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (omgerekend 40 g/GJ) zal voor diverse typen motoren haalbaar zijn, zodat het aanbod van motoren, ook met goedkopere reductietechnieken, voldoende gegarandeerd is. Een uitgebreide beschrijving voor deze categorie motoren is te vinden in hoofdstuk 2.

NO<sub>x</sub>-eis bij kleine aardgasmotoren

Net als bij gasmotoren op aardgas kunnen ook biogasmotoren technisch voldoen aan de voorgestelde NO<sub>x</sub>-eis. Om aan de voorgestelde NO<sub>x</sub>-eis te voldoen, is bij waterzuiveringsinstallaties of stortplaatsen wel reiniging van het biogas noodzakelijk voorafgaand aan verbranding in de motor; zodoende wordt beschadiging aan katalysator en motor voorkomen. Geschikte filters zijn echter commercieel beschikbaar. Bij mestvergisting is zwavelverwijdering noodzakelijk om reductietechnologie voor NO<sub>x</sub> toe te passen. Technologie hiervoor wordt reeds veelvuldig toegepast en is commercieel beschikbaar. Er is weinig wetgeving in het buitenland op het niveau van de voorgestelde aanscherping. Alleen in de VS en in Zwitserland zijn er regio's waar scherpe eisen ten aanzien van NO<sub>x</sub>-emissies uit biogasmotoren van kracht zijn. Overwogen kan worden om op termijn de voorgestelde eis van 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> in te voeren voor nieuwe biogasmotoren in de vermogensklasse 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub> en groter. Verder kan men overwegen om voor biogasmotoren kleiner dan deze vermogensgrens op termijn een emissie-eis in te voeren op het niveau van 140 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Deze eis zal voor diverse typen motoren, ook met goedkopere reductietechnieken, haalbaar zijn en het aanbod aan motoren kan zodoende gegarandeerd worden. Verder kan men overwegen om deze eisen niet eerder inwerking te laten treden dan 2016, zodat dit gelijk loopt met de datum van inwerkingtreding van vergelijkbare eisen in de SCAQMD-regio in Californië. Een uitgebreide beschrijving voor deze categorie motoren is te vinden in hoofdstuk 3.

NO<sub>x</sub>-eis bij biogasmotoren

Voor (bio)dieselmotoren is de eis van 15 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> technisch haalbaar en zijn er reeds installaties uitgerust met commercieel verkrijgbare filters die aan deze voorgestelde eis voldoen. Wel wordt opgemerkt dat stoffilters bij dieselmotoren groter dan 1 MW<sub>e</sub> weinig worden toegepast om economische redenen en omdat de toegepaste dieselkwaliteit geen filtertoepassing toelaat. Voor toepassing van een filter is het namelijk veelal noodzakelijk om laagzwavelige brandstoffen toe te passen. In enkele landen, namelijk Duitsland en de VS, zijn er eisen van kracht die vergelijkbaar zijn met of scherper zijn dan het hier beschreven voorstel. Het kan overwogen worden om invoering van de voorgestelde fijnstof-eis te implementeren voor nieuwe motoren en de inwerkingstrededatum zoveel mogelijk gelijk te laten lopen met invoering van de

Fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren

eisen in VS. Een uitgebreide beschrijving voor deze categorie motoren is te vinden in hoofdstuk 4.

NO<sub>x</sub>-eis bij (bio)dieselmotoren

De aangescherpte NO<sub>x</sub>-eis voor dieselmotoren is technisch niet zo gemakkelijk haalbaar. Indien de emissie zonder nageschakelde techniek al redelijk laag is, zoals bij nieuwe, kleinere motoren met een hoog toerental het geval is, kan met nageschakelde techniek aan de eis voldaan worden. Bij de zeer grote motoren ligt de NO<sub>x</sub>-emissie zodanig hoog dat nageschakelde techniek nodig is met een hoge verwijderingsgraad voor NO<sub>x</sub> om aan de voorgestelde eis te voldoen. Technisch is een hoge verwijderingsgraad mogelijk en de techniek is ook commercieel beschikbaar, maar het is wel duur. In de VS worden vanaf 2012 eisen aan dieselmotoren van 75 tot 560 kW gesteld die het niveau van het Nederlandse voorstel benaderen. Er wordt door diverse motorfabrikanten veel onderzoek verricht naar technische aanpassingen van grote dieselmotoren om aan scherpe NO<sub>x</sub>-eisen te kunnen voldoen. Dit biedt zicht op commercieel beschikbare motoren die aan de voorgestelde eis kunnen voldoen in combinatie met een standaard nageschakelde techniek. Overwogen kan worden om, in afwachting van diverse ontwikkelingen op het gebied van dieselmotoren, een aangescherpte NO<sub>x</sub> eis te implementeren voor nieuwe motoren, maar niet op het niveau van de voorgestelde 140 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (40 g/GJ). Hoewel voor een deel van de vermogens een gelijkwaardige eis is geformuleerd onder Tier 4 in de VS, vallen de grotere vermogenscategorieën onder een soepelere eis, namelijk 74 g/GJ. Omgerekend zou een nagenoeg gelijke emissie-eis op een niveau van 250 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> kunnen liggen. De zeer grote motoren vallen onder Tier 4 onder soepelere eisen dan voornoemd. Vanwege eenduidigheid in de regelgeving en het creëren van een gelijk speelveld voor de diverse vermogenscategorieën zou men aan alle overige vermogenscategorieën een gelijke eis kunnen stellen. Een uitgebreide beschrijving voor deze categorie motoren is te vinden in hoofdstuk 5.

Methaan-eis bij grote aardgasmotoren

Nederland loopt voorop met de bestaande methaan-eis voor stationaire gasmotoren. Het aantal gasmotoren dat in Nederland staat en het effect van de methaanslip van deze motoren, vormt echter een belangrijke drijfveer om eisen aan deze installaties op te leggen. Technisch is ook de aangescherpte methaan-eis van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> goed haalbaar voor nieuwe motoren zonder nageschakelde technieken. Voor bestaande motoren is het technisch mogelijk om aan de eis te voldoen, bijvoorbeeld door het plaatsen van een naverbrander of een oxidatiekatalysator in combinatie met verhitting. Ook motorzijdige aanpassingen, in het bijzonder de lambda-afstelling, lijkt voor een deel van het bestaande gasmotorpark voldoende mogelijkheden te bieden om de methaanemissies tot beneden de gewenste niveaus te reduceren. Een mogelijke toename van NO<sub>x</sub>-emissie door motorzijdige aanpassingen kan, middels nageschakelde technieken welke veelal toch toegepast dienen te worden voor nieuwe motoren, alsnog gereduceerd worden. Overwogen kan worden om de voorgestelde eis, 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, in te voeren voor nieuwe motoren, zodat reeds bij aanschaf, zonder toepassing van nageschakelde technieken, een beperktere methaanslip wordt gecreëerd. Een uitgebreide beschrijving voor deze categorie motoren is te vinden in hoofdstuk 6.

Methaan-eis bij biogasmotoren

De methaanemissiepatronen van biogasmotoren geven weinig reden om deze fundamenteel anders te behandelen dan aardgasmotoren. Voor nieuwe motoren is het technisch mogelijk om bij juiste motorkeuze aan een methaan-eis te voldoen, hoewel



relatief weinig meetgegevens beschikbaar zijn voor biogasmotoren. Door het plaatsen van bijvoorbeeld een naverbrander of een na-oxidatie systeem, kunnen ook bestaande installaties technisch aan een methaan-eis voldoen. Alleen Denemarken heeft een methaan-eis voor biogasmotoren ingevoerd en die is ruimer dan het Nederlandse voorstel. De voorgestelde eis betreft wel biogasmotoren die draaien op vergistingsgas. Weliswaar wordt bij nuttige aanwending van biogas een zo hoog mogelijke methaanproductie nagestreefd, maar in veel gevallen zou door natuurlijke vergisting, diffuse methaanemissie hebben plaatsgevonden als dit biogas niet zou zijn toegepast. Op grond hiervan is een methaan-eis gerechtvaardigd, maar op een soepeler niveau in vergelijking met aardgasmotoren. Daarnaast zijn veel biogasmotoren relatief klein en lijken veelal geen excessieve methaanemissies te hebben; daarom kan overwogen worden om op basis van de huidige inzichten een methaan-eis te stellen op het niveau van 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Op deze wijze kunnen eventuele excessief hoge methaanemissies uit biogasmotoren worden aangepakt en eveneens een excessieve toename van methaanemissies ten gevolge van andere ontwikkelingen, zoals andere emissie-eisen ten aanzien van NO<sub>x</sub>, worden voorkomen. Tenslotte zou het goed zijn om het biogasmotorpark in Nederland uitgebreider te inventariseren en de methaanemissies, ook ten gevolge van andere emissie-eisen, beter in kaart te brengen. Een uitgebreide beschrijving voor deze categorie motoren is te vinden in hoofdstuk 7.

Toepassing van aardgasmotoren als warmte-kracht installaties bespaart CO<sub>2</sub>-emissies. In het bijzonder bij kleine aardgasmotoren zullen hoge methaanemissies een aanzienlijk deel van deze CO<sub>2</sub>-besparing teniet doen. Hoge methaanemissies bij kleine aardgasmotoren zijn daarom minstens zo ongewenst als grote aardgasmotoren met hoge methaanemissies. Op dit moment zal over het algemeen een eis van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> voor kleine aardgasmotoren geen enkel probleem vormen, omdat veel motoren onder dit niveau emitteren. Wellicht dat de NO<sub>x</sub>-eisen voor bestaande motoren een extra arme (lean burn) afstelling noodzakelijk gaat maken, waardoor een aantal kleine motoren in de toekomst een toename van de methaanemissie laat zien. Overwogen kan worden om voor nieuwe, kleine aardgasmotoren een methaan-eis te formuleren en deze gelijk te trekken met de eis voor de grote vermogenscategorie. Dat komt dus overeen met de eerder vermelde emissie-eis van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Daarnaast zou het goed zijn om de bestaande, kleine aardgasmotoren uitgebreider te inventariseren ten aanzien van methaanemissies. Een uitgebreide beschrijving voor deze categorie motoren is te vinden in hoofdstuk 7.

Methaan-eis bij kleine  
aardgasmotoren

**Tabel 1:** Samenvatting van de mogelijke aanscherping van eisen

	Huidige eis in Bems (mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> )	Initiële voorstel (mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> )	Overweging mogelijke eis in deze studie (mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> )
NO <sub>x</sub> -eis aardgasmotoren en biogasmotoren ( < 1 MW <sub>e</sub> /2,5 MW <sub>th</sub> )	340	100	140
NO <sub>x</sub> -eis biogasmotoren ( ≥ 1 MW <sub>e</sub> /2,5 MW <sub>th</sub> )	340	100	100
Fijnstof-eis (bio)dieselmotoren	50	15	15
NO <sub>x</sub> -eis (bio)dieselmotoren	450	140	250
Methaan-eis aardgasmotoren ( ≥ 1 MW <sub>e</sub> /2,5 MW <sub>th</sub> )	1500	1200	1200
Methaan-eis aardgasmotoren ( < 1 MW <sub>e</sub> /2,5 MW <sub>th</sub> )	Geen	Geen	Gelijktrekken met categorie ( ≥ 1 MW <sub>e</sub> /2,5 MW <sub>th</sub> ), conform overweging dus 1200
Methaan-eis biogasmotoren (alle vermogens)	Geen	Geen	1500

Omvang van de verwachte  
reductie

In **Tabel 2** is een overzicht gegeven van de berekende kosten en effecten. Hierin zitten forse onzekerheden. Indien de kosten en effecten zwaar meewegen bij besluitvorming rondom de bediscussieerde emissie-eisen, is het advies om nieuwe berekeningen uit te laten voeren. De kostencijfers zijn aangevuld met een indicatie van de kosten voor de eigenaar in eurocent per kWh indien deze met de motor elektriciteit zou produceren.

**Tabel 2:** Indicatie kosteneffectiviteit en effecten van de diverse maatregelen

	Reductie	Kosten	Kosten in [mln €/jr]	Kosten in [€/kWh]
Aanscherping NO <sub>x</sub> -eis kleine aardgasmotoren	1 kton NO <sub>x</sub>	15-25 €/kg NO <sub>x</sub>	15-25	0,6-1,1
Aanscherping NO <sub>x</sub> -eis biogasmotoren	0,4 kton NO <sub>x</sub>	10-15 €/kg NO <sub>x</sub>	4-6	0,6-0,9
Aanscherping stofeis (bio)dieselmotoren	0,03 kton fijnstof	4-20 €/kg stof	0,1-0,6	0,1-0,5
Aanscherping NO <sub>x</sub> -eis (bio)dieselmotoren	0,3 kton NO <sub>x</sub>	1 €/kg NO <sub>x</sub>	0,3	0,3
Aanscherping methaan-eis grote aardgasmotoren	0,1 Mton CO <sub>2</sub> -eq	0-60 €/ton CO <sub>2</sub> -eq	0-6	0-0,5
Invoering methaan-eis biogasmotoren	0,02-0,03 Mton CO <sub>2</sub> -eq	0-60 €/ton CO <sub>2</sub> -eq	0-2	0-0,5

# 1

## Inleiding

### 1.1 Algemeen

Stookinstallaties groter dan 50 MW<sub>th</sub> en andere installaties die onder de provinciale vergunningverlening vallen, worden gereguleerd in het Bees A en de IPPC-directive. Stookinstallaties kleiner dan 50 MW<sub>th</sub>, zowel ketels, turbines als motoren, vielen tot 31 maart 2010 onder Bees B (VROM, 1998) maar sinds 1 april 2010 onder het nieuwe Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties (Bems) (VROM, 2008, 2009a, 2009b). Vandaar zijn de eisen inmiddels overgezet naar het Activiteitenbesluit. Deze installaties hebben in het Bems actuele en op BBT gebaseerde emissie-eisen gekregen. Bij het ontwerp van de Bems-wetgeving zijn vijf mogelijke aanscherpingen bediscussieerd en er is indertijd besloten deze tijdens een evaluatie van de Bems-wetgeving opnieuw te laten onderzoeken. Het onderzoek naar deze mogelijke aanscherpingen is uitgevoerd en hier gerapporteerd. Omdat deze evaluatie direct voortvloeit uit de Bems-wetgeving, zal in dit rapport veelvuldig naar Bems worden verwezen, hoewel de emissie-eisen nu in het Activiteitenbesluit zijn opgenomen (IenM, 2012).

De volgende mogelijke aanscherpingen lagen indertijd ter tafel:

- NO<sub>x</sub>-eis bij kleine aardgasmotoren (tot 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub>) en biogasmotoren van 340 mg/Nm<sup>3</sup> naar 100 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>.
- Totaal stof-eis bij (bio)dieselmotoren van 50 mg/Nm<sup>3</sup> naar 15 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Gezien het karakter van de stofemissies uit (bio)dieselmotoren, kleiner dan PM10, wordt deze eis in dit rapport gerefereerd als fijnstof-eis.
- NO<sub>x</sub>-eis bij (bio)dieselmotoren van 450 mg/Nm<sup>3</sup> naar 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>.
- Methaan-eis bij aardgasmotoren van 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> naar 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>.
- Methaan-eis bij biogasmotoren en kleine aardgasmotoren. Voor deze categorie geldt momenteel geen methaan-eis; ook is er bij de toenmalige discussie geen eenduidig voorstel ter tafel gekomen.

De hier genoemde waarden zijn door ECN als uitgangspunt gebruikt. Er zijn conclusies en overwegingen over elke mogelijke aanscherping uitgebracht, waarbij afgeweken kan

Bems overgeplaatst naar het Activiteitenbesluit

Initiële voorstel voor mogelijke aanscherpingen van Bems eisen

worden van de hier voornoemde waarden. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu beslist of deze eisen ingevoerd zullen worden en beslist eveneens over het niveau van de eis. Het Ministerie beslist ook omtrent een overgangsrecht voor bestaande installaties, indien de wetgeving wordt aangescherpt ten aanzien van de emissie-eisen voor middelgrote stookinstallaties,.

In dit rapport geeft ECN Beleidsstudies aan wat de bij hun beschikbare en huidige stand van kennis is ten aanzien van deze mogelijke aanscherpingen op het gebied van technologische ontwikkelingen, wetgeving in het buitenland, reductiepotentiëlen en kosten. In dit rapport zijn alleen de directe literatuurreferenties in de tekst aangegeven. Er is niet gerefereerd naar directe (internationale) contacten met producenten en stakeholders en literatuur- en internetbronnen die ter controle zijn doorgenomen. Aan het eind van elk hoofdstuk is een overzicht van de conclusies opgenomen.

## 1.2 Aanwijzingen voor de lezer

### Rookgascondities

Op meerdere locaties in dit rapport komen diverse eenheden terug. De lezer dient deze eenheden steeds in acht te nemen. Emissies of emissie-eisen zijn zoveel als mogelijk teruggerekend naar de eenheid, zoals deze gehanteerd wordt in Nederlandse wetgeving. In het Activiteitenbesluit (zie onder meer paragraaf 1.1.1 en 3.2.1) worden emissies uitgedrukt als concentratie in droog rookgas bij standaard temperatuur (273 K) en druk (101,3 Pa) en een standaard referentie zuurstofpercentage (3% O<sub>2</sub>). Emissies worden in dit rapport weergegeven als mg/Nm<sup>3</sup> bij het genoemde zuurstofpercentage; andere rapporten gebruiken ook wel de gelijkwaardige notatie mg/m<sub>0</sub><sup>3</sup> (Infomil, 2013).

Het standaard referentie zuurstofpercentage (3% O<sub>2</sub>) betekent niet noodzakelijk dat de verbranding in een installatie ook daadwerkelijk bij dit zuurstofpercentage plaatsvindt. Gasmotoren worden veelal bij een aanzienlijk hoger zuurstofpercentage bedreven dan 3% O<sub>2</sub>. Emissies worden dan vanuit de praktijk zuurstofconcentratie teruggerekend naar het standaard zuurstofpercentage.

### Diverse eenheden van emissies

**Emissies en emissie-eisen worden wereldwijd op diverse manieren gepresenteerd. Enkele voorbeelden die relevant zijn voor dit rapport:**

**Emissieconcentraties kunnen bij diverse referentie-zuurstofpercentages weergegeven worden. Dit kan vrij eenvoudig worden teruggerekend naar 3% O<sub>2</sub>. Afwijkende referentie-zuurstofpercentages resulteren veelal in sterke afwijkingen van emissieconcentraties.**

**Emissieconcentraties worden soms uitgedrukt in ppm of ppmvd, dat is “parts per million, volumetric dry”. Ook bij deze uitdrukking dient het referentie zuurstofpercentage vermeld te worden. Op basis van het molecuulgewicht van de betreffende doelstof kan dit worden omgerekend naar de in Nederland gebruikelijke notatie.**

Naast emissieconcentraties in het rookgas worden emissies ook regelmatig weergegeven per eenheid brandstofinzet (g/GJ), waarbij het van belang is dat het type brandstof helder omschreven is; het type brandstof bepaalt immers de hoeveelheid rookgas en is sterk van invloed op de emissies. Voor dit rapport is dat voornamelijk aardgas, biogas of (bio)diesel.

Emissies worden ook regelmatig weergegeven per eenheid (kinetische) output, zoals g/kWh. Een ander voorbeeld hiervan is gram per brake horsepower-hour (g/bhp-hr). Dit dient te worden omgerekend naar brandstofinzet, voordat dit naar emissieconcentratie in het rookgas kan worden omgerekend. Via het motorrendement kan dit worden omgerekend (zie ook Bijlage A). Voor motoren is in dit rapport veelal een motorrendement van 40% aangenomen. Voor gasmotoren is dit overeenkomstig het motorpark in de glastuinbouw (Smit & Van der Velden, 2008); moderne gasmotoren kunnen hogere rendementen halen (KEMA, 2011). Ook voor dieselmotoren is dit een relatief behoedzame aanname (West, 2006).

Voor gasmotoren gelden er voor verschillende vermogensklassen andere eisen. De grens voor dit thermisch inputvermogen is volgens Bems 2,5 MW<sub>th</sub> of groter. Motoren gelijk aan en boven deze vermogensgrens worden “grote motoren” genoemd in dit rapport, terwijl motoren beneden deze vermogensgrens “kleine motoren” worden genoemd. Op deze wijze wordt dus gerefereerd naar de vermogensgrens conform Bems. Conform het voornoemde rendement, dat is 40%, wordt deze vermogensgrens veelal omgerekend naar 1 MW<sub>e</sub>. In dit rapport worden beide grenswaarden regelmatig genoemd, omdat het elektrisch vermogen in diverse studies wel wordt gerapporteerd en het vermogen op basis van thermische input regelmatig ontbreekt. Uiteraard is in Nederland voor regelgeving in de praktijk de wetstekst leidend en resulteren motorrendementen anders dan 40% in een afwijkende vermogensgrens op basis van output dan voornoemd; dus bij hogere motorrendementen groter dan 1 MW<sub>e</sub> en bij lagere motorrendementen vice versa.

Enkele begripsbepalingen voor motoren in dit rapport

# 2

## NO<sub>x</sub> eis voor kleine aardgasmotoren

### 2.1 Aanscherping NO<sub>x</sub>-eisen gasmotoren

Voorstel aanscherping

In dit hoofdstuk het voorstel onderzocht om de NO<sub>x</sub>-eis bij kleine aardgasmotoren (tot 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub>) aan te scherpen van 340 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> in het rookgas naar 100 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (van 95 g/GJ naar 28 g/GJ). Deze emissie-eis geldt sinds 1 april 2010 al voor nieuwe aardgasmotoren van 2,5 MW<sub>th</sub> en groter. In dit hoofdstuk zal de situatie bij kleine aardgasmotoren worden geanalyseerd. In hoofdstuk 3 wordt de situatie beschreven voor biogasmotoren.

Bems eis uit 2010

Bij de invoering van Bems is de emissie-eis voor deze kleine motoren al aangescherpt van 500 mg/Nm<sup>3</sup> x 1/30% x elektrisch motorrendement naar 340 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Voor nieuwe motoren geldt deze eis per 1 april 2010, terwijl voor bestaande motoren de eis uiterlijk in 2017 of 2019 in zal gaan. Aan deze eis kan in de meeste gevallen worden voldaan door de motor armer (meer lean burn) af te stellen of door een SCR (Selective Catalytic Reduction) te installeren. De eerstgenoemde maatregel gaat gepaard met een klein rendementsverlies en extra emissie van (onverbrande) koolwaterstoffen; de tweede maatregel vereist een investering in een SCR-installatie.

Opgesteld aantal kleine gasmotoren

Het Nederlandse gasmotorpark is in 2008 geïnventariseerd voor een studie van ECN (Kroon & Wetzels, 2008). Uit de inventarisatie van diverse vermogensklassen bleken toen ruim 3000 gasmotoren kleiner dan 1 MW<sub>e</sub> opgesteld te staan; daarvan stonden meer dan 1650 gasmotoren in de sector Land- & Tuinbouw en ongeveer 450 gasmotoren in de sector Gezondheid en ongeveer 450 gasmotoren in de sector Diensten. De CBS statistieken van de productiemiddelen elektriciteit laten zien dat het gemiddelde gasmotorvermogen is toegenomen in de Land- & Tuinbouw (van 0,44 MW<sub>e</sub> in 1998 naar 1,09 MW<sub>e</sub> in 2010). Voor de sectoren Gezondheid en Overige Producenten, waar de sector Diensten onder is gebracht door het CBS, is het gemiddelde motorvermogen over deze periode vrijwel constant (gemiddeld 0,33 MW<sub>e</sub> per motor). Het overgrote deel van het gasmotorpark, bij benadering dus 3000 van de in totaal

ongeveer 4250 gasmotoren, is dus kleiner dan 1 MW<sub>e</sub> (statistieken berekend op basis van (CBS, 2013)).

## 2.2 Toepassing katalysatoren bij kleine aardgasmotoren (tot 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub>)

Bij kleine aardgasmotoren kan, om aan de gewenste emissie-eis te voldoen, een SCR (Selective Catalytic Reduction) worden geïnstalleerd. SCR met ureum als reductiemiddel wordt veelvuldig toegepast en er is ruim voldoende ervaring mee opgedaan. Hoewel er ook SCR-technologie wordt ontwikkeld die zonder ureum kan worden bedreven (Granger & Parvulescu, 2011), vindt dit vrijwel geen praktische en commerciële toepassingen. Voor de kleinste vermogenscategorie aardgasmotoren is er al jaren de mogelijkheid beschikbaar om een driewegkatalysator te plaatsen, vergelijkbaar met de praktijk bij benzineauto's. Bij deze techniek wordt de motor stoichiometrisch bedreven, waarbij het nadeel is dat dit resulteert in een lager vermogen en een lager rendement van de gasmotor. Inmiddels is er een techniek ontwikkeld die gebruik maakt van gekoelde uitlaatgasrecirculatie, die deze bezwaren oplost.

Een rapport van Gasunie geeft aan dat er eind 2002, 131 motoren zijn geplaatst met een gezamenlijk vermogen van 118 MW<sub>e</sub> en voorzien van rookgasreiniging (Van Dijk, 2004). Deze rookgasreiniging, SCR-technologie met een ureum oplossing, wordt gebruikt om het gereinigde rookgas te kunnen gebruiken als CO<sub>2</sub>-bemesting in de tuinbouwkassen, waar deze motoren ook hun warmte aan leveren. Het gemiddelde vermogen van deze gasmotoren ligt met 900 kW<sub>e</sub> beneden de grens van 1 MW<sub>e</sub> in Bems. Hoewel dit uit de beschikbare informatie niet precies uit te rekenen is, zijn er zeker 70 gasmotoren bij, die kleiner zijn dan 1 MW<sub>e</sub>, waaronder een aantal in de 500 kW<sub>e</sub> klasse en enkele in de 300 kW<sub>e</sub> klasse. Ook studies van Wageningen University maken melding van een kleine 300 kW<sub>e</sub> gasmotor met rookgasreiniging, zonder vermelding of dit thermisch of elektrisch vermogen is (Van Dijk, 2003), en een 690 kW<sub>e</sub> gasmotor met rookgasreiniging (Dueck et al, 2008).

Voor kleinere motoren is er ook de mogelijkheid om een driewegkatalysator te gebruiken, zoals bij benzineauto's gebruikt wordt (Buderus, 2012; S&L Energieprojekte, 2013). Zoals eerder beschreven dient hierbij de verbranding stoichiometrisch te worden bedreven, wat inhoudt dat de hoeveelheid verbrandingslucht exact voldoende is voor volledige verbranding van de brandstof en het rookgas na de katalysator geen zuurstof meer bevat. In **Figuur 1** is schematisch aangegeven wat er met de emissies gebeurt als de luchtfactor wijzigt. Een driewegkatalysator zorgt voor een reactie van NO<sub>x</sub> met koolmonoxide (CO) en onverbrande koolwaterstoffen (THC; Total Hydro Carbons), waardoor deze milieubelastende stoffen worden omgezet in stikstof (N<sub>2</sub>), koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) en waterdamp (H<sub>2</sub>O). De katalysator wordt het meest efficiënt bedreven bij een lambda van precies 1 of een fractie lager dan 1. Bij een overmaat aan lucht wordt de NO<sub>x</sub> niet verwijderd en werkt het systeem als een oxidatiekatalysator, terwijl bij een tekort aan lucht CO en THC onvolledig verbranden. Complicerend hierbij is dat realisatie van een hoog elektrisch rendement meestal gepaard gaat met een

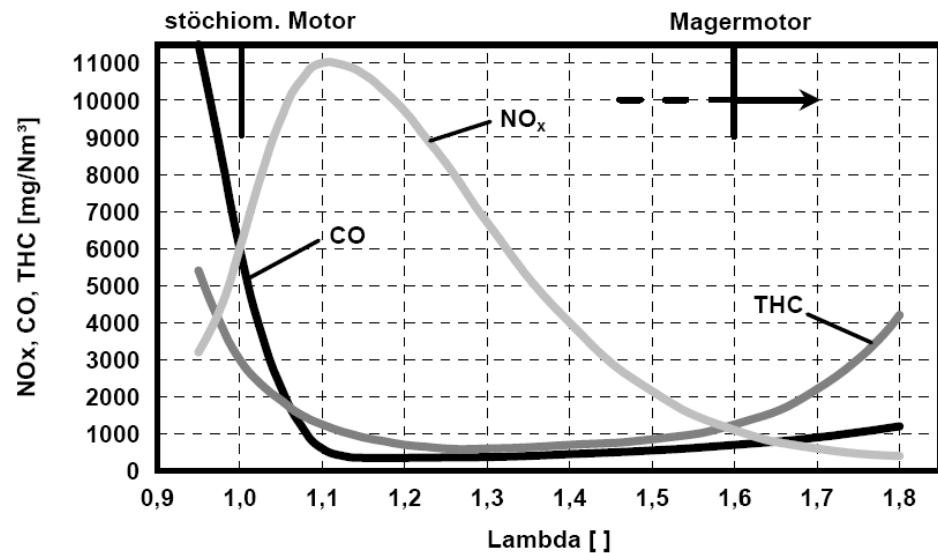
SCR toepassingen bij aardgasmotoren < 1 MW<sub>e</sub>

Mogelijke toepassing van de goedkopere driewegkatalysator

verlaging van de uitlaatgastemperatuur. Hierdoor wordt het eventueel in rookgas aanwezige methaan, de belangrijkste koolwaterstof in aardgas, niet of onvolledig afgebroken. Ook kan bij een tekort aan zuurstof in het uitlaatgas ammoniak gevormd worden

Een driewegkatalysator is veel goedkoper dan een SCR-installatie. Op basis van gegevens uit 1999 van InfoMil zijn de kosten voor driewegkatalysatoren voor installaties van 100 tot 1.000 kW<sub>e</sub> tussen 20.000 en 60.000 gulden, voor een SCR-installatie voor dezelfde vermogenscategorie is dat 50.000 tot 120.000 gulden (InfoMil, 1999). De kosteneffectiviteit van de maatregelen is afhankelijk van het vermogen en van de bedrijfstijd van de gasmotor (InfoMil, 1999). In Nederland worden bijvoorbeeld gasmotoren met driewegkatalysatoren verkocht door Buderus (Buderus, 2012). Ook andere leveranciers leveren in Nederland gasmotoren met driewegkatalysatoren; voorbeelden hiervan zijn Powertec en ENER-G Nedalo. Dit zijn bedrijven die installaties leveren met gasmotoren van diverse fabrikanten.

**Figuur 1:** Effect van de luchtfactor lambda op de (onbestreden) emissies van een gasmotor (Herdin, 2002)



Veroudering zuurstofsensor beïnvloedt reductie driewegkatalysator

Met een driewegkatalysator is 80 g NO<sub>x</sub>/GJ zeer goed haalbaar. Ook 40 g NO<sub>x</sub>/GJ wordt soms gegarandeerd, mogelijk gaat dat gepaard met een hogere onderhoudsfrequentie. Dit onderhoud is nodig om de lambda regelmatig af te regelen en is niet primair noodzakelijk voor de katalysator. In de (oudere) literatuur wordt in dit verband gesproken over de veroudering van de lambda sensor (drift due to contaminants), waarbij deze langzaam van het optimale punt afloopt. Er zijn echter ook zuurstof sensoren te koop die een breder bereik hebben en zichzelf ijken aan het zuurstofgehalte in lucht (Wide Band O<sub>2</sub> Sensors - lambda sensor). Deze zijn echter wel duurder en hebben een goed gecontroleerde verwarming nodig (Vronay, 2007)<sup>1</sup>. Ook

<sup>1</sup> Volgens PlaGaMo zijn deze sensoren (UEGO sensor) niet geschikt om driewegkatalysatoren te regelen en is een omslagsensor nodig.

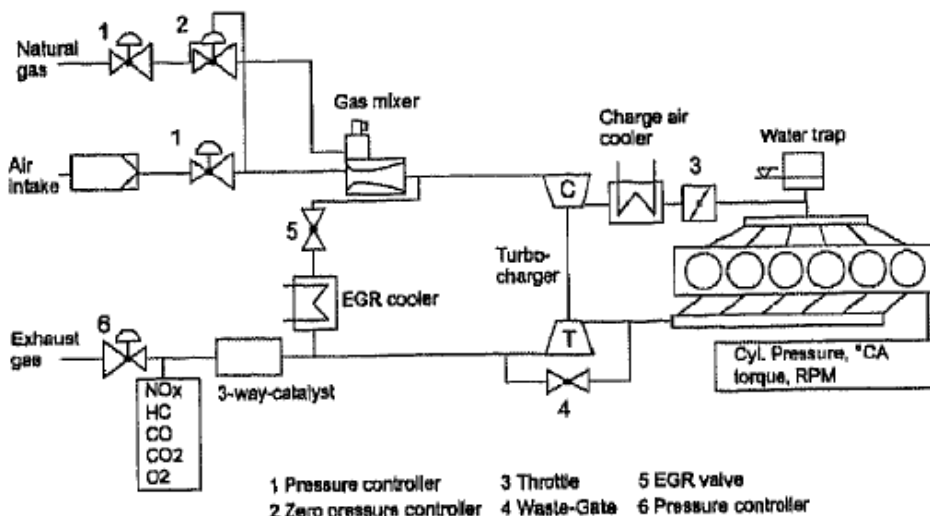


katalysatoren kunnen verouderen. Net als bij SCR kan het nodig zijn om na een aantal jaren de katalysator te vervangen<sup>2</sup>.

Het nadeel van motoren met stoichiometrische verbranding is het lagere elektrische rendement ten opzichte van motoren die worden bedreven bij hogere lambda; dit laatste wordt ook wel een lean-burn motorbedrijf of arme motorafstelling genoemd. Het elektrisch rendement kent een optimum ten opzichte van de lambda; een zeer hoge lambda resulteert dan ook in een daling van het elektrisch rendement. Dit laatste effect is ook zichtbaar in **Figuur 1**: de emissie van onverbrande koolwaterstoffen stijgt sterk bij deze zeer hoge lambda. Bij lean-burn bedrijf van de motor is de NO<sub>x</sub>-emissie hoog in verhouding tot de CO- en THC-emissies. Ook is er veel zuurstof aanwezig. Het is hierdoor niet mogelijk een driewegkatalysator toe te passen. Deze zou namelijk als een oxidatiekatalysator werken en alleen de CO en THC met de aanwezige zuurstof afbreken; de NO<sub>x</sub>-emissie wordt dan niet gereduceerd. De markt kent echter een voorkeur voor lean burn motoren. Naast het hogere elektrische rendement bij deze afstelling, wordt bij lean burn bedrijf de temperatuur in de cilinder beperkt door de overmaat aan verbrandingslucht. Dankzij turbo-technologie kan extra lucht in de cilinder worden geperst en meer brandstof worden verbrand per cilinder slag. Eenzelfde cilinderinhoud levert dus, bij hogere lambda in combinatie met turbo-technologie, meer vermogen, waardoor de investeringskosten per kW<sub>e</sub> dalen.

Normaal geen turbo mogelijk bij driewegkatalysator (gasmotor duurder)

**Figuur 2:** Schema van rookgasrecirculatie met koeling (Nellen & Boulouchos, 2000)



<sup>2</sup> Een voorbeeld: Bij een gasmotor van ECN zijn een aantal jaren geleden emissies van 3 g NO<sub>x</sub>/GJ gemeten (2002). Na een jaar bleek dit toegenomen te zijn naar 23 g NO<sub>x</sub>/GJ (2003). In december 2004 bleek bij een meting (350 g/GJ) de lambda sonde en/of katalysator stuk. Na vervanging was de emissie 1,5 g NO<sub>x</sub>/GJ (2005).

In ontwikkeling: met koeling  
toch turbo mogelijk bij  
driewegkatalysator

Sinds kort is er technologie beschikbaar om motoren met stoichiometrische verbranding ook meer vermogen te laten leveren, waardoor de investeringskosten per  $\text{kW}_e$  dalen. Dit is mogelijk door rookgas van de uitlaat, eventueel na koeling, terug te brengen naar de inlaat; deze techniek heet Exhaust Gas Recirculation (EGR), zie ook Figuur 2. Overigens is deze techniek ook bij personenauto's niet ongebruikelijk. Door deze techniek wordt het zuurstofgehalte in de ingaande verbrandingslucht omlaag gebracht, waardoor, ook bij stoichiometrische condities, meer (verdunde) lucht de cilinder ingaat. Hierdoor verbetert het motorrendement en wordt het  $\text{NO}_x$ -gehalte in het rookgas, voor ingang naar de katalysator, verlaagd. Ook hier kan met behulp van turbo-technologie de verbrandingslucht worden gecomprimeerd voordat het in de cilinder wordt geperst; in dat geval zal ook meer brandstof moeten worden toegevoegd (Nellen, 2000).

**Cooled EGR technologie is gezamenlijk ontwikkeld door de Menag Group AG van Zwitserland, Liebherr Engines, ETH Zurich (Zurich University) en het Zwitserse Ministerie van Energie. De ontwikkeling is hier mede gestart omdat de emissienorm voor  $\text{NO}_x$  voor de stad Zurich op 16 g/GJ ligt (DTE Energy, 2004).**

Deze technologie wordt onder andere in de VS verder uitontwikkeld (DE solutions, 2004). Motorfabrikant Cummins ziet Cooled EGR als een nieuwe stap in de ontwikkeling van motoren. Veel toepassingen worden door Cummins ontwikkeld voor de transportsector en voor één type motor rapporteren zij een verbetering van het thermische rendement van 5% ten opzichte van lean burn motoren (Burgess, 2009).

Commerciële ontwikkeling van  
EGR met koeling en  
driewegkatalysator

In een rapport van DE solutions wordt een aantal lopende initiatieven in de VS beschreven (DE solutions, 2004). Dit is hier, voor zover mogelijk, aangevuld met andere en meer recente informatie.

De motorfabrikant Cummins heeft dieselmotoren in onder meer de vermogensklasse 130 tot 447 kW die aan de geldige emissienormen, Tier 4 ingaande in 2011, voldoen met behulp van onder meer cooled exhaust gas recirculation (EGR) systeem (Cummins, 2012). Daarnaast adverteert Cummins ook met gasmotoren voor trucks en bussen, vermogensklasse 186 tot 239 kW, welke zijn uitgerust met cooled EGR systemen (Cummins, 2011).

De firma BluePoint Energy heeft de techniek van rookgas recirculatie in combinatie met koeling toegepast op een Deutz gasmotor van 260 kW bij een lambda van 1,52 (BluePoint, 2005a). De emissie daalde hierbij van 0,5 g/bhp-hr (circa 65 g/GJ) naar 0,02 g/bhp-hr (circa 2,5 g/GJ) (omrekening zie Bijlage A, gerekend met motorrendement 35%). Voor deze laatste waarde werd een geregelde driewegkatalysator gebruikt die al door praktijkgebruik verouderd was. Het rendement van 34,2% nam door de aanpassingen een fractie toe tot 35% (BluePoint, 2005b; Roser, 2005). BluePoint gebruikt motoren van Deutz en heeft ook een 500 kW versie (BluePoint, 2005c). Voor zover bekend, is BluePoint sinds 2009 bankroet.

**Figuur 3:** Lean one van BluePoint met Deutz motor van 260 kW



Waukesha heeft in 2004 in het kader van het ARICE (California Advanced Reciprocating Internal Combustion Engine) programma een driewegkatalysator op een 500 kW motor getest. Een duurttest van 500 uur demonstreerde stabiele werking van de installatie (Stachowitz et al, 2005). Hoewel een uitgebreidere duurttest gewenst was, laat een overzicht van het ARICE programma uit 2006 zien dat een test van 4000 uur om onbekende redenen niet is uitgevoerd (Bining, 2006).

DTE Energy Technologies heeft in de VS en Europa twee WKK installaties (202 kW en 350 kW) op de markt gebracht met ultra lage emissies van 0,028 g NO<sub>x</sub>/bhp-hr (3,5 g/GJ of 12 mg NO<sub>x</sub>/Nm bij 3% O<sub>2</sub>; omrekening zie Bijlage A, gerekend met motorrendement 34%). Het elektrische rendement is 34%; het totaal rendement is 89%. Niet duidelijk is of dit bedrijf na 2004 nog actief is in de gasmotormarkt.

In 2003 maakt Caterpillar bekend met een demonstratieprogramma bezig te zijn met de afkorting SC-3: "Stoichiometric, Clean Exhaust Induction, and 3-way Catalyst". De emissies liggen rond de 15 g/GJ.

Attainment Technologies heeft zijn 'second generation GreenGuard' emissiereductiesysteem in 2004 geïntroduceerd. Bij 16 omgebouwde Caterpillar motoren van 850 kW stuk is een garantiewaarde 0,3 g NO<sub>x</sub>/bhp-hr (circa 45 g/GJ, omrekening zie Bijlage A, oftewel 160 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>) afgegeven; de werkelijke emissie is lager (Attainment Technologies, 2004). De internetsite van het bedrijf spreekt over 0,1 g NO<sub>x</sub>/bhp-hr (circa 15 g/GJ, omrekening zie Bijlage A, of 55 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>), ook bij een Caterpillar motor. Overigens worden ook andere emissies gerapporteerd: 0,3 g CO/bhp-hr en 0.15 g HC/bhp-hr (Attainment Technologies, 2004).

In een opgezet onderzoeksprogramma van NREL is een stoichiometrisch bedreven aardgasmotor ontwikkeld door een Volvo dieselmotor om te bouwen; het resulterend asvermogen was 0,24 MW. Daarbij is een driewegkatalysator en cooled EGR geïnstalleerd. De resulterende emissies waren 0,005 g NO<sub>x</sub>/kWh, wat ruimschoots voldoet aan de doelstelling van 0,27 g/kWh. De overige emissies, na katalysator waren 1,166 g CO/kWh en 0,536 g THC/kWh (zie Tabel 6 in (Tai et al, 2006)). Fijnstof emissies zijn niet gemeten, maar liggen naar verwachting beneden de gewenste 0,013 g/kWh (Tai et al, 2006). Deze emissies zijn een gewogen gemiddelde met een bijbehorend asrendement (brake thermal efficiency) van 33,9%. Omgerekend zijn de resulterende emissies in dit meetprogramma 0,5 g NO<sub>x</sub>/GJ<sub>input</sub> (dat is 2 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>), 109,8 g CO/GJ<sub>input</sub> en 50,5 g THC/GJ<sub>input</sub> (voor omrekening zie Bijlage A, gerekend met een motorrendement van 33,9%).

Elektra Birseck Münchenstein (EBM) heeft in ieder geval twee stadverwarmingseenheden gebouwd volgens dit principe. Een 190 kW installatie met een rendement van 38,2% en emissies van  $\text{NO}_x < 10 \text{ mg/m}^3$  (2,5 g/GJ; onder aanname van een zuurstofpercentage van 0%) en  $\text{CO} < 10 \text{ mg/m}^3$  (Factor, 2003). Een tweede installatie van 190 kW elektrisch is in 2004 gereed gekomen (EBM, 2004). Eén van de leveranciers is in ieder geval Avesco Schwissmotor die op deze techniek een patent heeft (Avesco Schwissmotor, 2009a).

In een Duits overzicht voor WKK gasmotoren (Blockheizkraftwerke) is een lijst met fabrikanten opgenomen, die motoren aanbieden in combinatie met diverse rookgasreinigingstechnologieën (BHKW, 2011). Uit deze lijst blijkt dat diverse leveranciers aardgasmotoren leveren met oxidatiekatalysator, driewegkatalysator of lean-burn technologie voor diverse vermogensklassen. SCR wordt ook aangeboden, met name in de hoogste vermogensklassen (vanaf 8,8  $\text{MW}_{\text{th}}$ /3,9  $\text{MW}_e$ ). Overigens blijkt uit (Vermeulen, 2012) dat SCR rookgasreinigers ook beschikbaar zijn voor 0,5  $\text{MW}_e$ . Aardgasmotoren met driewegkatalysator worden ongeveer tot 1  $\text{MW}_e$  commercieel aangeboden, hoewel de meeste aanbiedingen zijn te vinden in de vermogensklasse tot ongeveer 250  $\text{kW}_e$ . In de lijst met leveranciers worden ook haalbare emissies in het rookgas genoemd. Deze zijn zeer divers, ook bij toepassing van een katalytische reinigingstechnologie. Diverse leveranciers noemen emissies die samenvallen met de Duitse TA Luft emissiegrenswaarden, waardoor praktijkemissies niet altijd opgenomen lijken te zijn. Er zijn diverse leveranciers die emissiegrenswaarden voor  $\text{NO}_x$  noemen tussen 50 en 125  $\text{mg/Nm}^3$  voor motoren met driewegkatalysator. Uitgaande van een referentiewaarde van 5%  $\text{O}_2$ , overeenkomstig de systematiek van de Duitse TA Luft, komt dit neer op 56-141  $\text{mg/Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$  (16-40 g/GJ) (BHKW, 2011).

De firma Avesco Schwissmotor gebruikt Caterpillar motoren in combinatie met gekoelde rookgasrecirculatie en driewegkatalysatoren en noemt emissies voor  $\text{NO}_x < 50 \text{ mg/Nm}^3$  (16 g/GJ, onder aanname van 5%  $\text{O}_2$ ) en  $\text{CO} < 150 \text{ mg/Nm}^3$ , waarmee de emissiegrenswaarden voor Stadt Zürich goed haalbaar zijn. De aardgasmotoren met deze techniek zijn commercieel beschikbaar in ieder geval in vermogens van 52, 80, 115, 175 en 280  $\text{kW}_e$  (Avesco Schwissmotor, 2009b, 2012a).

Overigens zijn er ook kleine motoren, die naast aardgas ook op propaan worden bedreven en met een driewegkatalysator zijn uitgevoerd. Zo verkoopt ECOPOWER op grote schaal motoren van 2 tot 4,7  $\text{kW}_e$  die aan 56  $\text{mg NO}_x/\text{Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$  voldoen (16 g  $\text{NO}_x/\text{GJ}$ ) en aan 129  $\text{mg CO}/\text{Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$  (36 g  $\text{CO}/\text{GJ}$ ) (Lebbe, 2008) ([www.ecopower.de](http://www.ecopower.de)).

In een overzicht wordt het Zwitserse gasmotorpark onder meer uitgesplitst naar het toegepaste type emissiebestrijdingstechnologie voor WKK (Blockheizkraftwerke). Dat was in 2010 als volgt verdeeld voor aardgasgestookte installaties: 5% geen bestrijdingsmaatregel, 52% driewegkatalysator, 31% lean-burn bedrijf van motor, 7% SCR-toepassing en 6% andere maatregelen (Kaufmann, 2011). Het totaal aantal installaties is 642 en het totaal vermogen van deze installaties is 80  $\text{MW}_e$  (Kaufmann, 2011). Hieruit blijkt dat alle genoemde technologieën ook regelmatig in de markt worden toegepast en zich dus hebben bewezen.

Wageningen University rapporteert regelmatig kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw, kortweg KWIN. Vergelijking van de KWIN edities van 2008, 2010 en 2012 laten een opvallende kostendaling voor rookgasreinigers zien (Vermeulen, 2012).

Omdat de kostencijfers voor rookgasreinigers uit de editie van 2010 en 2012 als bandbreedte zijn opgenomen, is hier ook de daling als een bandbreedte berekend: de kosten zijn over de periode 2008 tot 2012 met 24%-50% gedaald. De daadwerkelijke kostendaling varieert enigszins per vermogenscategorie, maar vermoedelijk hangen de uiteindelijke marktkosten ook af van de katalysatorfabrikant. De primaire reden voor de inzet van rookgasreinigers in de glastuinbouw is de wens om het rookgas te gebruiken voor CO<sub>2</sub>-bemesting in de kas; daarnaast zijn de kostencijfers afkomstig van de situatie voor inwerkingtreding van Bems voor nieuwe installaties. De waargenomen kostendaling zal dan ook niet volledig samenhangen met de inwerkingtreding van Bems-eisen. Toch laat deze kostendaling zien wat de kostendaling van marktprijzen voor technologie kan zijn bij grootschalige afname. Bij toenemende afname van rookgasreinigers ten gevolge van de Bems-besluiten zal de prijs naar verwachting nog verder dalen, waardoor de kosteneffectiviteit van de maatregelen zal toenemen.

Kostendaling van rookgasreinigers waargenomen

Bij de toepassing van SCR is continu gebruik van een reduceermiddel noodzakelijk, veelal ammoniak of ureum in oplossing. Het is ook mogelijk om NO<sub>x</sub> op een katalysator te adsorberen in de lean burn mode van een motor en de katalysator te regenereren door de motor om te schakelen naar de rich burn mode. Het rookgas fungeert tijdens de rich burn mode als reduceermiddel. Hiermee kan de inkoop van een apart reduceermiddel worden vermeden (Scholz, 2007). Een recente review laat zien dat ontwikkelingen voor beide systemen nog sterk gaande zijn (Granger & Parvulescu, 2011).

Katalysatorfabrikant Johnson Matthey heeft voor dieselmotoren NO<sub>x</sub> Storage Reduction katalysatoren ontwikkeld (JM, 2012). Wellicht dat (operationele) kosten van een NSR systeem goedkoper zijn, afhankelijk van de brandstofkosten, kosten reduceermiddel en het rendement en betrouwbaarheid van de motor onder een wisselende verbrandingsconditie. Een rapport uit Japan claimt dat deze technologie succesvol is toegepast op aardgasmotoren voor warmtepompen en dat de technologie commercieel toepasbaar is (Matsui et al, 2001).

Potentiële alternatieven voor SCR: NO<sub>x</sub> Storage Reduction (NSR) en andere mogelijkheden

De SQ2 rookgasreiniger van Knook Energy Solutions International BV heeft een technologie die niet werkt met ureum. Deze technologie wordt onder andere toegepast voor CO<sub>2</sub>-dosering in de glastuinbouw en werkt middels adsorptie-desorptie. De SQ2 rookgasreiniging is een continu proces, dat gebruik maakt van meerdere parallelle katalysator-kamers. Na verzadiging van een katalysator wordt op een volgende katalysator overgeschakeld. Vervolgens wordt de verzadigde katalysator geregenereerd door de NO<sub>x</sub> met een uit aardgas bereid gasmengsel te reduceren. De katalysatoren werken op basis van platina dat, afhankelijk van het gebruik, na vijf tot zeven jaar zijn reinigende vermogen verliest. Eenmaal per jaar worden de katalysatoren gewassen. In 2008 is een eerste pilot systeem geïnstalleerd bij kwekerij Fontijn in Nes aan de Amstel (Knook, 2008). Verder blijkt uit berichtgeving dat deze rookgasreiniger praktijkrijp is bevonden en in 2009 is volgens informatie uit de sector een rookgasreiniger bij tuinder W. Limburg uit IJsselmuiden geplaatst (Agritica, 2008). In 2012 is via TU Delft bevestigd dat deze katalysator nog steeds commercieel wordt aangeboden en reeds is geplaatst bij meer tuinders dan voornoemd. De tuinders zouden tevreden zijn met dit systeem, gezien de hoge NO<sub>x</sub>-verwijdering waardoor vrijwel NO<sub>x</sub>-vrij rookgas kan worden aangewend voor CO<sub>2</sub>-bemesting, resulterend in meeropbrengsten van de teelt.

Voor het gebruik van de gasmotoren zelf zijn er ook mogelijke alternatieven. Zo zijn er inmiddels gasturbines op de markt die in dezelfde vermogensrange kracht/elektriciteit en warmte produceren. Wel ligt het elektrische rendement bij deze installaties lager in vergelijking met gasmotoren. In de ontwikkelingsfase zijn nog de brandstofcellen en zogenaamde stirlingmotoren, hoewel de laatstgenoemde techniek wel wordt gedemonstreerd op het niveau van huishoudens.

## 2.3 Wetgeving kleine gasmotoren (tot 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub>)

De meeste landen kennen geen wetgeving met voorgeschreven emissielimieten die het niveau van de onderzochte, aangescherpte emissie-eis van 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (28 g NO<sub>x</sub>/GJ) benaderen. In enkele landen en regio's zijn scherpere eisen van kracht, zoals de SCAQMD regio in de VS en Zürich in Zwitserland.

Wetgeving in een regio in Californië

In het South Coast Air Quality Management District van California zijn inmiddels vergelijkbare eisen van kracht als het voorstel voor Bems (SCAQMD, 2012), zie **Tabel 3**. De eisen zijn in de tabel omgerekend naar in Nederland gangbare eenheden. De VOC-eis richt zich hoofdzakelijk op stoffen die ozon veroorzaken<sup>3</sup>. De gestelde emissie-eis geldt voor het gemiddelde van een emissiemeting gedurende een kwartier. Motoren die minder dan 500 uur per jaar draaien zijn uitgezonderd. Ook moet het asvermogen boven de 37 kW (50 bhp) liggen en het brandstofverbruik boven 1 miljard BTU liggen (bovenwaarde)<sup>4</sup>. Het lijkt erop dat het beleid in SCAQMD-regio er op gericht is om waar mogelijk motoraandrijving uit te faseren en over te schakelen naar elektrische aandrijving. Voor zover direct uit de tekst af te leiden, gelden de eisen voor bestaande installaties en nieuwe installaties die niet bedoeld zijn voor elektriciteitsopwekking. Voor nieuwe installaties bedoeld voor elektriciteitsopwekking, staan de eisen in **Tabel 4**. De eisen zijn gekoppeld aan de productie van elektriciteit, maar bij WKK-installaties mag ook de warmteproductie worden meegeteld. De eisen zijn in de tabel omgerekend bij een verondersteld WKK-rendement van 90%. In **Tabel 3** wordt de VOC gemeten in het gewicht aan koolstof, terwijl in **Tabel 4** de hoeveelheid koolstof nog wordt omgerekend naar methaan (ondanks dat methaan niet tot VOC wordt gerekend); beide VOC eisen zijn dus niet direct vergelijkbaar.

<sup>3</sup> Definitie volgens SCAQMD Rule 102: Volatile Organic Compound (VOC) is any volatile compound of carbon, excluding methane, carbon monoxide, carbon dioxide, carbonic acid, metallic carbides or carbonates, ammonium carbonate, and exempt compounds.

<sup>4</sup> Voor een motor met een asvermogen van 37 kW en een aangenomen asrendement van ongeveer 35%, ligt de limitering op brandstofverbruik op ongeveer 2750 vollasturen per jaar.

**Tabel 3:** SCAQMD-eisen aan gasmotoren (zie Table II uit (SCAQMD, 2012)); omrekening naar g/GJ met aardgas als brandstof.

Concentration limits		
[NO <sub>x</sub> ]	[VOC] als koolstof	[CO]
bhp ≥ 500: 36 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	250 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	2000 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>
bhp < 500: 45ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>		
Asvermogen ≥ 373 kW: 223 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 62 g/GJ	404 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 113 g/GJ	7540 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 2113 g/GJ
Asvermogen < 373 kW: 279 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 78 g/GJ		
Concentration limits effective July 1, 2010		
bhp ≥ 500: 11 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	bhp ≥ 500: 30 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	bhp ≥ 500: 250 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>
bhp < 500: 45 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	bhp < 500: 250 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	bhp < 500: 2000 bij 15% O <sub>2</sub>
Asvermogen ≥ 373 kW: 68 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 19 g/GJ	Asvermogen ≥ 373 kW: 49 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 13,6 g/GJ	Asvermogen ≥ 373 kW: 943 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 264 g/GJ
Asvermogen < 373 kW: 279 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 78 g/GJ	Asvermogen < 373 kW: 404 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 113 g/GJ	Asvermogen < 373 kW: 7540 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 2113 g/GJ
Concentration limits effective July 1, 2011		
11 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	30 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	250 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>
68 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 19 g/GJ	49 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 13,6 g/GJ	943 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 264 g/GJ

De bovenstaande eisen gelden dus voor bestaande gasmotoren. De navolgende uitzonderingsregels zijn daarbij opgenomen (SCAQMD, 2012).

*(Requirement 1B) The concentration limits effective on and after July 1, 2010 shall not apply to engines that operate less than 500 hours per year or use less than  $1 \times 10^9$  British Thermal Units (Btus) per year (higher heating value) of fuel.*

*If the operator of a two-stroke engine equipped with an oxidation catalyst and insulated exhaust ducts and catalyst housing demonstrates that the CO and VOC limits effective on and after July 1, 2010 are not achievable, then the Executive Officer may, with United States Environmental Protection Agency (EPA) approval, establish technologically achievable, case-by-case CO and VOC limits in place of the concentration limits effective on and after July 1, 2010. The case-by-case limits shall not exceed 250 ppmvd VOC and 2000 ppmvd CO.*

*If the operator of an engine that uses non-pipeline quality natural gas demonstrates that due to the varying heating value of the gas a longer averaging time is necessary, the Executive Officer may establish for the engine a longer averaging time, not to exceed six hours, for any of the concentration limits of Table II. Non-pipeline quality natural gas*

is a gas that does not meet the gas specifications of the local gas utility and is not supplied to the local gas utility.

Er zijn dus uitzonderingsbepalingen opgenomen voor gasmotoren waar nageschakelde technieken reeds zijn geïnstalleerd. Uitzonderingsbepalingen ten aanzien van  $NO_x$  emissies blijken niet opgenomen te zijn.

**Tabel 4:** SCAQMD-eisen aan nieuwe motoren voor elektriciteitsopwekking (zie Table IV uit (SCAQMD, 2012)). Eisen mogen worden gecorrigeerd voor nuttige warmte-afzet; omrekening naar g/GJ onder aanname van aardgas als brandstof en WKK-toepassing van de motor met een rendement van 90% (thermisch en elektrisch totaalrendement).

	[NO <sub>x</sub> ]	[VOC] berekend als CH <sub>4</sub>	[CO]
In lbs/MW-hr	0,07	0,10	0,20
In g/kWh	0,031	0,045	0,091
In g/GJ bij 90% efficiency	8	11	23
In mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> en 90% efficiency	31	40	80

This subparagraph does not apply to: engines installed prior to February 1, 2008; engines issued a permit to construct prior to February 1, 2008 and installed within 12 months of the date of the permit to construct; engines for which an application is deemed complete by October 1, 2007; engines installed by an electric utility on Santa Catalina Island; engines installed at remote locations without access to natural gas and electric power; engines used to supply electrical power to ocean-going vessels while at berth, prior to January 1, 2014; or landfill or digester gas-fired engines that meet the requirements of subparagraph (d)(1)(C).

Daarnaast zijn er eisen van kracht voor nieuwe motoren, welke niet worden gebruikt voor elektriciteitsopwekking en dan ook vervangen zouden kunnen worden door elektromotoren, zie **Tabel 5**.

**Tabel 5:** SCAQMD-eisen aan nieuwe motoren, welke in principe ook vervangen kunnen worden door elektromotoren (zie Table I uit (SCAQMD, 2012)). Omrekening naar g/GJ met aardgas als brandstof.

[NO <sub>x</sub> ]	[VOC] als koolstof	[CO]
11 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	30 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>	70 ppmvd bij 15% O <sub>2</sub>
68 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 19 g/GJ	49 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 13,6 g/GJ	264 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> of 74 g/GJ

Wetgeving in Europese landen

Een inventarisatie uit 2008 van InfoMil (Boom, 2008) laat zien dat er geen Europese landen zijn die nu al eisen stellen vergelijkbaar met het onderzochte Nederlandse voornemen. De cijfers uit de inventarisatie staan in **Tabel 6** en zijn daar aangevuld met het in dit rapport veronderstelde onderzochte Nederlandse voornemen en enkele gevonden ranges uit dit hoofdstuk.



**Tabel 6:** Overzicht eisen aan stationaire motoren, (Boom, 2008) en aanvullingen uit de inventarisatie in dit hoofdstuk

	NO <sub>x</sub> -normen [g/GJ]	
	Gas	Vloeibaar
Gothenborg Protocol	80 - 160	160 - 190
Wereldbank	1700 - 2000	1700 - 2000
Japan	300	600 - 770
Duitsland	80 - 320	160 - 320
Oostenrijk	110 - 160	110 - 160
Italië	160	600 - 1200
Finland	130 - 1700	1200 - 1700
Frankrijk	80 - 115	190 - 320
Zwitserland	130	80
België,	160 - 830	160 - 1600
Denemarken	180 - 210	64 - 180
Verenigd Koninkrijk	86 - 430	260 - 1100
Nederland, Bees B	140 - 800	400 - 1200
Nederland, Bems	28 - 95	129
Nederland, voorstel/onderzoek	28	40
Uit de inventarisatie in dit rapport		
Ontwikkeling gekoelde EGR met driewegkatalysator	< 3 - 15	
Motoren in Duitsland met driewegkatalysator	16 - 40	
USA SCAQMD regio na 2011	8 - 19	
Regio's Zwitserland	16/38/22	

In Zwitserland zijn echter al geruime tijd regionaal strengere eisen van kracht, zie **Tabel 7**. Mogelijk is dit overzicht onvolledig. De genoemde 50 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> voor Stadt Zurich komt overeen met 56 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (16 g/GJ). De genoemde 70 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> voor Stadt Zurich komt overeen met 79 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (22 g/GJ). Overigens zijn de gegevens uit (BMW, 2001) verouderd ten aanzien van de NO<sub>x</sub>-eis voor aardgasmotoren in de Kanton Zürich en is de eis in 2012 aldaar overeenkomstig de Luftreinhalte-Verordnung (LRV) (Kanton Zürich, 2012). De reden voor deze regionaal strenge normen is de wens om de luchtkwaliteit op regionaal niveau te verbeteren.

Wetgeving in Zwitserse regio's

**Tabel 7:** Emissie-eisen voor gasmotoren op biogas & stortgas/aardgas (mg/Nm<sup>3</sup>, 5% O<sub>2</sub>)

Doelstof	LRV-97t Schweiz <sup>5,6</sup>	Stadt Zürich <sup>5,7</sup>	Diverse Zwitserse Regio's <sup>8,9</sup>	Kanton Basel <sup>10</sup>
NO <sub>x</sub>	400/250	50/50	-/120	70/70
CO	650/650	650/650	- / -	- / -
NMVOS	- / -	- / -	- / -	- / -

#### NO<sub>x</sub>-belasting in Noorwegen

In Noorwegen wordt door een NO<sub>x</sub>-belasting reductie van NO<sub>x</sub>-emissies nagestreefd, ook voor motorinstallaties. Onder dit handelssysteem vallen voortdrijving systemen met een totale installatiecapaciteit van 750 kW of meer, motoren, ketels en turbines met een installatiecapaciteit van 10 MW of meer en fakkels. Ook offshore installaties op het Noors continentaal plat vallen onder dit systeem. De NO<sub>x</sub>-belasting is met ingang van 1 Januari 2012 16,69 Noorse kronen per kg NO<sub>x</sub> emissies (Toll Customs, 2012). Dat is afhankelijk van de gehanteerde wisselkoers ongeveer € 2 - 2,30 per kg NO<sub>x</sub>. De partijen die deze vorm van accijns moeten betalen, mogen deelnemen aan een fonds waar financiële steun kan worden aangevraagd om NO<sub>x</sub>-reducerende maatregelen te betalen (NHO, 2012).

## 2.4 Verwachte kosten en effecten

In het kader van werkzaamheden aan het Optiedocument (Daniëls, 2006; Smekens, 2010) is een inschatting gemaakt van de kosten en effecten van de invoering van de voorgenomen eisen. Het effect van de aanscherping levert in 2020 circa 1 kton NO<sub>x</sub>-reductie op tegen reductiekosten tussen de 15 en 25 €/kg NO<sub>x</sub>. Omdat er weinig recente statistieken zijn omtrent de ontwikkelingen van het gasmotorpark kleiner dan 1 MW<sub>e</sub>, is de omvang van het effect in 2020 onzeker. Het reductiepotentieel is berekend ten opzichte van het huidige Bems. Indien de berekening ten opzichte van het oude Bees B wordt uitgevoerd, is het effect groter en zijn de kosten per kg NO<sub>x</sub>-reductie lager, te weten ongeveer 10 €/kg voor de toepassing van SCR. Deze kosten kunnen lager uitvallen indien de driewegkatalysatoren zonder rendements- en vermogensverlies toegepast kunnen worden. De meerkosten voor de installatie vallen in de range 0,6 tot

<sup>5</sup> Bron: (Humm, 2001)

<sup>6</sup> De genoemde waarden zijn overeenkomstig met de Luftreinhalte-Verordnung (LRV), stand am 15. Juli 2010

<sup>7</sup> Bron: (Zürich, 2012). Opgemerkt wordt dat genoemde norm geldt voor alle vermogensklassen. Uitzonderingsbepaling: mogelijk vanaf 2 MW opgesteld vermogen, rekening houdend met het motorrendement. Uitzonderingsbepaling: mogelijk bij minder dan 480 vollasturen per jaar (noodvermogen). *Art 12 - Reglement zum Massnahmenplan Luftreinhaltung 2011 der Stadt Zürich.*

<sup>8</sup> Bron: (BMW, 2001)

<sup>9</sup> Diverse Zwitserse regio's omvatten: Kanton Zürich Land, Region Bern, Biel, Thun, Langenthal, Region St. Gallen, Rohrschach, Linthgebiet en Wil. In deze bron worden emissiegrenswaarden voor Kanton Basel genoemd van 110 mg/Nm<sup>3</sup>, maar op basis van (Basel, 2012) blijkt dit de eis voor dieselmotoren te zijn.

<sup>10</sup> Bron: (Basel, 2012). Opgemerkt wordt dat genoemde norm geldt voor alle vermogensklassen en afhankelijk is van het brandstofverbruik. Uitzonderingsbepaling: mogelijk bij minder dan 30 vollasturen per jaar (noodvermogen). Er is geen uitzonderingsbepaling voor biogas opgenomen.

1,1 €/kWh<sub>e</sub>. Indien de kosten en effecten zwaar meewegen bij besluitvorming omtrent aanscherping, verdient het aanbeveling deze nauwkeuriger te inventariseren.

## 2.5 Conclusies kleine gasmotoren

De toepassing van rookgasreiniging met SCR bij gasmotoren kleiner dan 1 MW<sub>e</sub> is een bestaande techniek en wordt regelmatig toegepast. Er is dus geen technische belemmering om aan de onderzochte eis van 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> te voldoen. De specifieke reductiekosten nemen wel toe bij kleinere motoren, maar in de praktijk worden toch ook installaties van 100 kW met SCR uitgerust. Uit eerder onderzoek (Kroon, 2008) blijkt dat de reductiekosten op kunnen lopen van circa 5 €/kg NO<sub>x</sub>-reductie voor een 1 MW<sub>e</sub> motor tot meer dan 10 €/kg NO<sub>x</sub>-reductie bij motoren kleiner dan 250 kW. De toepassing van driewegkatalysatoren met gekoelde rookgasrecirculatie kunnen resulteren in lagere NO<sub>x</sub> reductiekosten. Deze motoren hebben niet alleen betere rendementen tegen beperkte meerinvesteringskosten, maar ook de rookgasreinigingstechnologie is aanzienlijk goedkoper. Deze combinatie van bestaande technieken is rond 2000 ontwikkeld en vanaf 2004 in de VS verder uitgerold. De scherpe emissie-eisen aan gasmotoren in bepaalde delen van de VS zijn een belangrijke reden voor toepassing van dit type motor, naast emissie-eisen voor de transportsector. Een aantal regio's in Zwitserland kent eveneens scherpe emissie-eisen voor gasmotoren. Ook in deze regio's zijn enkele toepassingen bekend van gasmotoren met driewegkatalysator en gekoelde rookgasrecirculatie als WKK-installatie voor stadverwarming

Hoewel de eis technisch implementeerbaar is, kan overwogen worden om op termijn toch een minder ver aangescherpte eis in te voeren voor nieuwe motoren op het niveau van 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (omgerekend 40 g/GJ). Dit vormt een versoepeling ten opzichte van de initieel onderzochte eis, maar deze emissie-eis zal voor diverse typen motoren haalbaar zijn, zodat het aanbod van motoren ook met goedkopere reductietechnieken, voldoende gegarandeerd is. Voor bestaande motoren kan een overgangsregeling worden ontworpen. Overwogen kan worden om draagvlak te creëren door meer informatie beschikbaar te stellen over gasmotoren met driewegkatalysator en gekoelde rookgasrecirculatie. Dit kan ook middels demonstratieprojecten, waarbij tegelijkertijd methaanemissies van dit type motoren nader kunnen worden geanalyseerd.

Eis welke het Ministerie kan overwegen

# 3

## Scherpere NO<sub>x</sub>-eis voor Biogasmotoren

### 3.1 Aanscherping NO<sub>x</sub>-eisen biogasmotoren

Voorstel aanscherping

Het voorstel is onderzocht om de NO<sub>x</sub>-eis bij biogasmotoren aan te scherpen van 340 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> in het rookgas naar 100 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Deze emissie-eis geldt sinds 1 april 2010 al voor nieuwe aardgasmotoren van 2,5 MW<sub>th</sub> en groter. In dit hoofdstuk worden de mogelijkheden voor emissiereductie bij biogasmotoren geïnterpreteerd. Hierbij zal veel worden verwezen naar hoofdstuk 2 waar de mogelijkheden voor emissiereductie bij aardgasmotoren zijn beschreven.

Bij de invoering van Bems is de emissie-eis voor biogasmotoren aangescherpt van 500 mg/Nm<sup>3</sup> x 1/30% x elektrisch motorendement naar 340 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Voor nieuwe motoren geldt deze eis sinds 1 april 2010, terwijl voor bestaande installaties een overgangstermijn van kracht is tot uiterlijk 2017 of 2019. Aan deze eis kan in de meeste gevallen worden voldaan door de motor armer (lean burn) af te stellen. Dit gaat gepaard met een klein rendementsverlies en extra emissie van (onverbrande) koolwaterstoffen. Een complicatie bij het armer afstellen van biogasmotoren is dat biogas een lagere verbrandingswaarde heeft dan aardgas en vaak ook een wisselende samenstelling kent (KIWA, 2008). Dit betekent dat voor elke motor en brandstof combinatie een optimale afstelling gevonden moet worden.

De centrale vraag bij de eisen aan biogasmotoren is of SCR-technologie nog niet wordt toegepast, omdat dit elders nauwelijks wordt geëist of omdat dit technisch nog niet mogelijk is. In ieder geval zal de toepassing van SCR tot hogere kosten leiden, wat niet gunstig is voor de rentabiliteit of, indien de overheid dit compenseert via een subsidie, voor de overheidsfinanciën.

Opgemerkt moet nog worden dat in Bems de definitie van biogas volgens het Bems artikel 2.1.4, lid 2 het navolgende is: gas dat voor ten minste 95 procent uit gas bestaat dat door vergisting van organisch materiaal, zoals afval van groente, fruit en tuin (GFT),

mest, rioolslib, actief slib, gestort huisvuil of een mengsel daarvan met hoofdbestanddelen als methaan en koolstofdioxide is ontstaan. Daarmee vallen andere gassen, bijvoorbeeld gas dat ontstaat door het vergassen van biomassa, net als aardgas onder de algemene eis voor gasmotoren (InfoMil, 2012).

## 3.2 Technische analyse biogasmotoren

In een overzicht van WKK in Zwitserland wordt het Zwitserse gasmotorpark onder meer uitgesplitst naar het toegepaste type emissiebestrijdingstechnologie voor WKK (Blockheizkraftwerke). In dit overzicht zijn statistieken opgenomen omtrent motoren die worden bedreven op biogas afkomstig uit waterzuiveringsinstallaties, in het rapport “klärgas” genoemd. Dat was in 2010 als volgt verdeeld voor deze biogasgestookte installaties: 18% geen bestrijdingsmaatregel, 5% driewegkatalysator, 73% lean-burn bedrijf van motor, 0% SCR-toepassing en 4% andere maatregelen (Kaufmann, 2011). Het totaal aantal installaties is 360 en het totaal vermogen van deze installaties is 28,8 MW<sub>e</sub>. In absolute aantallen wordt in deze bron melding gemaakt van één biogasmotor op dit type gas dat met SCR is uitgerust, wat door afronding resulteert in 0% SCR-toepassing (Kaufmann, 2011).

SCR als rookgasreinigingstechnologie wordt veel minder toegepast bij biogasmotoren dan bij aardgasmotoren (Ruch, 2005). Een overzicht van projecten waarin SCR technologie en andere rookgasreinigingstechnologie is gecombineerd met diverse biogasmotoren, is opgenomen in **Tabel 10**. In deze en volgende paragraaf worden diverse projecten uitgelicht. Het belangrijkste knelpunt dat door actoren naar voren wordt gebracht, zijn sporenelementen in het biogas die de werking van de katalysator kunnen aantasten. Sporenelementen kunnen inderdaad problematisch zijn voor de werking van katalysatoren, maar deze zijn vaak ook schadelijk voor de gasmotoren, zodat vanuit dat oogpunt verwijdering nuttig of zelfs noodzakelijk is. Vanwege deze sporenelementen, maar ook wegens het risico op uitval van de gasreiniging, zijn leveranciers terughoudend om bij biogas-installaties garanties af te geven voor de levensduur van de katalysator. Overigens is er wel veel ervaring met SCR-technologie bij andere installaties met diverse sporenelementen in het rookgas.

De SCR-technologie wordt toegepast bij kolencentrales en een aantal grotere industriële stookinstallaties. Ook bij gasmotoren wordt SCR op grote schaal toegepast, maar voor zover bekend wordt deze technologie nog weinig toegepast bij gasmotoren op biogas. Zoals hiervoor geschetst is een veelgenoemd probleem de aanwezigheid van sporenelementen in de uitlaatgassen die katalysator beschadigen. Hier staat tegenover dat SCR-installaties al tientallen jaren worden gebruikt bij kolengestookte installaties en ook al jaren bij vuilverbrandingsinstallaties worden toegepast.

Daarnaast wordt er melding gemaakt van organische siliciumverbindingen, siloxanen, die de katalysator bedekken en de werking ervan hinderen. Deze siloxanen kunnen aanwezig zijn in biogas van afvalwaterzuivering en zijn afkomstig van anorganische vetten, zoals toegepast in sommige zeepsoorten. Siloxanen zijn ook schadelijk voor de gasmotoren. Waar nodig kunnen ze worden verwijderd, bijvoorbeeld door toepassing

SCR technologie en driewegkatalysatoren beschikbaar voor biogasmotoren

van een actief kool filter (BTG, 2005; Credner, 2004; Avesco Swissmotor, 2012b). Ook alkalimetalen als natrium en kalium kunnen de werking van de katalysator in de SCR-installatie aantasten. Dit effect wordt onder andere genoemd bij het bijstoken van hout in kolencentrales (Baxter, 2005). Omdat deze alkalimetalen goed oplosbaar zijn in water, zijn deze niet aanwezig in biogas dat via vergisting is gemaakt. Deze componenten kunnen wel aanwezig zijn als het gas via vergassing is gemaakt; zoals beschreven in Paragraaf 3.1 valt dit type biogas onder dezelfde eisen als aardgas.

SCR-technologie wordt verder ook toegepast bij bio-olie (palmolie). Een katalysatorfabrikant die hierover benaderd is, gaf ad hoc aan geen problemen te verwachten.

Technisch is het mogelijk om stortgas en biogas, zowel uit mest als uit slib van afvalwaterzuiveringsinstallaties, met commercieel beschikbare technieken zodanig te reinigen en op te werken dat het aan de specificaties voor aardgaskwaliteit voldoet en in het aardgasnet kan worden geïnjecteerd. Bij deze kwaliteit biogas is het eveneens technisch mogelijk om een gasmotor met SCR te bedienen. Avesco Swissmotor biedt commercieel gasmotoren aan voor diverse soorten biogas welke voldoet aan de eisen van de Zwitserse Luftreinhalte-Verordnung (Avesco Swissmotor, 2012a).

Commerciële beschikbaarheid van de diverse rookgasreinigingstechnologieën

In een Duits overzicht voor WKK gasmotoren als Blockheizkraftwerke is een lijst met fabrikanten opgenomen, die motoren aanbieden in combinatie met diverse rookgasreinigingstechnologieën (BHKW, 2011). Uit deze lijst blijkt dat diverse leveranciers biogasmotoren leveren met oxidatiekatalysator, driewegkatalysator of lean-burn technologie voor diverse vermogensklassen. SCR-technologie wordt in deze lijst expliciet genoemd voor biogasmotoren vanaf  $9 \text{ MW}_{\text{th}}/4 \text{ MW}_{\text{e}}$ . Biogasmotoren met driewegkatalysator worden in deze lijst expliciet genoemd tot ongeveer  $150 \text{ kW}_{\text{th}}/50 \text{ kW}_{\text{e}}$ . Dit wordt in (BHKW, 2011) ook aangeboden voor biogas uit waterzuiveringsinstallaties (Klär gas), maar niet voor stortgas (Deponiegas). In de lijst met leveranciers worden ook haalbare emissies in het rookgas genoemd. Deze zijn zeer divers, ook bij toepassing van een katalytische reinigingstechnologie. Diverse leveranciers noemen emissies die samenvallen met de Duitse TA Luft emissiegrenswaarden, waardoor praktijkemissies niet altijd opgenomen lijken te zijn. Er zijn diverse leveranciers die emissiegrenswaarden voor  $\text{NO}_x$  noemen tussen 50 en  $120 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  voor motoren met driewegkatalysator. Uitgaande van een referentiewaarde van  $5\% \text{ O}_2$ , overeenkomstig de systematiek van de Duitse TA Luft, komt dit neer op  $56\text{-}135 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  bij  $3\% \text{ O}_2$  (BHKW, 2011).

Als voorbeeld kan Avesco Swissmotor worden genoemd die driewegkatalysatoren bij biogasmotoren commercieel aanbiedt en op de techniek met tussenkoeling een patent heeft (Avesco Swissmotor, 2012a, 2012b). Dit is ook mogelijk voor stortgas (Deponiegas) en biogas van waterzuiveringsinstallaties (Klär gas), eventueel in combinatie met een actief kool filter (Avesco Swissmotor, 2012b). Dit actief kool filter absorbeert diverse stoffen die regelmatig als problematische sporenelementen worden genoemd: silanen, siloxanen, ammoniak, chloor, fluor en zwavel. Er blijft dus een goed-gezuiverde brandstof over (Avesco Swissmotor, 2012b). Hiermee zou kunnen worden voldaan aan de eisen van de Zwitserse Luftreinhalte-Verordnung (LRV) (Avesco Swissmotor, 2012a). Ook uit het overzicht van projecten, zie **Tabel 10**, blijkt dat de driewegkatalysator in de praktijk wordt toegepast op een aantal plaatsen.

Mede door de lagere verbrandingswaarde en de soms wisselende samenstelling kan het zijn dat technieken die bij aardgasverbranding toegepast worden, niet zonder meer geschikt zijn voor biogasverbranding. Lean-burn technologie om  $\text{NO}_x$ -emissies te reduceren kan problematisch zijn, vanwege de verbrandingssnelheid van biogas (BMW, 2007). In een Oostenrijks rapport wordt melding gemaakt van optimale verbranding bij  $\lambda$  1,3-1,4 (BMW, 2007). Technische regelingen voor optimale brandstofbenutting van biogas in gasmotoren worden niet standaard toegepast; wel zijn er  $\lambda$ -regelingen beschikbaar die resulteren in een acceptabel rendement en beperking van de  $\text{NO}_x$ -emissies. Er zijn ook nog nieuwe technische ontwikkelingen die lage  $\text{NO}_x$ -emissie mogelijk maken zonder katalysator. Deze bevinden zich nog sterk in de onderzoeks- en demonstratiefase. Belangrijke ontwikkelingen zijn Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI), wat een ander ontstekingsconcept voor een gasmotor is, en Hydrogen Assisted Lean Operation (HALO), waarbij een deel van de brandstof wordt vervangen door waterstof.

HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition, is een concept waarbij de brandstof en verbrandingslucht voor de verbranding wordt gemengd en spontaan ontbrandt door toename van de temperatuur tijdens de compressieslag in de motor. Ontbranding ontstaat daarbij op meerdere locaties en er is geen duidelijke vlamvoortgang (enkele bronnen spreken van vlamloze verbranding). De verbranding vindt daardoor plaats bij lagere temperatuur en resulteert in een lagere  $\text{NO}_x$ -uitstoot, waarbij wel de hoeveelheid onverbrande koolwaterstoffen en CO toeneemt (Yao, 2009). Voor stortgas (landfill gas) is een project in Californië bekend bij Makel Engineering, waarbij het concept HCCI wordt gebruikt als Low  $\text{NO}_x$  generator. Afhankelijk van het rendement (31-39%) wordt een  $\text{NO}_x$ -emissie van 2-14 ppm gegenereerd (bij lager rendement, minder  $\text{NO}_x$ ) (Tiangco, 2007). Het zuurstofpercentage is niet gerapporteerd; op grond van een ander rapport over hetzelfde project, dat is (Dibble, 2006), kan 15-16%  $\text{O}_2$  worden aangenomen en resulteert 2-14 ppm in 2,5-104 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$ . Uitgebreide metingen laten zien dat lage emissies na een catalytic converter (katalysator) haalbaar zijn, zie **Tabel 8** (Blizman, 2006). De emissieniveaus liggen hier gemiddeld voor het gesimuleerde stortgas, omgerekend naar 3%  $\text{O}_2$ , op 38 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$ , < 20 mg  $\text{CO}/\text{Nm}^3$  en 21 mg UHC/ $\text{Nm}^3$  (UHC=onverbrande koolwaterstoffen). Daarbij is voor de omrekening van UHC uitgegaan van gemeten methaan. Dit betekent dat deze techniek ook leidt tot een lage methaanuitstoot.

Potentieel alternatief:  
demonstratie van  
ontstekingsconcept HCCI bij  
stortgas

**Tabel 8:** Overzicht emissies HCCI motor met aardgas en stortgas. De equivalence ratio geeft de luchtvermaat aan en wordt berekend als inverse van de lambda. Tussen haakjes is de emissie in de eenheid mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> weergegeven.

Inlet condition		Engine output		Exhaust gas		Emissies [ppm] en (mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> )		
Equiv ratio	Intake temp [°C]	Power [kW]	Eff. [%]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CO	UHC (Meting CH <sub>4</sub> aangenomen)	NO <sub>x</sub>
Aardgas								
0,34	165	26,8	33,1	15,4	~7,5	< 5,0 ( < 20)	5,9 (14)	3,8 (25)
0,36	165	26,9	33,4	15,4	~7,5	< 5,0 ( < 20)	6,3 (15)	6,6 (44)
0,38	165	27,2	32,2	15,4	~7,5	< 5,0 ( < 20)	8,3 (19)	9,4 (62)
Gesimuleerd stortgas								
0,35	175	25,6	28,3	15,3	~11,0	< 5,0 ( < 20)	7,8 (18)	4,4 (29)
0,38	175	26,5	29,5	15,4	~11,5	< 5,0 ( < 20)	9,7 (22)	5,2 (35)
0,41	175	28,3	31,7	15,3	~11,0	< 5,0 ( < 20)	9,9 (23)	7,6 (50)

**Tabel 9:** Overzicht emissies HCCI motor op aardgas

Cat. Converter	Inlet condition		Engine output				Emissies [ppm] en (mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> )		
	Equiv ratio	Intake temp [°C]	Power [kW]	Eff. [%]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CO	UHC (Meting CH <sub>4</sub> aangenomen)	NO <sub>x</sub>
No	0,33	165	26	33	~16,0	~7,5	[ < 90] ( < 408)	[ < 150] ( < 390)	[~4] ( ~30)
Yes	0,34	165	27	33	~15,5	~7,5	[ < 5] ( < 20)	[~6] (~14)	[~4] ( ~27)

Dat de catalytic converter noodzakelijk is om de emissie-eisen te halen, laat een meting met aardgas zien, zie **Tabel 9** (Dibble, 2006). De emissiecijfers zijn in de tabel met behulp van het aanwezige zuurstofpercentage ook omgerekend naar mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Veel metingen zijn uitgevoerd met gesimuleerd stortgas, maar een HCCI-test met echt stortgas is eveneens opgestart (Dibble, 2006).

Potentieel alternatief: demonstratie van toevoeging van waterstof (HALO)

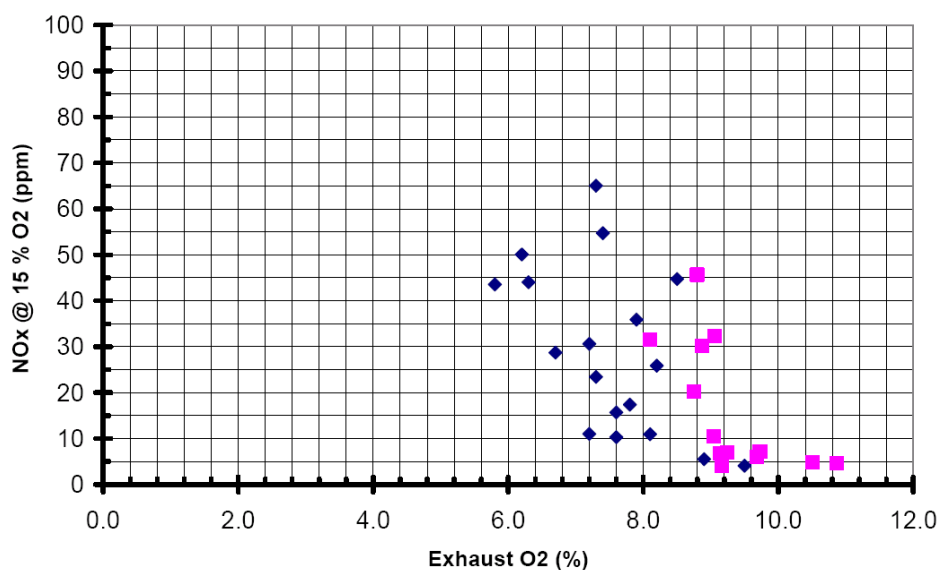
Om de uitstoot van NO<sub>x</sub> (en ook CO) verder terug te dringen, zou ultra lean operatie van gasmotoren de ideale oplossing zijn: de zuurstofconcentratie neemt toe en de piektemperatuur in de cilinder gaat omlaag. Bovendien gaat het thermisch rendement van de motor omhoog. Ultra lean operatie wordt beperkt door de ontvlambaarheid van de brandstof. Waterstof ontvlamt bij een veel bredere ratio van lucht/brandstof, oftewel de lambda, en kan in principe onder ultra lean condities opereren. Hydrogen



Assisted Lean Operation (HALO) van gasmotoren is een techniek waarbij een deel van het aardgas wordt vervangen door waterstof. Daardoor kan de lambda toenemen van 1,6 (wat een commerciële waarde is) naar 2,5. Bij een lambda van 2,2 is de NO<sub>x</sub>-uitstoot praktisch nul (TIAX, 2006).

Bio-HALO is eveneens uitgevoerd door TIAX LLC met behulp van synthetisch stortgas met synthetisch reformate in opdracht van California Energy Commission (Tiangco, 2007; Couch, 2007). Reformate is hier een mengsel van waterstof, CO en een inert gas (bijvoorbeeld N<sub>2</sub>) dat uiteindelijk ter plekke uit het "biogas" gemaakt moet worden. Resultaten laten zien dat door ultra lean operatie met deze techniek de NO<sub>x</sub>-uitstoot inderdaad fors omlaag wordt gebracht, zie **Figuur 4** met de resultaten van twee proeven (Couch, 2007). De vierkante symbolen in de figuur representeren resultaten bij 8-15% H<sub>2</sub>; ruitsymbolen representeren resultaten bij lagere H<sub>2</sub>-percentages. Om de NO<sub>x</sub>-uitstoot op 5 respectievelijk 7 ppm bij 15% O<sub>2</sub> (dit referentie-zuurstofpercentage wordt veelvuldig gehanteerd in Californië) te verkrijgen, is op basis van de onderste verbrandingswaarde een energetische verhouding gebruikt van 13,5% respectievelijk 11,4% H<sub>2</sub> LHV/CH<sub>4</sub> LHV. Een meting die resulteerde in 10 ppm NO<sub>x</sub> (bij 15% O<sub>2</sub>), is uitgevoerd bij 7,5% H<sub>2</sub> LHV/CH<sub>4</sub> LHV. Er is dus een vrij hoog percentage waterstof nodig om deze lage NO<sub>x</sub>-emissies te bereiken (Couch, 2007). Een eis van 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> komt overeen met 16 ppm NO<sub>x</sub> bij 15% O<sub>2</sub>. De investeringskosten van een HALO installatie is circa 10% van de totale investeringskosten van de gasmotor.

**Figuur 4:** NO<sub>x</sub>-effect van ultra arme afstelling door waterstof gebruik (HALO). De vierkante symbolen in de figuur representeren resultaten bij 8-15% H<sub>2</sub>; ruitsymbolen representeren resultaten bij lagere H<sub>2</sub>-percentages



Er zijn meer dan 10 projecten waarbij SCR na gasmotoren op biogas wordt toegepast. Dit betreft een diversiteit aan biogassen zoals uit slib van een waterzuivering, stortgas, biogas uit mestvergisting, co-vergisting en vergisting van GFT. Ook zijn er 3 projecten waar een driewegkatalysator bij gebruikt wordt, zie **Tabel 10**. Bij afvalwaterzuivering moeten ook de siloxanen verwijderd worden omdat deze de motor beschadigen. De diverse projecten worden hierna verder toegelicht.

Projecten met rookgasreiniging

**Tabel 10:** Biogasmotoren met rookgasreiniging

Techniek	Locatie	Jaar	Bron
Zwitserland			
SCR	5 locaties in Zwitserland. Waarvan twee hieronder toegelicht.	2005	(Genesys, 2005)
SCR bij covergisting	1 <sup>e</sup> installatie 100 kW <sub>e</sub> Zündstrahlmotor; Ittigen in Zwitserland (heeft ook roetfilter).	2005	(Genesys, 2005), (BFE, 2005)
SCR bij mestvergisting	Andere installatie 75 kW <sub>e</sub> Wiggertal Zwitserland.		(Schneeberger, 2006)
Duitsland			
3 weg katalysator bij waterzuivering	190 kW <sub>e</sub> in Köttingen (gemeente Erftstadt) Duitsland. Voor de motor worden o.a. siloxanen verwijderd.	2003	(Energieprojecten, 2004)
SCR-Katalysator	Berlin Wannsee (stortgas). Gaat over 3 maal 1500 kW <sub>e</sub> met SCR.	1993	(Tallner, 1993)
3-Wege-Katalysator (mit $\lambda = 1$ )	Deponie Weinheim Gesloten?	1993	(Tallner, 1993)
Nederland			
SCR bij stortgas voor 450 draaiuren	Dual fuel motor van 100 kW Stainkoel'n stortplaats in Groningen.	2005	(Dambrink, 2005)
SCR bij GFT vergisting	Twee 1 MW <sub>e</sub> Jenbacher gasmotoren bij VAR B.V., Wilp-Achterhoek.	2009	(VAR, 2009)
Verenigde Staten			
SCR	Ocean County Utility Authority.		(Tower, 2003)
SCR	Sacramento County in California.	1996	(Tower, 2003)
SCR Bergen County Afvalwater.	Bergen County Utility Authority s in Little Ferry.	2002	(Tower, 2003)
Mestvergisting met driewegkatalysator	Gallo Cattle Company in San Joaquin, Californië.	2005	(Dusault, 2009)
Mestvergisting met SCR	Fiscalini Farms & Fiscalini Dairy in San Joaquin in San Joaquin, Californië.	2007	(Dusault, 2009)
Stortgas met HCCI motor	Makel Engineering, Californië.	2007	(Tiangco, 2007)

Biogasmotoren in Zwitserland

Een onderzoeksprogramma van het Bundesamt für Energie BFE in Zwitserland spreekt over 5 biogas gasmotoren met SCR in april 2005 (Genesys, 2005), zie ook **Tabel 10**. Van een tweetal motoren van 100 kW en 75 kW geeft de beschrijving aan dat het om mestvergisting of co-vergisting gaat<sup>11</sup> (Schneeberger, 2006; BFE, 2005).

Biogasmotoren in Duitsland

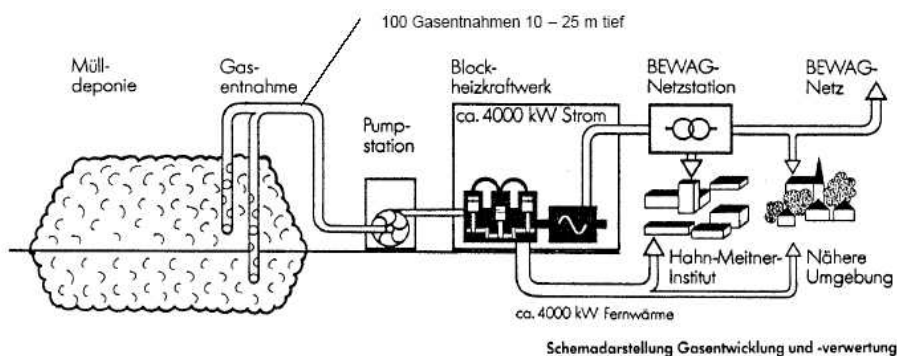
In Duitsland wordt een aantal biogasmotoren gerapporteerd met rookgasreiniging, zie ook **Tabel 10**.

<sup>11</sup> Bij Genesys Biogas AG verwijzen ze door naar katalysator-bedrijf Hug Engineering in Zwitserland. Hug Engineering ([www.hug-eng.ch/](http://www.hug-eng.ch/)) is een belangrijke speler op het gebied van DeNOx-installaties. Voor meer informatie wordt naar Hanwel in Nederland verwezen.

Het bedrijf Menag heeft in 2003 een gasmotor geplaatst, bij de waterzuivering van de Duitse plaats Köttingen (gemeente Erftstadt), die met een driewegkatalysator werkt. De gasmotor werkt zonder overmaat aan verbrandingslucht ( $\lambda=1$ ) en maakt gebruik van rookgasrecirculatie. Menag claimt voor deze gasmotor, die op basis van de Zwitserse Liebherr dieselmotor is ontwikkeld, een hoog rendement. De opgegeven waarde voor het asrendement van de zescilinder gasmotor is 39,5% en voor het elektrische rendement van motor plus generator 37,6%. Dit elektrische rendement is hoog in relatie tot het bescheiden vermogen van 190 kW. Op de proefstand leverde het aggregaat zelfs een elektrisch rendement van 38% (Energieprojecten, 2004).

Een studie uit 1993 noemt een tweetal voorbeelden. Het eerste heeft betrekking op een drietal grote 1,5 MW<sub>e</sub> motoren met SCR op stortgas, zie **Figuur 5** (Tallner, 1993). Het lijkt erop dat deze afvalstortplaats inmiddels is gesloten en de gaswinning is stopgezet. De andere motor bij Deponie Weinheim werkt met een geregelde driewegkatalysator. Om beschadiging van de katalysator te voorkomen moet het gas eerst gereinigd worden van arseen, chloor en fluor. Het  $\lambda$ -venster is met  $\lambda = 0,988$  ( $\pm 0,2\%$ ) kleiner dan voor benzine auto's. Er dient precies genoeg lucht te worden toegevoerd voor volledige verbranding. Alleen zo kan de stikstofoxide worden afgebroken met de aanwezige CO en koolwaterstoffen (Tallner, 1993). Van beide motoren is geen recente informatie aangetroffen.

**Figuur 5:** Schema van gasmotor op stortgas bij Deponie Wannsee



#### Deponiegas:

- zu 100 % mit H<sub>2</sub>O gesättigt → Trocknung
- Viele organische Spurenstoffe, giftig, krebserregend, korrosiv → Gasvorreinigung (Abtrennen der chlorierten Kohlenwasserstoffe)
- Stickstoffe im Abgas durch SCR
- 55 % CH<sub>4</sub>, 40 % CO<sub>2</sub>, 5 % N<sub>2</sub> Methan hat einen Heizwert wie leichtes Heizöl

#### Technik:

3 Stk. - Verbrennungsmotor, turbogeladen, 16 Zylinder, Hochspannungsgenerator, 1500 kW, 10 kV  
 Zusammen: P<sub>el</sub> = 1,5 MW, P<sub>th</sub> = 6,5 MW (Abgas, Motoröl, Kühlwasser)

Ook in Nederland zijn een aantal biogasmotoren geplaatst met rookgasreiniging (zie **Tabel 10**). In Nederland is door Host in opdracht van SenterNovem onderzoek gedaan naar SCR bij biogas (Dambrink, 2005). Het gaat hierbij om een 100 kW dual fuel motor die zowel diesel als biogas gebruikt (verhouding 10% diesel, 90% stortgas). De locatie was de Stainkoel'n stortplaats in Groningen. De door Steuler geleverde SCR gaf een normale verwijderingsgraad (80%); in dit geval genoeg om aan 140 g/GJ te voldoen. De metingsduur is met 450 uur wel te beperkt om over de levensduur een conclusie te trekken.

Biogasmotoren in Nederland

Vooruitlopend op de Bems-regelgeving zijn in de stimuleringsregeling voor duurzame energie (SDE) scherpe eisen geformuleerd aan de NO<sub>x</sub>-emissie biogasmotoren. Door de VAR in Wilp zijn daarop de twee 1 MW<sub>e</sub> gasmotoren van Jenbacher behorend bij een nieuwe installatie voor het vergisten van GFT uitgevoerd met een SCR installatie. Beide nieuwe SCR-installaties voldoen (nog) ruimschoots aan de voorgenomen eis. Er zijn door de leverancier echter geen lange termijn garanties afgegeven. Omdat de SDE inmiddels deze scherpe eisen niet meer stelt, is de ureumdosering om bedrijfseconomische redenen inmiddels gestopt. Omdat de katalysator nog steeds in het rookgaskanaal aanwezig is, is het wel mogelijk om, indien gewenst, te meten in hoeverre deze in de loop van de tijd achteruit is gegaan.

Biogasmotoren in de Verenigde Staten

In de VS wordt melding gemaakt van diverse biogasmotoren met rookgasreiniging (zie **Tabel 10**). Daarnaast zijn er ook motoren gerealiseerd met reinigingsinstallaties voor siloxanen. De motoren staan op een referentielijst van een bedrijf die deze apparatuur levert (Tower, 2003). In Paragraaf 3.3 is verwijdering van siloxanen uitgebreider beschreven.

Biogasmotoren in Californië

In Californië wordt aan biogasmotoren de NO<sub>x</sub>-eis gesteld van 0,15 g/bhp-hr. Dit komt volgens (Dusault, 2009) overeen met 9 tot 11 ppmv bij 15% O<sub>2</sub> ofwel circa 56-68 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Controle van deze omrekening laat zien dat een NO<sub>x</sub>-eis van 0,15 g/bhp-hr resulteert in circa 22 g/GJ (voor omrekening zie ook Bijlage A). Voor aardgasmotoren resulteert dit is 78 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> en voor biogasmotoren resulteert dit in 72 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub><sup>12</sup>. Deze laatste waarde komt nagenoeg overeen met 11 ppmv volgens (Dusault, 2009). Door (Dusault, 2009) wordt een bandbreedte vermeld, namelijk 9 tot 11 ppmv, vanwege variabele verbrandingskarakteristieken van het biogas (Dusault, 2009). Gallo Cattle Company in San Joaquin, Californië, is vanaf november 2005 een project begonnen met een biogasmotor, waarbij biogas van een mestvergistingsinstallatie wordt ingezet onder rijke condities en een driewegkatalysator wordt gebruikt om emissies te reduceren. San Joaquin bepaalde dat deze emissielimiet was 'achieved in practice'. Gallo was echter niet in staat om de emissies consistent beneden deze limiet te houden en het bereiken van deze limiet werd geclassificeerd als 'with marginal success' (Dusault, 2009).

Vanaf september 2007 begon Fiscalini Farms & Fiscalini Dairy in San Joaquin, Californië, een mestvergistingsinstallatie te bedrijven. Deze installatie werd uiteindelijk vergund voor een bedrijf boven 0,15 g/bhp-hr (22 g/GJ, omrekening zie Bijlage A), onder voorwaarde van installatie van een SCR (Selective Catalytic Reduction) en bij overschrijding van 0,60 g/bhp-hr (89 g/GJ, omrekening zie Bijlage A) diende de installatie te worden afgeschakeld. Sinds Juni 2009 draait deze unit; meetresultaten zijn niet bekend (Dusault, 2009).

Opgemerkt wordt dat er melding wordt gemaakt van annulering of ombuiging van projecten, onder meer vanwege deze strenge emissie-eisen, maar ook wegens een langdurige vergunningprocedure (Dusault, 2009; Biomass Magazine, 2010). De laatste

<sup>12</sup> Biogassamenstellingen variëren sterk, waardoor de omrekening van emissies en eisen eveneens kan variëren. De omrekening hier is uitgevoerd voor een aangenomen biogassamenstelling van 55 vol-% CH<sub>4</sub> en 45 vol-% CO<sub>2</sub>. Deze samenstelling wijkt niet sterk af van een aantal biogassamenstellingen uit (KIWA, 2008).

motor in **Tabel 10** heeft betrekking op de demonstratiemotor van het HCCI concept, zoals hiervoor reeds beschreven.

De fabrikant Cummins brengt gasmotoren op de markt voor gassen met een lagere verbrandingswaarde (waarbij expliciet biogas genoemd wordt) en geeft daarbij aan dat SCR als extra optie bijgeleverd kan worden. De factsheet maakt echter niet 100% duidelijk dat ook de combinatie mogelijk is (Cummins, 2007a). In de alinea waar ook SCR genoemd wordt varieert de grootte van 315 kW tot 2 MW. Overigens is de onbestreden emissie, dus zonder SCR, lager dan 0,5 of 0,7 g NO<sub>x</sub>/bhp-hr (75 respectievelijk 105 g NO<sub>x</sub>/GJ, voor omrekening zie Bijlage A; uitgaande van biogas<sup>12</sup>, resulteert dit in circa 250 respectievelijk 350 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>) (Cummins, 2007a, 2009).

Motorfabrikant Cummins

### 3.3 Reiniging van het biogas

Een belangrijk probleem bij de toepassing van biogas in gasmotoren is de aanwezigheid van sporenelementen. Deze kunnen de levensduur van een eventuele katalysator beperken. Ook kunnen ze problemen geven in de gasmotoren door afzetting en corrosie of doordat ze oplossen in de motorolie. Dit kan leiden tot meer onderhoud of een kortere levensduur van de gasmotor. Biogasreiniging is dan ook een belangrijke stap.

Siloxanen, die aanwezig zijn in biogas van waterzuiveringinstallaties, is de bekendste, problematische component. Een bedrijf dat apparatuur voor siloxaanverwijdering levert, Applied Filter Technology en sinds Augustus 2012 onderdeel van Robinson Group LLC, geeft een lange lijst van toepassingen van zijn techniek bij het reinigen van biogas/stortgas (Tower, 2003). De belangrijkste reden voor deze reiniging is om apparatuur te beschermen, maar in een aantal gevallen wordt expliciet gemeld dat er ook een SCR-installatie aanwezig is. Het in 1996 ontwikkelde Selective Active Gradient™ proces (SAG™) gebruikt het gasreinigende medium PMG™ (PolyMorphous Porous Graphite™) genoemd. De eerste installatie op vergistingsgas werd in 1996 geplaatst bij Sacramento County MSD Carson Cogeneration facility in Californië. Het doel was om de SCR te beschermen en op het moment van publicatie (na zeven jaar) werkte de SCR-installatie nog naar behoren (Tower, 2003).

Siloxanen in biogas

In februari 2002 was het Bergen County die het SAG™-systeem installeerde om hun Caterpillar motor te beschermen. Tot dan toe had de SCR-installatie achter de gasmotor niet goed gewerkt wegens vervuiling met siloxanen. Het gaat hierbij waarschijnlijk om de afvalwater behandelingsinstallatie in Little Ferry van Bergen County Utility Authority (BCUA). Een derde project uit februari 2003 betreft een Waukesha motor met een SCR-installatie bij de Ocean County Utility Authority (Tower, 2003).

Ook Makel Engineering heeft in een project laten zien dat reiniging van stortgas met een actief kool filter afdoende was om siloxanen te verwijderen. Voor het filter werden twee typen siloxanen gedetecteerd, maar na filtratie waren deze volledig verwijderd. Filtratie werd uitgevoerd door het gas door een vat gevuld met actief kool te leiden (Dibble, 2006).

Zoals eerder beschreven in paragraaf 3.2 lijken meerdere aanbieders op de markt aanwezig te zijn met reinigers voor biogas. Avesco Schwissmotor heeft een vrij uitgebreide beschrijving van een commercieel aangeboden biogas-reiniger op basis van actief kool, welke ook geschikt is voor stortgas (Deponiegas) en biogas van waterzuiveringsinstallaties (Klärgas). Dit actief kool filter absorbeert diverse componenten die regelmatig als problematische sporenelementen worden genoemd: silanen, siloxanen, ammoniak, chloor, fluor en zwavel. Er blijft dus een goed-gezuiverde brandstof over. De actief kool kan worden vervangen door de leverancier als aanvullende service (Avesco Schwissmotor, 2012b).

#### Kosten van gasreiniging

In het rapport van Stowa wordt gesproken over biogas gasreiniging bij vergistingsgas van een rioolwaterzuiveringsinstallaties. De gasreiniging betreft water, stof en H<sub>2</sub>S. Hierbij is gekozen voor een biogasdroger met H<sub>2</sub>S verwijdering op basis van een direct contact condensor (Stowa, 2005). Kosten van de gasreiniging bedragen 27.000 euro (een gasmotor van 300 kW<sub>e</sub> kost in hetzelfde rapport 225.000 euro). De hulpstof voor de reiniger (natronloog) kost minder dan 1000 €/jaar. Per saldo kost de gasreiniging minder dan 2% van de hele vergistingsinstallatie inclusief gasmotor.

Een ander rapport van Stowa uit 2011 geeft eveneens kosten voor gasreiniging, zie **Tabel 11** (Stowa, 2011). In dit rapport worden cases vergeleken van gasmotoren op gas van rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI-gas) met en zonder gasreiniging. Het verschil in investeringskosten wat wordt gehanteerd, is 25% tussen de beide cases. Het investeringsverschil overstijgt de eveneens weergegeven kosten voor het actief kool filter ruimschoots zonder dat hier een verdere toelichting op wordt gegeven. Desalniettemin blijkt uit de betreffende studie dat WKK voor RWZI-gas met gasreiniging een attractieve case is met terugverdientijden van 2,5 jaar voor 750 kW<sub>e</sub>, 4,8 jaar voor 300 kW<sub>e</sub> en 21,1 jaar voor 120 kW<sub>e</sub> (Stowa, 2011). Hierbij wordt opgemerkt dat er geen correctie in de berekening is doorgevoerd voor verminderde onderhoudskosten, wat financieel gunstiger is voor de case met gasreiniging (Stowa, 2011).

**Tabel 11:** Kosten van twee gaszuiveringstechnieken: Actief kool filter en diepkoeling

Schaalgrootte biogasproductie + bijbehorende installatie	Investering Aktief-kool (€)	Vervanging filtervulling (€/j)	Investering diepkoeling (€)	Onderhoud + energie diepkoeling (€/j)
45 m <sup>3</sup> /h, 120 kW <sub>e</sub>	47.600,-	7.100,-	167.000,-	9.000,-
115 m <sup>3</sup> /h, 300 kW <sub>e</sub>	95.200,-	12.000,-	179.000,-	12.800,-
285 m <sup>3</sup> /h, 750 kW <sub>e</sub>	154.700,-	25.000,-	300.000,-	22.000,-

Een ander rapport over stortgas noemt ook een kostencijfer van 2500 euro voor gasreiniging bij een 30 kW<sub>e</sub> microturbine. Uit dit rapport: "Een andere mogelijkheid om stortgas van slechte kwaliteit te benutten is het inzetten in een minigasturbine. Een dergelijke machine kan door de werking met een grote natuurlijke luchtvermaat veel makkelijker brandstoffen omzetten met een lage energie-inhoud en daarmee ook stortgas van een slechte kwaliteit. Het is wel van belang om het stortgas in een wasser te reinigen van siloxanen in het stortgas, omdat dit de turbineschoepen kan beschadigen door afzettingen te vormen. Overigens wordt tegenwoordig ook bij gasmotoren de noodzaak van verwijdering van siloxanen onderkend."

Per saldo zou geconstateerd kunnen worden dat de investeringskosten voor het reinigen van biogas met een actief kool filter circa 12-14% van de kosten van de totale installatie (Stowa, 2011). Indien dit alleen zou plaatsvinden ten behoeve van de rookgasreiniging (en niet voor de levensduur van de gasmotor of de onderhoudskosten) kunnen de investeringskosten voor de rookgasreiniging via SCR met 50% toenemen bij kleine gasmotoren (< 300 kW). De variabele kosten stijgen echter veel minder.

**Figuur 6:** Gaszuivering bij waterzuivering in Köttingen (Duitsland)



Een voorbeeld van gaszuivering wordt beschreven in een lijst met energieprojecten (Energieprojecten, 2004). Hierbij wordt de volgende toelichting gegeven: “Om een lange levensduur van de driewegkatalysator te waarborgen, ondergaat het biogas van de waterzuivering in Köttingen meerdere behandelingen. Hierbij is gebruik gemaakt van de kennis van het Duitse bedrijf Siloxa, die een gasreiniging gebouwd heeft voor een brandstofcel op biogas. Het gas wordt door koeling gedroogd. In het daarbij vrijkomende condenswater worden siloxanen gedeeltelijk uit het gas gewassen. Het gas wordt gekoeld tot 2°C en daarna opgewarmd tot 20°C. Het biogas heeft dan een gunstige temperatuur en relatieve vochtigheid voor de volgende stap. Het droge biogas wordt door drie in serie geplaatste actief kool filters geleid, waarin siliciumverbindingen (siloxanen), halogenen en zwavelwaterstoffen worden geadsorbeerd. Door deze reiniging wordt niet alleen de katalysator beschermd, maar ook de gasmotor zelf. De onderhoudskosten van de motor komen daardoor op hetzelfde niveau als bij gebruik van aardgas.”

### 3.4 Wetgeving biogasmotoren

De meeste landen hebben nog geen emissielimieten voor biogasmotoren die bij de voorgestelde 100 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> in de buurt komen. In aantal regio's zijn deze eisen al wel aangekondigd of van kracht.

#### Wetgeving in Duitsland

In Duitsland geldt voor de meeste biogasmotoren<sup>13</sup> een eis van 500 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub>. Dit is circa 560 mg bij 3% O<sub>2</sub>. Voor stortgasmotoren (en aardgasmotoren) die niet via lean burn werken geldt een eis die op de helft ligt, namelijk 250 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> (circa 280 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>) (VDMA, 2011a). Deze eis heeft waarschijnlijk een relatie met de goedkope toepasbaarheid van de driewegkatalysator bij de niet-lean burn motoren (en dan met name de aardgasmotoren) en het lichte rendementsverlies bij strenge eisen aan lean burn motoren. Het UN-ECE Gothenburg Protocol heeft de eisen juist andersom gesteld: 250 voor lean burn en 500 voor andere type motoren.

#### Wetgeving in Californië

In de South Coast Air Quality Management District van Californië zijn vanaf 2016 wel vergelijkbare eisen van kracht. In **Tabel 12** zijn de eisen aangegeven voor biogasmotoren zoals deze voor de SCAQMD regio in de VS gelden (SCAQMD, 2012). Het referentie-zuurstofpercentage is 15%. De VOC emissie is uitgedrukt in gram koolstof<sup>14</sup>. De waarden zijn hier ook omgerekend naar in Nederland gangbare eenheden. Op basis van de gepubliceerde tekst kan geconcludeerd worden dat er diverse stimuleringsmaatregelen zijn om aan de normen die per 1 Juli 2016 ingaan, reeds nu al te voldoen.

**Tabel 12:** SCAQMD eisen aan biogasmotoren; de originele, Amerikaanse eis is aangegeven met (USA), de omrekening naar Nederlandse eenheden is aangegeven met (NL)

Table III; Concentration limits for landfill and digester gas-fired engines			
	NO <sub>x</sub>	VOC (als koolstof)	CO
USA	bhp ≥ 500: 36 ppmvd x ECF <sup>15</sup>	Landfill gas: 40 ppmvd and Digester gas: 250 ppmvd x ECF	2000 ppmvd
USA	bhp < 500: 45 ppmvd x ECF <sup>15</sup>		
NL	Asvermogen ≥ 373 kW: 223 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> x rend corr	Stortgas 65 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> ; Vergistingsgas 404 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> x rend corr	7540 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub>
NL	Asvermogen < 373 kW: 279 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> x rend corr		
Concentration limits effective July 1, 2016			
USA	11 ppmvd	30 ppmvd	250 ppmvd
NL	68 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub>	49 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub>	943 mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub>

<sup>13</sup> Een uitzondering vormden de 'Zündstrahlmotoren' (pilot injectie of jet ignition) op biogas kleiner dan 3 MW<sub>e</sub>. Voor deze geldt een eis van 1000 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub>.

<sup>14</sup> Definitie volgens SCAQMD Rule 102: Volatile Organic Compound (VOC) is any volatile compound of carbon, excluding methane, carbon monoxide, carbon dioxide, carbonic acid, metallic carbides or carbonates, ammonium carbonate, and exempt compounds.

<sup>15</sup> De ECF is een rendementscorrectiefactor. ECF = 9250 Btus/hp-hr gedeeld door het gemeten verbruik in Btus/hp-hr. Of anders geformuleerd: ECF is 1 of, als dit gemeten is, het rendement gedeeld door 27%.



In andere delen van Californië zijn ook eisen gesteld bijvoorbeeld aan mestvergisting. In het San Joaquin Valley Air Pollution Control District ('San Joaquin') en Sacramento Municipal Air Quality Management District ('Sacramento') ten Noorden van Los Angeles wordt een eis gesteld voor biogasmotoren van 0,15 g NO<sub>x</sub>/bhp-hr of circa 56-68 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (Dusault, 2009). Deze eisen zijn gebaseerd op de Best Available Control Technology (BACT) Guideline; een versie op de site van San Joaquin laat zien dat 0,15 g NO<sub>x</sub>/bhp-hr sinds 2009 nog steeds als haalbaar wordt gezien voor gasgestookte motoren op afvalgassen. Deze grenswaarde lijkt (nog) niet in een Rule te zijn geïmplementeerd in zowel San Joaquin als Sacramento: de diversiteit aan eisen aan gasmotoren is vrij groot, maar veruit de meeste eisen zijn (aanzienlijk) soepeler. Wel geldt er in de bestaande Rules voor diverse situaties, inclusief afvalgassen, een minimalisatieverplichting ten aanzien van NO<sub>x</sub> emissies met een orde grootte 80-95%, afhankelijk van de situatie. De referentie daarbij is de emissiesituatie voor bestrijding van emissies (San Joaquin, 2012; Sacramento, 2012).

Zoals uit Paragraaf 2.3 blijkt, worden er ook in Zwitserland lokaal strenge eisen aan biogasmotoren gesteld. Zo wordt in Stadt Zürich een eis gesteld van 50 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> wat overeen komt met 56 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>.

Een overzicht van de diverse emissie-eisen welke zijn gevonden in de wetgeving is opgenomen in **Tabel 13**.

Wetgeving in Zwitserse regio's

**Tabel 13:** Overzicht van diverse NO<sub>x</sub> emissie-eisen van biogasmotoren in dit hoofdstuk

	NO <sub>x</sub> -emissie [mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> ]	Opmerkingen
Eis in Bems	340	Overgezet in Activiteitenbesluit
Onderzochte, voorgestelde eis	100	
Duitsland	560/280	lean burn/niet lean burn
Zwitserland - Stadt Zürich	56	
USA SCAQMD	68	Invoering in 2016
USA 2 andere regio's	56-68	

### 3.5 Verwachte kosten en effecten

In het kader van lopende werkzaamheden aan het optiedocument is een inschatting gemaakt van de kosten en effecten van de invoering van de voorgenomen eisen (Daniëls, 2006; Smekens, 2010). Het effect van de aanscherping levert in 2020 circa 0,4 kton NO<sub>x</sub>-reductie op tegen gemiddelde reductiekosten van 10 tot 15 €/kg. De omvang van de reductie hangt sterk af van de veronderstelde ontwikkelingen in de omvang van het biogasmotorpark (hier ingeschat op 135 MW<sub>e</sub>) die weer afhangt van de subsidieverlening voor duurzame elektriciteitsopwekking. Indien dit niet in de subsidie verrekend wordt, komen de extra kosten voor de eigenaar van de installatie uit op 0,6 tot 0,9 €/kWh<sub>e</sub>. Indien de kosten en effecten zwaar meewegen bij besluitvorming omtrent aanscherping, verdient het aanbeveling deze nauwkeuriger te inventariseren.

In een studie van EMPA (Soltic, 2008) wordt een offerte aangehaald voor een SCR bij een 250 kW<sub>e</sub> biogasmotor. De aanschaf hiervan zou circa 20.000 euro kosten en de totale jaarlijkse kosten van 4000 euro (bij 3000 bedrijfsuren). Deze installatie komt per kg NO<sub>x</sub>-reductie nog wat lager uit dan hier aangegeven.

### 3.6 Conclusie biogas in gasmotoren

Net als bij gasmotoren op aardgas kunnen ook biogasmotoren met een SCR toepassing worden bedreven om aan de voorgestelde eis van 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> te voldoen. Voor toepassing bij biogasmotoren bij waterzuiveringsinstallaties of stortplaatsen is gasreiniging noodzakelijk om onder andere de silicium-, chloor- en fluorverbindingen te verwijderen uit het biogas. Geschikte filters hiervoor zijn commercieel beschikbaar, zodat beschadiging aan zowel katalysatoren als de motor zelf kan worden voorkomen. Bij mestvergisting kunnen zwavelcomponenten, met name in de vorm van H<sub>2</sub>S, problematisch zijn voor katalysatoren. De meest genoemde richtlijn voor de H<sub>2</sub>S concentratie is maximaal 0,02 vol% oftewel 200 ppm. Een standaard biologische zwavelverwijdering kan hieraan voldoen. Voor biogas van zowel waterzuiveringsinstallaties, afvalstortplaatsen als mest(co)vergisters zijn diverse projecten gevonden waarbij SCR wordt toegepast. Ook zijn er een aantal projecten gevonden waar een driewegkatalysator voor een biogasmotor wordt toegepast. Diverse leveranciers hebben biogasmotoren met driewegkatalysator, SCR en biogasfilters in hun portfolio. Commerciële beschikbaarheid van deze technieken lijkt dan ook geen probleem te zijn. Daarnaast zijn er enkele regio's waar emissie-eisen worden gesteld die vergelijkbaar zijn met het voorstel van 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. In de SCAQMD-regio in Californië is vanaf 2016 een vergelijkbare eis van kracht als het hier besproken voorstel. Het kennisniveau en de ervaring met rookgasreiniging bij biogas zal in de loop van de tijd verder toenemen.

De aanscherping kan hier leiden tot een additionele emissiereductie van 0,4 kton in 2020. Dit is echter wel sterk afhankelijk van de ontwikkeling van het biogasmotorpark.

Eis welke het Ministerie kan overwegen

Geconcludeerd kan worden dat de eis technisch implementeerbaar is. Overwogen kan worden om op termijn de hier besproken aangescherpte eis in te voeren voor nieuwe biogasmotoren in de vermogensklasse vanaf 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub>. Verder zou voor biogasmotoren kleiner dan deze vermogensgrens een emissie-eis op termijn ingevoerd kunnen worden op het niveau van 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (43 g/GJ; voor omrekening zie ook voetnoot 12 op pag 36). Deze eis zal voor diverse typen motoren, ook met goedkopere reductietechnieken, haalbaar zijn en het aanbod aan motoren kan zodoende gegarandeerd worden. Men zou deze eisen inwerking kunnen laten treden vanaf 2016, zodat dit gelijk loopt met de datum van inwerkingtreding van vergelijkbare eisen in de SCAQMD-regio in Californië. Voor bestaande motoren kan een overgangsregeling worden ontworpen. Tenslotte zou draagvlak kunnen worden gecreëerd door meer informatie beschikbaar te stellen over biogasfilters, gasmotoren met driewegkatalysator en gekoelde rookgasrecirculatie. Dit kan ook middels demonstratieprojecten, waarbij tegelijkertijd methaanemissies van dit type motoren nader kunnen worden geanalyseerd.

# 4

## Aanscherping fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren

### 4.1 Aanscherping fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren

Met de invoering van Bems is een emissie-eis voor totaal stof van  $50 \text{ mg/Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$  in het rookgas van kracht voor dieselmotoren. Deze eis komt overeen met 14,3 g totaal stof/GJ dieselbrandstof. Deze eis is met de invoering van Bems in april 2010 van kracht geworden. Bij de invoering van Bems is overwogen om deze eis aan te scherpen tot 15 mg totaal stof/ $\text{Nm}^3$  (3%  $\text{O}_2$ ; omgerekend is dit 4,3 g/GJ). Gezien het karakter van de stofemissies uit (bio)dieselmotoren, kleiner dan PM10, wordt deze eis in dit rapport gerefereerd als fijnstof-eis. In dit hoofdstuk wordt de haalbaarheid van deze eis met bestaande filtertechnieken, dan wel met aanpassingen aan de motor of brandstofkeuze, geanalyseerd.

Voorstel aanscherping

Opgemerkt kan worden dat er veel publieke informatie beschikbaar is over stofemissies van dieselmotoren en mogelijkheden om via filters, met ingebouwde reductiemogelijkheden, deze stofemissies af te vangen. Deze informatie heeft echter vooral betrekking op vrachtwagenmotoren. De Europese EURO V norm voor nieuwe vrachtwagens die in 2008 is ingegaan, ligt op 2 g  $\text{NO}_x/\text{kWh}$  en 0,02 g fijnstof/kWh. De EURO VI norm, die per 1 januari 2013 geldt, ligt op 0,5 g  $\text{NO}_x/\text{kWh}$  en 0,01 g fijnstof/kWh. Voor fijnstof is dit een aanscherping van circa 2 naar 1 g/GJ (omrekening zie Bijlage A), ofwel een factor 4 scherper dan het hier onderzochte voorstel. Er zijn echter een aantal belangrijke verschillen tussen de zware dieselmotoren in vrachtauto's en stationaire motoren. Stationaire motoren hebben vaak een grotere cilinderinhoud en een lager toerental om zo tot een beter rendement te komen. Daarnaast maken vrachtwagens tegenwoordig gebruik van zeer schone en duurdere diesel, welke nagenoeg zwavelvrij is. Stationaire motoren kunnen, door gebruik te maken van nageschakelde technieken, ook op andere brandstofkwaliteiten worden bedreven en

toch aan de eisen omtrent zwavelemissies voldoen. De best beschikbare technieken voor vrachtwagenmotoren om aan EURO VI normen te voldoen, zijn dus niet noodzakelijk ook beschikbaar voor stationaire dieselmotoren.

## 4.2 Technische analyse stof-eis (bio)dieselmotoren

In deze paragraaf zullen technische mogelijkheden voor emissiereductie van fijnstof uit dieselmotoren worden behandeld.

BIOX vergunning

In **Tabel 14** staan meetgegevens voor enkele biodieselmotoren. De representativiteit van deze gegevens voor het gehele biodieselmotorpark is echter beperkt. Zichtbaar is dat de 1 MW<sub>e</sub> motoren aan de voorgestelde eis voldoen, maar wellicht dat hier naast een SCR ook een oxidatiekatalysator geplaatst is die als roetfilter dienst doet. De vergunningen van BIOX (zonder roetfilter) geven een indicatie voor emissielimieten voor palmolie gestookte (grote) dieselmotoren (Groningen, 2006, 2007). Door de initiatiefnemer van BIOX is gesteld dat binnen vijf jaar de NO<sub>x</sub>-emissie naar 40 g/GJ zou kunnen gaan. Overigens zijn de BIOX-installaties uiteindelijk niet gebouwd. In de stukken rond de vergunningverlening wordt wat fijnstof betreft wel verwezen naar emissies van 15 tot 20 mg/Nm<sup>3</sup> zonder toepassing van filters. Maar dit is, zeer waarschijnlijk, bij 15% zuurstof; bij 3% zuurstof liggen de emissiefactoren een factor 3 hoger.

**Tabel 14:** Emissiegegevens bio-olie motoren

Type installatie	NO <sub>x</sub> [g/GJ]	SO <sub>x</sub> [g/GJ]	Fijnstof/PM <sub>10</sub> [g/GJ]	NMVOS [g/GJ]	NH <sub>3</sub> [g/GJ]
Biodieselmotor orde 1 MW <sub>e</sub>	40-160	1-23	3-4	Circa 4	
BIOX 3 maal 15 MW <sub>e</sub>	max 130	9	13-17	31 (CxHy)	max 4,4 SCR aanne

Volgens de vergunningaanvraag zijn filters (nog) niet mogelijk. In de vergunningaanvraag van BIOX voor motoren in 2006 staat o.a. dat er tot op heden weinig tot geen ervaring is met de toepassing van roetfilters voor dergelijke installaties met biobrandstoffen:

- Gezien het lage as-gehalte in de brandstof wordt een lage stofemissie verwacht. Daarnaast is het de verwachting dat door de inzet van biobrandstoffen minder organisch stof zal worden geëmitteerd. Het effect op fijnstof (PM10) is echter (nog) niet duidelijk.
- De bestaande ervaring met ESP's (elektrostatische filters) is dat deze niet effectief zijn. Dit komt door de combinatie van de relatief lage concentraties en de eigenschappen van het geëmitteerde stof met betrekking tot elektrische geleiding.

- Het gebruik van doekenfilters wordt, gezien de relatief hoge temperaturen van de afgassen (> 200°C), de hoge relatieve vochtigheid (RV=100%) en de abbrasiviteit (ruwheid, schurende werking) van de stofdeeltjes niet mogelijk geacht.
- Tot slot kunnen biobrandstoffen nog sporenelementen bevatten die mogelijk nadelig zijn voor de efficiëntie van de katalysator en filter.

Van een drietal kleine dieselmotoren op plantenzie (zogenaamde PPO) die in WKK voor blokverwarming worden gebruikt, zijn meetgegevens gepubliceerd (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 15** gepresenteerde stofemissies liggen in de range van de meeste grenswaarden voor grote dieselmotoren zoals gegeven in **Figuur 9** (Hellén, 2006).

**Tabel 15:** Diverse emissies van dieselmotoren op plantenzie

	Vermogen [kW <sub>e</sub> ]	CO [g/GJ]	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> [g/GJ]	NO <sub>x</sub> [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

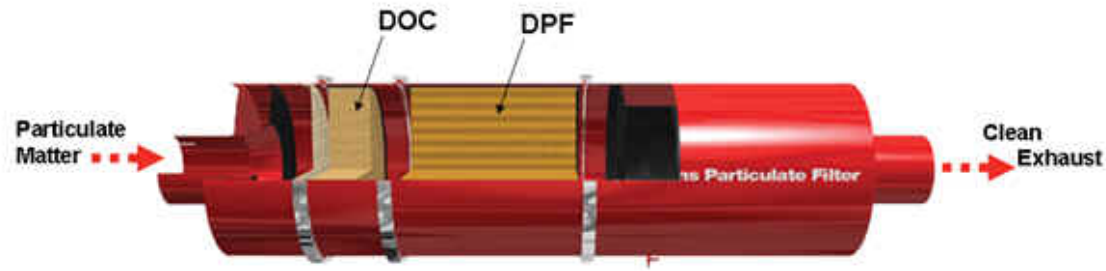
Op pagina 378 en 405 van de IPPC BREF Large Combustion Plants uit 2005 wordt ingegaan op de stofemissie van grote dieselmotoren (IPPC, 2005). Daar wordt geconstateerd dat voor motoren tot 1,3 MW<sub>th</sub> filters beschikbaar zijn en emissies beneden de 20 mg/Nm<sup>3</sup> bij 15% O<sub>2</sub> (17 g/GJ) mogelijk zijn. Deze emissiewaarde ligt nabij de bestaande Bems-eis van 14,3 g/GJ. Voor de grotere motoren zijn filters nog in ontwikkeling. In de genoemde BREF is BAT voor dit type motoren een emissie van < 30 mg/Nm<sup>3</sup> (bij 15% O<sub>2</sub>, omgerekend 25 g/GJ) indien de motor wordt bedreven op diesel en LFO. Voor HFO is BAT < 50 mg/Nm<sup>3</sup> (15 vol-% O<sub>2</sub>, omgerekend 43 g/GJ). Een ondergrens is dus niet gegeven.

BREF document: filters beschikbaar tot 1,3 MW

Verwacht mag worden dat de Amerikaanse Tier 4 stoffeisen de toepassing van stoffilters noodzakelijk maakt (Gsgnet, 2009). Ook door een motorfabrikant wordt de noodzaak van stoffilters aangegeven om aan de Amerikaanse Tier 4 eisen te voldoen (Cummins, 2012). In **Figuur 8** staat een schema van het filter met een Diesel Oxidation Catalyst (DOC) en een Diesel Particulate Filter (DPF) (Cummins, 2012). Volgens de beschrijving zal veel stof, dat op de wanden wordt opgevangen, in het DPF deel door de hoge temperatuur vanzelf worden verbrand. Bij actieve zelf-regeneratie wordt bij te lage temperatuur, een kleine hoeveelheid diesel ingespoten om het stof te verwijderen. Bij gebruik van de vereiste dieselkwaliteit (low-ash diesel) is het voldoende om eens per 5000 uur het filter schoon te maken; dit neemt ongeveer een half uur in beslag. Het filter is bedoeld voor dieselmotoren van 130-447 kW en is begin 2011 al 650.000 keer geleverd. Het filter verwijdert ongeveer 90% van het fijnstof (Cummins, 2012).

Stoffilters voor dieselmotoren

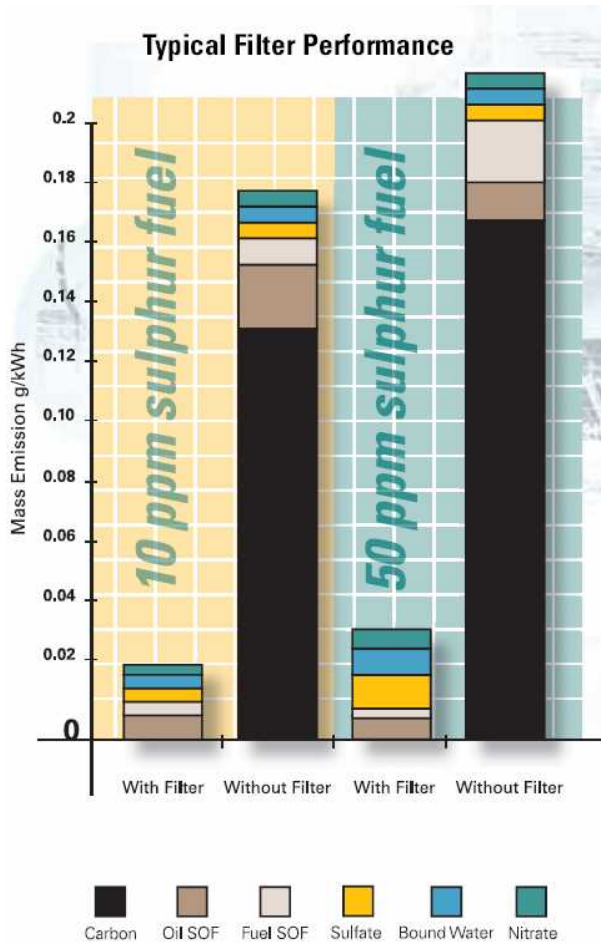
**Figuur 7:** Stoffilter voor dieselmotoren van Cummins



DCL heeft een MINE-X sootfilter op de markt gebracht, welke kan worden toegepast bij stationaire motoren. In een brochure van DCL, zie **Figuur 8**, wordt het filtereffect weergegeven (DCL, 2012a). Een slechtere brandstofkwaliteit met bijvoorbeeld meer zwavel, heeft direct effect op de emissies. De aanscherping tot  $15 \text{ mg/Nm}^3$  komt ongeveer overeen met  $0,04 \text{ g/kWh}$  (zie ook Bijlage A voor aannames) en is dus met dit filter te realiseren. Het filter uit de figuur, wordt geleverd tot  $634 \text{ kW}_{\text{output}}$  en moet elke 1000 uur handmatig schoongemaakt worden (DCL, 2012a).

Daarnaast heeft DCL ook filters gefabriceerd voor grote, stationaire dieselmotoren tot 5 MW. Deze filters worden ingebouwd in een apart gefabriceerd filterhuis en kunnen in principe ook bovenop de omkasting van een dieselmotor worden geplaatst in de buitenlucht. De gerapporteerde emissiereducties zijn  $> 85\%$  PM (gravimetrisch),  $90\%$  CO en  $80\%$  HC (DCL, 2012b). Dit is ook een systeem gebaseerd op de MINE-X sootfilter: een systeem van met een katalysator gecoate cordierite filters. Dit systeem is geschikt voor stationaire dieselmotoren met een relatief continue belasting. Het gebruik van ultra-low sulfur diesel wordt aanbevolen en de bestaande emissies zijn gelijk aan Tier 1 of beter (DCL, 2012c). Het systeem lijkt overigens nog maar op zeer beperkte schaal te zijn verkocht.

**Figuur 8:** Effect MINE-X SOOTFILTER van DCL op de stofuitstoot



Het bedrijf CleanAIR systems is momenteel onderdeel van Caterpillar en levert eveneens diesel particulate filters voor stationaire motoren. Ook voor deze filters gelden er voorwaarden aan de bestaande dieselmotor: tenminste 30% van de operationele tijd is de uitlaatgastemperatuur 300°C of hoger en is de motorbelasting tenminste 40%, de brandstof bevat niet meer dan 15 ppm zwavel (dat is ultra low sulfur diesel) en de onbestreden PM emissie is niet hoger dan 0,2 g/bhp-hr (30 g/GJ, omrekening zie Bijlage A ; dat is ongeveer 105 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> voor diesel). Behaalde emissiereducties zijn dan > 85% PM, 90-95% HC en 90-95% CO; ook het geluid wordt gereduceerd. Er wordt geen melding gemaakt van een maximum in vermogen voor dieselmotoren; blijkens een aantal afgebeelde praktijkvoorbeelden geldt ook hier dat grote dieselmotoren met dit systeem kunnen worden uitgerust (CleanAIR, 2012).

### 4.3 Wetgeving stofemissie

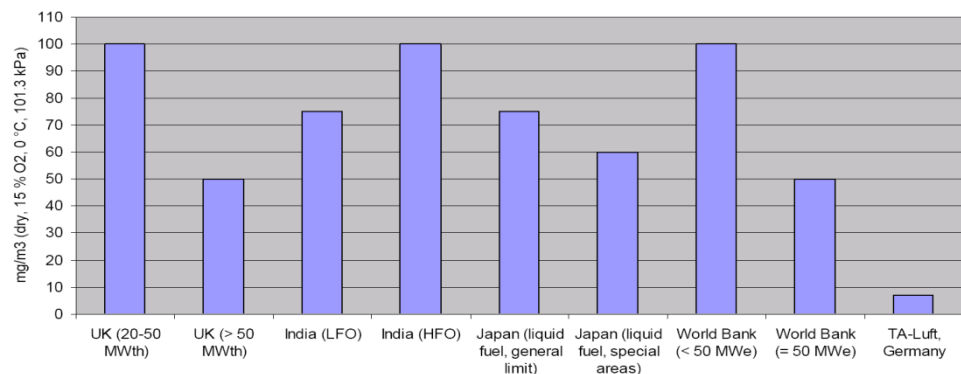
De bestaande Bems-eis van 50 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> komt overeen met eisen die in België en Zwitserland gesteld worden. In Duitsland ligt de fijnstof-eis bij vloeistofbedreven motoren op 20 mg/m<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> in de TA-luft; dat is omgerekend 22,5 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Het voorstel van 15 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, dat in dit

Wetgeving België, Zwitserland en Duitsland

rapport wordt onderzocht, vormt wel een aanscherping ten opzichte van deze eis, maar ligt wel in dezelfde grootte-orde.

In 2006 is een inventarisatie van eisen in diverse landen uitgevoerd (Hellén, 2006). In **Figuur 9** staat overzicht van emissienormen uit verschillende landen. Men dient bij deze figuur rekening te houden met het referentie zuurstofpercentage: voor omrekening naar 3% O<sub>2</sub> is vermenigvuldiging met een factor 3 noodzakelijk. De Bems-eis van 50 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> ligt in deze figuur op het niveau van 15, terwijl het voorstel van 15 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> op het niveau van 5 ligt in de figuur. Alleen de Duitse TA-Luft ligt in de Nederlandse range. In deze bron wordt gewezen op de plannen van de EPA, zie volgende alinea en Tabel 16. Daarnaast is er relevante wetgeving in Californië en in een stedelijke regio in Chili van kracht.

**Figuur 9:** Voorbeeld van internationale PM-emissienormen voor grote zuigermotoren (Hellén, 2006). De huidige Bems-eis ligt bij het overeenkomstige referentie-zuurstofpercentage (15% O<sub>2</sub>) op een niveau van 15 mg/Nm<sup>3</sup> en de voorgestelde eis op het niveau van 5 mg/Nm<sup>3</sup> in deze figuur.



#### Tier 4 eisen in de Verenigde Staten

In 2006 heeft de United States Environmental Protection Agency (EPA) besloten tot nieuwe emissie-eisen, de zogenaamde Tier 4 eisen, voor nonroad dieselmotoren in de landbouw- en bouwsector, zoals tractors en bulldozers. Met de New Source Performance Standards (NSPS) zijn deze emissie-eisen ook van kracht voor stationaire motoren. In **Tabel 16** is een selectie van emissie-eisen voor diverse motorvermogens opgenomen. Deze eisen zijn van kracht voor motoren die niet voor 2007 op de markt zijn gebracht. Onder voorwaarden kunnen generator-sets worden aangemerkt als noodaggregaat, waaraan soepelere eisen worden gesteld (EPA, 2012). In het verleden zijn soepelere eisen van kracht geweest voor zeer grote, stationaire motoren. Door de EPA is dit met de NSPS fors ingeperkt (EPA, 2006). Op grond van meetvoorschriften in de wetsteksten en (Californië, 2012) is geconcludeerd dat alle hierna vermelde vermogens betrekking hebben op de motor-output, meestal het asvermogen. Dieselnet verschaft op toegankelijke wijze enige achtergronden in de regelgeving en daar is gesteld dat de volgende, nieuwe motoren onder de volgende regelgeving vallen: ≤ 3000 hp (dat is ongeveer 2,2 MW) en D < 10 L per cilinder (D = verplaatst volume per cilinder) valt vanaf 2007 onder Tier 4 nonroad, terwijl de categorie > 3000 hp en D < 10 L per cilinder vanaf 2011 onder Tier 4 nonroad valt (zie ook **Tabel 16**). Motoren van D ≥ 10 L per cilinder vallen onder Marine Cat Tiers, zie **Tabel 17**. Met name de categorie 10 ≤ D < 30 L per cilinder moeten in toekomstige bouwjaar aan scherpe stofeisen voldoen. Bestaande motoren vallen onder een overgangsregeling, welke met name gebaseerd is op Tier 1 (Dieselnet, 2012; EPA, 2006, 2011)



**Tabel 16:** EPA: uitlaat emissielimieten voor nonroad, compression-ignition motoren. Deze limieten zijn ook van kracht voor stationaire motoren met D < 10 L per cilinder. De omrekening naar brandstof-input is uitgevoerd om een grootte-orde van de emissiegrenswaarde aan te geven; zie voor omrekening Bijlage A. Gen-sets staat voor generator-sets.

Rated Power <sup>16</sup> [kW]	Year	Tier	NMHC+NO <sub>x</sub>		NMHC		NO <sub>x</sub>		CO		PM	
			[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]	[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]	[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]	[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]	[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]
< 8 kW	2005-2007	2	7,5	833					8	889	0,8	89
	2008+	4	7,5	833					8	889	0,4	44
75 < kW < 130	2007-2011	3	4	444					5	556	0,3	33
	2012-2013	4	4	444					5	556	0,02	2
	2014+	4			0,19	21	0,4	44	5	556	0,02	2
130 < kW < 560	2006-2010	3	4	444					3,5	389	0,2	22
	2011-2013	4	4	444					3,5	389	0,02	2
	2014+	4			0,19	21	0,4	44	3,5	389	0,02	2
560 < kW < 900	2006-2010	2	6,4	711					3,5	389	0,2	22
	2011-2014	4			0,4	44	3,5	389	3,5	389	0,1	11
	2015+	4			0,19	21	3,5 / gen-sets: 0,67	389 / gen-sets: 74			0,04 / gen-sets: 0,03	4 / gen-sets: 3
> 900 kW	2006-2010	2	6,4	711					3,5	389	0,2	22
	2011-2014	4			0,4	44	3,5 / gen-sets: 0,67	389 / gen-sets: 74	3,5	389	0,1	11
	2015+	4			0,19	21	3,5 / gen-sets: 0,67	389 / gen-sets: 74	3,5	389	0,04 / gen-sets: 0,03	4 / gen-sets: 3

<sup>16</sup> Op grond van meetvoorschriften in de wetsteksten en (Californië, 2012) is geconcludeerd dat de vermelde vermogens betrekking hebben op de motor-output, meestal het asvermogen.

**Tabel 17:** EPA: uitlaat emissielimieten voor stationaire, compression-ignition motoren met D ≥ 10 L per cilinder (EPA, 2011; Dieselnet, 2012). De omrekening naar brandstof-input is uitgevoerd om een grootte-orde van de emissiegrenswaarde aan te geven; zie voor omrekening Bijlage A.

Rated Power <sup>16</sup> [kW]	Engine displacement (liters per cilinder)	Model Year	Tier	NMHC+NO <sub>x</sub>		NMHC		NO <sub>x</sub>		PM	
				[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]	[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]	[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]	[g/kWh]	[g/GJ <sub>input</sub> ]
< 2000	10,0 ≤ D < 15,0	2013+	Tier 3	6,2	689					0,14	15,6
2000 ≤ P < 3700	10,0 ≤ D < 15,0	2013+	Tier 3	7,8	867					0,14	15,6
< 2000	15,0 ≤ D < 20,0	2014+	Tier 3	7,0	778					0,34	37,8
< 2000	20,0 ≤ D < 25,0	2014+	Tier 3	9,8	1089					0,27	30,0
< 2000	20,0 ≤ D < 25,0	2014+	Tier 3	11,0	1111					0,27	30,0
600 ≤ P < 1400	All	2017+	Tier 4			0,19	21,1	1,8	200	0,04	4,4
1400 ≤ P < 2000	All	2016+	Tier 4			0,19	21,1	1,8	200	0,04	4,4
2000 ≤ P < 3700	All	2014+	Tier 4			0,19	21,1	1,8	200	0,04	4,4
≥ 3700	< 15,0	2014-2015	Tier 4			0,19	21,1	1,8	200	0,12	13,3
≥ 3700	15,0 ≤ D < 30,0	2014-2015	Tier 4			0,19	21,1	1,8	200	0,25	27,8
≥ 3700	All	2016+	Tier 4			0,19	21,1	1,8	200	0,06	6,7
				CO [g/kWh]	CO [g/GJ <sub>input</sub> ]						
All	D ≥ 30,0	2011+	Tier 2	-	-	-	-	14,4-7,7 <sup>17</sup>	1600-856	-	-
All	D ≥ 30,0	2016+	Tier 3	CO limit 5,0	555	2,0	222	3,4-1,96 <sup>17</sup>	378-218	-	-

<sup>17</sup> Afhankelijk van toerental motor, in lijn met IMO Tier. Hoogste emissie van kracht bij toerental n < 130 en laagste emissie bij n ≥ 2000. 130 ≤ n < 2000 geldt voor Tier 2: 44 x n<sup>-0,23</sup> en voor Tier 3: 9 x n<sup>-0,2</sup> (Dieselnet, 2012).

Om vergelijking met de eisen in **Tabel 16** en **Tabel 17** te vergemakkelijken dienen de Nederlandse eisen te worden omgerekend. Een Bems-eis van 50 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> komt bij 3% O<sub>2</sub> in het rookgas overeen met 14,3 g/GJ dieselbrandstof. De voorgestelde eis van 15 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> komt bij 3% O<sub>2</sub> in het rookgas overeen met 4,3 g/GJ dieselbrandstof. Vergelijkbare, enigszins aangescherpte eisen zijn momenteel van kracht volgens de EPA voor vrijwel alle nieuwe dieselmotoren tot D = 30 L (verplaatst volume per cilinder), zie **Tabel 16** en **Tabel 17**; hoewel niet weergegeven in **Tabel 16**, zijn ook vergelijkbare eisen van kracht voor dieselmotoren vanaf 19 kW. De inwerkingtreding varieert enigszins tussen 2011 en 2014 voor deze categorie en de stofeis varieert tussen 0,02 en 0,03 g/kWh (EPA, 2012). Er wordt vanuit gegaan dat de nieuwste eisen haalbaar zijn met laagzwavelige diesel en reinigingstechnieken aan de uitlaat, zoals stoffilters en katalysatoren voor NO<sub>x</sub>-reductie (EPA 2011; Gsgnet, 2009)<sup>18</sup>.

Naast de hiervoor beschreven eisen die in de VS door EPA worden gesteld, kan op lokaal of regionaal niveau hiervan afgeweken worden, indien de autoriteiten hiertoe aanleiding zien in de gemeten luchtkwaliteit. In Californië is al sinds 2007 een stofeis van 0,02 g/kWh (2 g/GJ<sub>input</sub>) van kracht voor dieselmotoren vanaf 37 kW tot 560 kW; boven deze vermogensgrens geldt deze eis voor generator sets, waarbij geen maximumvermogen is aangegeven. Vanaf 2011-2013 is deze eis versoepeld tot 0,03 g/kWh (3 g/GJ<sub>input</sub>) voor de generator sets vanaf 560 kW en motoren van 37 ≤ kW < 56 (California, 2012). Vermoedelijk is deze versoepeling doorgevoerd om op één lijn te komen met de toekomstige EPA-eisen voor deze vermogens-categorieën, zie ook **Tabel 16**. Eisen worden niet alleen gesteld aan nieuwe motoren, maar ook aan bestaande motoren. Deze moeten worden ondergebracht in diverse programma's. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt naar bouwjaar, vermogen, draaiuren en locatie (bijvoorbeeld nabijheid van scholen). Afhankelijk van de situatie worden er strengere of soepelere emissie-eisen gesteld. Niet duidelijk is of deze diversificatie is bedoeld als overgangstermijn voor bestaande motoren; in een aantal gevallen worden er echter eisen gesteld aan bestaande motoren die gelijk zijn aan de eisen voor nieuwe motoren. Vrijstellingen zijn mogelijk in het bijzonder voor noodvermogen en motoren in de agrarische sector. Hiervoor gelden veelal soepelere emissie-eisen (California, 2012).

Wetgeving in Californië

Dat in steden soms strengere eisen gesteld worden blijkt uit de concept eisen die in Oktober 2006 in Chili zijn gepubliceerd voor de Santiago Metropolitan Region. Hierin wordt een eis voor bestaande en nieuwe motoren genoemd van 45 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> (51 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>) als deze kleiner zijn dan 300 kW en 5 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> (5,6 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>) voor 300 kW en groter (Gsgnet, 2009). De ingangsdatum van de eis zou 2008 zijn; bevestiging van deze ingangsdatum is echter niet gevonden.

Wetgeving in een regio in Chili

In Zwitserland is op basis van de Luftreinhalte-Verordnung (LRV; stand am 15. Juli 2010) een fijnstof-eis van 50 mg/Nm<sup>3</sup> (5% O<sub>2</sub>) voor stationaire motoren van kracht. Omgerekend is dit een eis van 56 mg/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>). Deze eis ligt dichtbij het niveau van de bestaande eis in Bems. In Stadt Zürich is een aanscherping ten opzichte van de LRV van kracht, namelijk 5 mg/Nm<sup>3</sup> (5% O<sub>2</sub>) voor stationaire motoren (Zürich, 2012).

Wetgeving in Zwitserse regio

<sup>18</sup> Over de kosten wordt het volgende geschreven: "The EPA estimated that the rule will affect 81,500 new stationary diesel engines. Emission reductions will occur gradually from 2005 to 2015, with the total nationwide annual costs for the rule to be \$ 57 million in 2015" (Gsgnet, 2009). Dit komt neer op \$ 700 per motor per jaar; dit is echter waarschijnlijk niet representatief voor de kosten van de strengste eisen.

Omgerekend is dat 5,6 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> of 1,6 g/GJ<sub>diesel</sub>. Lokaal geldt hier dus een zeer scherpe eis.

Wetgeving in diverse Europese landen

In **Tabel 18** staan de eisen uit Duitse de TA-luft. Zoals eerder opgemerkt, vormt het hier onderzochte Nederlandse voorstel van 15 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> wel een aanscherping ten opzichte van de Duitse eis, maar het ligt wel in dezelfde orde-grootte. In Italië gelden nog de eisen uit de oude TA-luft van 130 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 5% (146 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>). In 2003 heeft Finland een richtlijn van 50 mg/Nm<sup>3</sup> bij 15% O<sub>2</sub> ingevoerd (150 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>). In Frankrijk geldt een stufeis van 100 mg/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> (112 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>), zoals hiervoor vermeld is in Zwitserland een eis van 50 mg/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> van kracht (VDMA 2011a). De Zwitserse eis is gelijk aan de VLAREM 2 eis uit België die voor nieuwe motoren na 2000 van kracht is. In **Tabel 19** is een overzicht opgenomen van de diverse fijnstof eisen die zijn gevonden.

**Tabel 18:** Duitse eisen aan dieselmotoren (actueel November 2012)

[MW <sub>th</sub> ]	Dust in mg/Nm <sup>3</sup> bij 5% O <sub>2</sub> (bij 3% O <sub>2</sub> )	CO in mg/Nm <sup>3</sup> bij 5% O <sub>2</sub> (bij 3% O <sub>2</sub> )	NO <sub>x</sub> in mg/Nm <sup>3</sup> bij 5% O <sub>2</sub> (bij 3% O <sub>2</sub> )
< 3	20 (22,5)	300 (337)	1000 (1125)
>= 3	20 (22,5)	300 (337)	500 (562)

**Tabel 19:** Overzicht diverse fijnstof eisen uit dit hoofdstuk

	Fijnstof emissie		Opmerkingen
	[g/GJ]	[mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> ]	
Eis in Bems-wetgeving	14,3	50	
Onderzochte, voorgestelde eis	4,3	15	
Duitsland	6,4	22,5	Duitsland TA luft
België / Zwitserland	16	56	Motoren groter dan 10 l
Frankrijk	32	112	
Finland	43	150	
Zwitserland - Stadt Zürich	1,6	5,6	
USA EPA (na 2014/2015)	2 - 4	7 - 14	Motoren, D < 10 L
USA EPA (na 2016)	4,4 - 6,7	15,4 - 23,5	Motoren, D ≥ 10 L
Mondiale eisen diverse landen	48 - 95	168 - 333	UK/India/Japan etc.
Overige gegevens			
Euro V en VI norm vrachtauto's	2 resp 1		
Metingen motoren op biodiesel	25 - 29		Zonder filter
Metingen motoren op biodiesel	1		Met filter

## 4.4 Verwachte kosten en effecten

Het aantal diesel- en biodieselmotoren in Nederland is beperkt. Offshore zijn er circa 19 grotere dieselmotoren geïnstalleerd met een totaal brandstofverbruik circa 1,5 PJ. Dit aantal neemt langzaam af. Onshore is het aantal stationaire dieselmotoren niet bekend, maar wordt geschat op ongeveer 15 motoren; dit aantal kan echter variëren tussen 5 en

100 motoren (Kroon, 2008). Daarnaast zijn er nog een aantal noodstroomaggregaten die van Bems-eisen zijn vrijgesteld.

Het aantal dieselmotoren dat op dierlijk vet draait is ook niet groot. Volgens Unica zijn er op een achttal plaatsen in Nederland dergelijke motoren opgesteld, variërend in vermogen van 600 kW tot 6 MW (Toom, 2009). Deze zijn onder andere geplaatst bij zwembaden in Ermelo (600 kW<sub>e</sub>) en Eindhoven (2,1 MW<sub>e</sub>). Nauwkeurige statistieken zijn niet bekend, maar naar schatting betreft het hier een jaarlijks energieverbruik van 1 tot 2 PJ.

Onder aanname van een totaal brandstofverbruik van 3 PJ en een reductie van 14,3 naar 4,3 g/GJ is de potentiële emissiereductie jaarlijks 30 ton fijnstof. Dit cijfer kan lager zijn, als de emissie van dieselmotoren lager is dan het hier veronderstelde maximum niveau van 14,3 g/GJ. Door een mogelijk toenemende inzet van bio-olie in de toekomst, zou de potentiële emissiereductie hoger kunnen uitvallen. Mede door discussies rondom de duurzaamheid van bio-olie en de vraag naar bio-olie vanuit de transportsector ligt de verwachte brandstofinzet van dit type olie nu wat lager dan een aantal jaren geleden.

In 2007 stelt de EPA dat de kosten van filters bij dieselmotoren bij mobiele werktuigen in de orde van \$ 5,000 tot \$ 10,000 liggen. Hierbij wordt aangegeven dat het zwavelgehalte voor een goede werking wel beneden de 15 ppm moet liggen (ICF, 2007). De huidige diesel voor wegtransport en de meeste biodiesel soorten voldoen aan deze kwaliteitseis. Een andere bron, die ook mobiele motoren behandelt, haalt kosten aan van \$ 8000 tot \$ 16000 voor passieve filters en \$ 18000 tot \$ 40000 voor filters met actieve reductie van opgevangen roet, via bijvoorbeeld elektrische verhitte of brandstof-inspuiting (Schmidt, 2007). De California Air Resource Board meldt de volgende kosten voor vrachtauto's: \$ 8500 voor passieve en \$ 14000 voor actieve filters (California, 2006b). Een andere bron vermeldt de filterkosten voor motoren van 1500 hp (1,1 MW), namelijk \$ 6800 (Thompson, 2003). Op een motorprijs van \$ 150.000 tot \$ 180.000 betekent dit circa 4% meerkosten. Een Nederlands onderzoek naar plaatsing van een Emigreen roetfilter met katalytische werking op een binnenschip met een 127 kW<sub>e</sub> motor vermeldt een prijs van € 6300 (Plage, 2007).

Het gaat hierbij veelal om gegevens voor niet-stationaire dieselmotoren, bedreven op een schone brandstof. Onder aanname van kosten van 15.000 €/MW<sub>e</sub>, een standtijd van 5 jaar, 10% rente, een totaal vermogen van 30 MW<sub>e</sub> en 200 €/jaar/MW<sub>e</sub> aan onderhoud, zijn de jaarlijkse kosten in Nederland ongeveer 120.000 euro. Bij een reductie van 30 ton zijn de reductiekosten dan 4 euro per kg of omgerekend naar elektriciteitsproductie circa 0,1 €/kWh<sub>e</sub>.

Als er veel stof tijdens de verbranding vrijkomt, kan een filter snel dichtslaan. Een mogelijk alternatief is om in dat geval een elektrostatisch (ESP) filter te gebruiken. Deze zijn aanzienlijk duurder en levert daarmee een bovengrens voor de kosten. In **Tabel 20** is een overzicht gegeven van de kosten van ESP's. Deze zijn berekend uit de kosten van filters bij houtketels (Nussbaumer, 2010), waarbij door ECN verondersteld is dat hoeveelheid rookgas van een 1,4 MW<sub>th</sub> houtketel gelijk is aan 1 MW<sub>e</sub> van een dieselmotor. De kosten voor het ESP-filter zijn met circa € 135.000 bij 1 MW<sub>e</sub> bijna een factor 10 duurder dan de hier voornoemde filters. Hierbij moet worden opgemerkt dat

Berekende kosten-effectiviteit

fijnstof van een dieselmotor moeilijk is af te vangen met een ESP. Voor een brandstof met veel asdeeltjes is dit wel een goede optie. Een berekening met ESP's laat zien dat een reductie van 30 ton resulteert in reductiekosten van 20 euro per kg (0,5 €/kWh<sub>e</sub>). Deze laatste kosteneffectiviteit dient als de maximumkosten te worden opgevat. Deze kosteneffectiviteit is niet 10 keer zo hoog als bij andere type filters; dit wordt veroorzaakt door de langere levensduur van een ESP. Indien de kosten en effecten zwaar meewegen bij besluitvorming omtrent aanscherping, verdient het aanbeveling deze nauwkeuriger te inventariseren.

**Tabel 20:** Kosten voor elektrostatische filters omgerekend vanuit houtketels

Motorvermogen [kW <sub>e</sub> ]	Investering in ESP filter [€]	Investering in ESP filter [€/kW <sub>e</sub> ]
350	100.000	280
700	120.000	168
1400	150.000	105

## 4.5 Conclusie fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren

De eis van 15 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> is technisch haalbaar en er zijn installaties uitgerust met commercieel verkrijgbare filters die aan deze voorgestelde eis voldoen. Stoffilters zijn wel geïnstalleerd bij dieselmotoren groter dan 1 MW<sub>e</sub>, maar het wordt weinig toegepast. Voor een goede werking van commercieel verkrijgbare installaties worden ook voorwaarden gesteld aan de brandstofkwaliteit, in het bijzonder aan het gehalte zwavel. In de transportsector worden wel veel roetfilters toegepast, maar daar wordt vrijwel uitsluitend gebruik gemaakt van laagzwavelige diesel. Een fijnstof-eis aan grote dieselmotoren lijkt daarmee vooralsnog alleen haalbaar door ook brandstofkwaliteits-eisen aan te scherpen tot het niveau van laagzwavelige diesel. Mogelijk dat in de toekomst filters beschikbaar komen die ook met andere brandstofkwaliteiten een goede werking laten zien. Ontwikkelingen op de Amerikaanse filtermarkt zijn bijzonder relevant in deze context.

De huidige situatie laat zien dat deze aangescherpte eis resulteert in een fijnstof-reductie van circa 30 ton tegen 4 tot 20 €/kg. Zeer waarschijnlijk is de eis van 15 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> eis niet haalbaar zonder roetfilter. In veel landen gelden nagenoeg vergelijkbare dan wel soepelere eisen dan de bestaande Bems-eis. Slechts in enkele landen zijn eisen van kracht die vergelijkbaar of scherper zijn dan het hier beschreven voorstel. Eisen in Duitsland en de VS zijn in deze context met name relevant.

Eis welke het Ministerie kan overwegen

Overwogen kan worden om de voorgestelde fijnstof eis te implementeren voor nieuwe motoren en de inwerkingstrededatum zoveel mogelijk gelijk te laten lopen met invoering van de eisen in VS. Op deze wijze is de beschikbaarheid van motoren, en eventuele nageschakelde technieken, gegarandeerd. De EPA laat de Tier 4 fijnstof-eisen, die vergelijkbaar zijn met het hier besproken voorstel, in de periode 2014-2017 in werking treden. De zeer kleine vermogenscategorie zou, gelijk aan de eisen in de EPA,

onder een soepeler emissie-eis kunnen vallen. Voor bestaande motoren zou een overgangsregeling ontworpen kunnen worden, naar het voorbeeld in de VS.

# 5

## Scherpere NO<sub>x</sub>-eis bij (bio)dieselmotoren

### 5.1 Aanscherping NO<sub>x</sub>-eis bij (bio)dieselmotoren

Voorstel aanscherping

Sinds de inwerkingtreding van Bems is een NO<sub>x</sub> emissie eis van 450 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> van kracht voor stationaire dieselmotoren. Er is enige tijd sprake geweest van een voorstel om de emissie-eis van 450 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> naar 140 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (van circa 129 g/GJ<sub>diesel</sub> naar 40 g/GJ<sub>diesel</sub>) te verlagen. De laatstgenoemde eis is van vergelijkbaar niveau als dat aan vrachtwagenmotoren gesteld gaat worden met de EURO VI normen. De Europese EURO V norm voor nieuwe vrachtwagens, die in 2008 is ingegaan, is 2 g NO<sub>x</sub>/kWh en 0,02 g fijnstof/kWh. De EURO VI norm, die vanaf 1 januari 2013 van kracht is, is 0,4 g NO<sub>x</sub>/kWh en 0,01 g fijnstof/kWh. Voor NO<sub>x</sub> is dit een aanscherping van circa 222 naar 44,5 g/GJ (zie Bijlage A voor omrekening). Deze aanscherping maakt de toepassing van SCR noodzakelijk. De hier voorgestelde aanscherping en de EURO VI eis liggen redelijk dicht bij elkaar.

De grootte van de installatie vormt wel een belangrijk verschil bij vergelijking van deze eisen: het vermogen van vrachtwagenmotoren is maximaal ongeveer 400 kW<sub>output</sub>. Deze motoren zijn ook ontworpen op een lage NO<sub>x</sub>-emissie en worden vrijwel zonder uitzondering bedreven op laagzwavelige diesel. Dit zijn kenmerken die niet noodzakelijk op grote motoren van toepassing zijn.

### 5.2 Technische analyse NO<sub>x</sub>-eis (bio)dieselmotoren

Bij kleine dieselmotoren kan met een SCR met een hoog rendement aan de voorgestelde eis worden voldaan. Bij toenemende vermogensgrootte van de motoren is



SCR met een zeer hoog verwijderingsrendement nodig, wat kan toenemen tot een verwijderingsrendement van 98%. Bij scheepsmotoren wordt er gewerkt aan maatregelen om de NO<sub>x</sub>-emissie terug te dringen. Als deze ook beschikbaar komen voor stationaire dieselmotoren kan met een gewone SCR met 90-95% verwijderingsrendement worden volstaan.

Om aan de voorgestelde Bems-eis te voldoen is SCR, of een andere techniek om uitlaatgassen te reinigen, noodzakelijk. SCR is beschikbaar voor kleine en grote stationaire dieselmotoren en voor voertuigen, van vrachtauto's tot zeeschepen. Bij vrachtauto's is er onder druk van steeds strengere emissie-eisen veel gedaan om de NO<sub>x</sub>-emissies te reduceren. Dankzij motoraanpassingen is het voldoende om een SCR te plaatsen met een conventioneel verwijderingsrendement; zodoende kan een lage NO<sub>x</sub>-emissie bereikt worden.

SCR ontwikkeld, maar ook motoraanpassingen nodig

Een kenmerk van stationaire motoren (en scheepsmotoren) is de veelal grote cilinderinhoud, een hoger rendement en een lager toerental met dito langere verblijftijd. Een langere verblijftijd betekent dat de brandstof en verbrandingsproducten langer in de cilinder verblijven en er dus meer tijd is om NO<sub>x</sub> te vormen. Een oude vrachtwagenmotor, zonder de verbeteringen van de afgelopen decennia, heeft een NO<sub>x</sub>-emissies van 1200 tot 1400 g NO<sub>x</sub>/GJ brandstof. Bij een grote scheepsmotor ligt deze rond de 2000 g/GJ. Het zijn de vaak de 'scheepsmotoren' die voor de grotere biodiesel-WKK-installaties worden gebruikt. Om een lage emissie te bereiken moeten er dus de nodige motoraanpassingen worden ontwikkeld. Omdat het niveau van een moderne vrachtwagenmotor wellicht niet bereikt kan worden, zal waarschijnlijk een SCR met een hoog verwijderingsrendement moeten worden geplaatst. Er kan overigens veelvuldig gebruik worden gemaakt van de kennisontwikkeling van verbrandingsprincipes bij vrachtwagenmotoren; kennis welke in toenemende mate ook bij grotere motoren wordt ingezet.

Indien een kleine dieselmotor gebruikt wordt (< 1 MW<sub>e</sub>) met een hoog toerental en een techniek die direct van vrachtauto's is afgeleid, is de eis van 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> haalbaar. Dit vergt alleen een goed werkende SCR met een hoog rendement. Het is denkbaar dat er al (bio)diesel motoren zijn die deze emissie bereiken. Daarmee is de eis niet per definitie eenvoudig haalbaar voor tal van andere stationaire motoren.

Bij de motoren met grote cilinder diameters en lage toerentallen ligt de NO<sub>x</sub>-emissie hoog. Door afstelling kan hier enige verbetering in worden aangebracht. Mede door de eisen aan zeeschepen wordt er door motorfabrikanten onderzoek uitgevoerd om de NO<sub>x</sub>-emissie te verminderen. Een voorbeeld hiervan is de combinatie van waterinjectie, bijvoorbeeld 50 tot 70% ten opzichte van de brandstoftoevoer, en rookgasrecirculatie (EGR). Volgens Wärtsilä kan de emissie hiermee teruggebracht worden van ongeveer 16 g/kWh naar 5 g/kWh. Het brandstofverbruik stijgt hiermee met 2 tot 3% (Brown, 2007). Een emissie van 5 g/kWh komt ongeveer overeen met 555 g NO<sub>x</sub>/GJ (omrekening zie Bijlage A) en ligt daarmee nog beduidend boven de voorgestelde norm. Indien het daarna nog mogelijk is om SCR toe te passen met 85 tot 95% NO<sub>x</sub>-reductie (Hellén, 2007), komt het doel van 40 g/GJ goed in zicht. Deze combinatie wordt door Wärtsilä echter niet als mogelijkheid genoemd.

Ook MAN uit Kopenhagen noemt de opties van waterinjectie en EGR. Omdat in 2016 nieuwe normen voor schepen (Tier III)<sup>19</sup> van kracht zullen zijn, worden diverse technieken, zoals EGR, verder ontwikkeld om deze spoedig op de markt te brengen (Kjemtrup, 2009). MAN verwacht Tier III te kunnen halen zonder SCR. Een SCR met 90% verwijderingsrendement, wat vrij standaard is, kan daarna het hier onderzochte niveau van 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> bereiken.

Motoraanpassingen bij enkele fabrikanten

Enkele motorfabrikanten hebben relatief recente informatie naar buiten gebracht. Blijkens een bericht omtrent een demonstratiemotor, heeft MAN tot op heden nog niet succesvol een motor op de markt gebracht, die aan Tier III voldoet met alleen motoraanpassingen. De tweetakt MAN B&W 6546MC-C8 met maximaal 7 MW<sub>output</sub> behaalt wel Tier III, maar met toepassing van urea-SCR technologie (MAN, 2012). Wärtsilä maakt in een brochure melding van ontwikkeling van SCR als zijnde meest kosteneffectief voor een aantal scheepsmotorseries, waarbij het vermogen vanaf circa 6 MW<sub>output</sub> voor deze series ligt. In de brochure wordt vermeld dat exhaust gas recirculation problematisch kan zijn bij het gebruik van heavy fuel oil door de zwavelcomponenten. Daarnaast kunnen de veelgebruikte tweetaktmotoren voor grote vermogens niet zonder meer gebruik maken van low NO<sub>x</sub> tuning voor viertaktmotoren. Ook is het gebruik van direct water injection (DWI) nog niet bewezen om het Tier III niveau bij scheepsmotoren te behalen. Ook voor SCR kan heavy fuel oil een problematische brandstof betekenen en wordt de operationele temperatuur-window ingeperkt; daarbij geldt dat een te hoge temperatuur resulteert in oxidatie van de reductant, terwijl te lage temperatuur resulteert in condensatie van bijvoorbeeld ammoniumsulfaten en verstopping van de katalysator kan veroorzaken (Wärtsilä, 2012). Caterpillar heeft een 3500C motorserie ontwikkeld, welke wel aan Tier III voldoet zonder nageschakelde technieken. Deze motorserie wordt aangeboden van 1,341 tot 3,386 bhp, ofwel 1-2,5 MW<sub>output</sub> (Caterpillar, 2012).

Het beeld wat uit deze praktijkvoorbeelden ontstaat, is dat voor de zeer grote vermogenscategorie, ongeveer vanaf 5 MW<sub>output</sub>, SCR de standaard techniek blijkt om aan Tier III te voldoen. Er is daarmee geen ruimte om SCR technologie als sluitstuk te zien om aan scherpe eisen te voldoen. Naar verwachting zal door motoraanpassingen in combinatie met SCR technologie weliswaar scherper dan Tier III gerealiseerd kunnen worden, maar dat lijkt momenteel zeker nog niet commercieel beschikbaar te zijn noch op redelijk korte termijn beschikbaar te komen.

Met behulp van SCR technologie kunnen verwijderingsrendementen van 85% tot 95% behaald worden (MAN, 2003). MAN geeft een reeks voorbeelden van SCR met een reductie in de range van 93% tot 95% bij dieselmotoren op zeeschepen. Er is zelfs een voorbeeld van SCR bij een stationaire motor, geplaatst in 1993, met 98% reductie (12K80MC-GI-S in Chiba, Japan). Deze motor van 40 MW heeft een netto rendement van 42,6% en voldoet aan de lokale norm van 13 mg/Nm<sup>3</sup> bij een niet nader genoemd zuurstofpercentage. De motor draait op diesel met een laag zwavelgehalte als

<sup>19</sup> De Tier I eis was 17 g NO<sub>x</sub>/kWh. Sinds 2011 is de Tier II eis van kracht, namelijk 14,4 g NO<sub>x</sub>/kWh. In 2016 volgt de Tier III eis van 3,4 g NO<sub>x</sub>/kWh die alleen geldt in de zogenaamde ECA gebieden: Emission Controlled Areas, waaronder de Noordzee en de Oostzee. De 3,4 g/kWh is circa 400 g/GJ brandstof of circa 1400 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, zie Bijlage A en een aangenomen motorrendement van 42-43%. Deze eis geldt voor nieuwe schepen en motoren met minder dan 130 toeren per minuut. Voor motoren met een hoger toerental wordt de eis evenredig aangescherpt tot 1,96 g/kWh (bij een toerental van 2000 toeren per minuut of meer).

startbrandstof, maar de hoofdbbrandstof is daarna LNG (MAN 2009, 2001). Voor een motor die alleen aan Tier II voldoet, is een SCR rendement van 98% nodig om het niveau van 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> te bereiken.

## 5.3 Wetgeving NO<sub>x</sub>-emissie (bio)dieselmotoren

In Paragraaf 4.3 wordt ingegaan op de emissie-eisen voor dieselmotoren. Uit **Tabel 16** en **Tabel 17** en (EPA, 2012) blijken de Tier 4 eisen in de VS, ingaande in 2014, voor motoren tussen 56 en 560 kW op het niveau van ongeveer 44 g/GJ te liggen. Dit is zeer goed vergelijkbaar met de hier voorgestelde eis. Voor motoren groter dan 560 kW heeft de EPA een dergelijke eis niet geformuleerd; feitelijk worden eisen soepeler gesteld naarmate het vermogen toeneemt. Hiermee wordt ook zichtbaar gemaakt dat scherpe NO<sub>x</sub>-eisen moeilijker haalbaar zijn voor grotere vermogenscategorieën.

Ook de International Maritime Organisation (IMO) heeft NO<sub>x</sub>-eisen voor motoren gesteld, welke overeenkomstig is met de onderste twee rijen in **Tabel 17**. Tier 2 is wereldwijd geldig, terwijl Tier 3 van kracht is voor de Emission Controlled Areas (ECA). Overigens wordt er geen melding gemaakt van een beperking op basis van cilinderinhoud in tegenstelling tot de EPA eisen (IMO, 2012).

IMO-eisen in ECA-gebieden

In de South Coast Air Quality Management District van Californië is inmiddels Rule 1110.2 van kracht waarin eisen aan gas- en vloeistofmotoren worden gesteld (SCAQMD, 2012). Uit de tekst blijkt dat er geen onderscheid gemaakt wordt tussen stationaire diesel- en aardgasmotoren. De eisen uit **Tabel 3** zouden dan ook voor dieselmotoren gelden. Een eis van 11 ppm NO<sub>x</sub> bij 15% O<sub>2</sub> is omgerekend naar diesel ongeveer 20 g/GJ. Het lijkt er wel op dat het beleid er in SCAQMD-regio op gericht is om waar mogelijk geen motoren, maar elektrische aandrijving te gebruiken. De vraag is dan ook of de haalbaarheid van de eisen voor dieselmotoren een rol heeft gespeeld bij het formuleren van deze eisen. Voor zover direct uit de tekst is af te leiden, gelden de eisen voor bestaande installaties en nieuwe installaties die niet bedoeld zijn voor elektriciteitsopwekking. Voor nieuwe installaties bedoeld voor elektriciteitsopwekking staan de eisen in **Tabel 4**. De eisen zijn gekoppeld aan de productie van elektriciteit, maar bij WKK installaties mag ook de warmteproductie worden meegeteld. De eisen zijn in de tabel omgerekend bij een verondersteld WKK rendement van 90% (thermisch en elektrisch totaalrendement). Noodaggregaten zijn van deze normen vrijgesteld.

Wetgeving in een regio in Californië

In de Duitse TA Luft worden eisen gesteld van 1000 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> en 500 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> voor installaties kleiner respectievelijk groter dan 3 MW<sub>th</sub> (zie ook **Tabel 18**). Omgerekend betekenen deze eisen 1125 respectievelijk 562 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. In Zwitserland geldt een eis van 250 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub>, wat overeenkomt met 281 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, conform LRV stand am 15. Juli 2010. Lokaal gelden er scherpere normen in Zwitserland: 50 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> in Zürich (Zürich, 2012), terwijl in Kanton Basel een eis van 110 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> geldt (Basel, 2012); omgerekend betekenen deze eisen 56 respectievelijk 124 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Een overzicht van diverse emissie-eisen is opgenomen in **Tabel 21**.

Wetgeving in Duitsland, Zwitserland en Zwitserse regio's

Zoals beschreven in paragraaf 2.3 wordt er in Noorwegen een accijns geheven op NO<sub>x</sub>. De hier beschreven installaties vallen daar ook onder.

**Tabel 21:** Overzicht diverse NO<sub>x</sub> emissie-eisen voor dieselmotoren

	NO <sub>x</sub> -emissie [mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> ]	Opmerkingen
Eis in Bems-wetgeving	450	Overgezet in Activiteitenbesluit
Onderzochte, voorgestelde eis	140	
Duitsland	1125 / 562	kleiner / groter dan 3 MW <sub>th</sub>
Zwitserland	281	
Zwitserland lokaal	56 / 124	Stadt Zürich / Kanton Basel
USA EPA; D < 10 L (na 2014/2015)	154 / 1361 / 259	< 560 kW <sub>output</sub> / > 560 kW <sub>output</sub> / Generatorsets
USA EPA; D ≥ 10 L (na 2016)	700	Tier 4 eisen
IMO Tier 3 na 2016	763 - 1423	Zeeschepen

## 5.4 Verwachte kosten en effecten

Uitgaande van 3 PJ brandstofverbruik en een reductie van 130 naar 40 g/GJ is de mogelijke reductie 330 ton NO<sub>x</sub> (0,3 kton NO<sub>x</sub>). Door (Kroon, 2008) is er vanuit gegaan dat een hoger NO<sub>x</sub>-verwijderingsgraad bereikt kan worden door een groter katalysator volume te gebruiken. Mede wegens de relatief hoge NO<sub>x</sub>-reductie en omdat het eigenlijk om een uitbreiding van de reeds aanwezige SCR-installatie gaat, zijn de kosten beperkt. De kosteneffectiviteit is iets hoger dan 1 €/kg NO<sub>x</sub>-emissie vermeden. Voor de eigenaar van de installatie stijgen de kosten met circa 5% (circa 0,3 €ct/kWh<sub>e</sub>). Indien de kosten en effecten zwaar meewegen bij besluitvorming omtrent aanscherping, verdient het aanbeveling deze nauwkeuriger te inventariseren.

## 5.5 Conclusie NO<sub>x</sub>-eis voor (bio)dieselmotoren

De aangescherpte eis van 140 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (40 g/GJ) is technisch niet zo gemakkelijk haalbaar. Indien de emissie zonder SCR al redelijk laag is, zoals bij nieuwe, kleinere motoren met een hoog toerental het geval is, kan met een goede SCR aan de eis voldaan worden. Bij de zeer grote motoren, die vergelijkbaar zijn met wat op zeeschepen gebruikt wordt, ligt de NO<sub>x</sub>-emissie, door de grote cilinderdiameter, zodanig hoog dat een SCR verwijderingsrendement van 97-98% nodig is. Dit vergt bijvoorbeeld een groot katalysator volume en een nageplaatste oxidatiekatalysator om een overschot aan reductiemiddel af te breken. Omdat er ook nu al een SCR nodig is, zijn de meerkosten beperkt. Er zijn hier wel enkele voorbeelden van bekend. De Amerikaanse EPA stelt vanaf 2012 eisen aan dieselmotoren van 75 tot 560 kW die richting het Nederlandse voorstel van 40 g/GJ gaan.

Er wordt internationaal onderzoek gedaan om, met behulp van rookgasrecycling en waterinjectie, de NO<sub>x</sub>-emissie van zeer grote motoren terug te dringen. Er wordt naar gestreefd om dit, voorzien van de nodige praktijkervaring, in 2014 commercieel op de markt te zetten. Bij nieuwe motoren zou, mits deze technologie op de markt verkrijgbaar is, met een gewone SCR aan de gestelde eis voldaan kunnen worden.

Overwogen kan worden om een aangescherpte NO<sub>x</sub> eis te implementeren voor nieuwe motoren, maar niet op het niveau van de voorgestelde 140 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (40 g/GJ). Hoewel voor een deel van de vermogens een gelijkwaardige eis is geformuleerd onder Tier 4 in de VS, vallen de grotere vermogenscategorieën onder een soepelere eis, namelijk 74 g/GJ. Omgerekend zou een nagenoeg gelijke emissie-eis op een niveau van 250 mg NO<sub>x</sub> /Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> kunnen liggen. De zeer grote motoren vallen onder Tier 4 onder soepelere eisen dan voornoemd. Vanwege eenduidigheid in de regelgeving en het creëren van een gelijk speelveld voor de diverse vermogenscategorieën zou aan alle overige vermogenscategorieën een gelijke eis gesteld kunnen worden, zowel voor categorie kleiner dan 560 kW als voor motoren met een cilinderinhoud van 10 liter of meer.

Men zou de inwerkingstrededatum zoveel mogelijk gelijk kunnen laten lopen met invoering van de eisen in VS. Op deze wijze is de beschikbaarheid van motoren, en eventuele nageschakelde technieken, gegarandeerd. De EPA laat de Tier 4 NO<sub>x</sub>-eisen, die vergelijkbaar zijn met het hier besproken voorstel, in de periode 2014-2017 in werking treden. De zeer kleine vermogenscategorie zou, gelijk aan de eisen in de EPA, onder een soepeler emissie-eis kunnen vallen. Voor bestaande motoren zou een overgangsregeling ontworpen kunnen worden.

Tenslotte zou meer draagvlak gecreëerd kunnen worden voor een dergelijke eis door in samenwerking met leveranciers een bestaande biodieselmotor (> 1 MW<sub>e</sub>) aan te passen zodat deze aan de voorgestelde eis voldoet.

Eis welke het Ministerie kan overwegen

# 6

## Aanscherping methaan-eis bij gasmotoren

### 6.1 De methaan-eis bij gasmotoren

#### Voorstel aanscherping

Het voorstel beschreven in dit hoofdstuk betreft een aanscherping van de eis aan emissie van (onverbrande) koolwaterstoffen bij aardgasverbranding in gasmotoren van 1 MW<sub>e</sub>/2,5 MW<sub>th</sub> of groter. De bestaande eis is 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> en de overwogen aanscherping ligt op het niveau van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Deze laatste waarde wordt momenteel voorgeschreven bij aanvraag voor een groen label kas certificaat (SMK, 2012). De eis is uitgedrukt in gewicht aan koolstof en heeft betrekking op alle koolwaterstoffen in het rookgas. De bestaande eis is sinds 1 april 2010, de datum van inwerkingtreding van Bems, van kracht voor nieuwe aardgasmotoren. Omdat het grootste deel van deze koolstof bij aardgasverbranding zich bevindt in de vorm van methaan, wordt deze eis de 'methaan-eis' genoemd. Onverbrand aardgas in het rookgas betekent feitelijk een efficiëntieverlies bij de motor en was bij voorkeur wel verbrand tijdens het motorbedrijf. Het wordt ook wel 'methaanslip' genoemd.

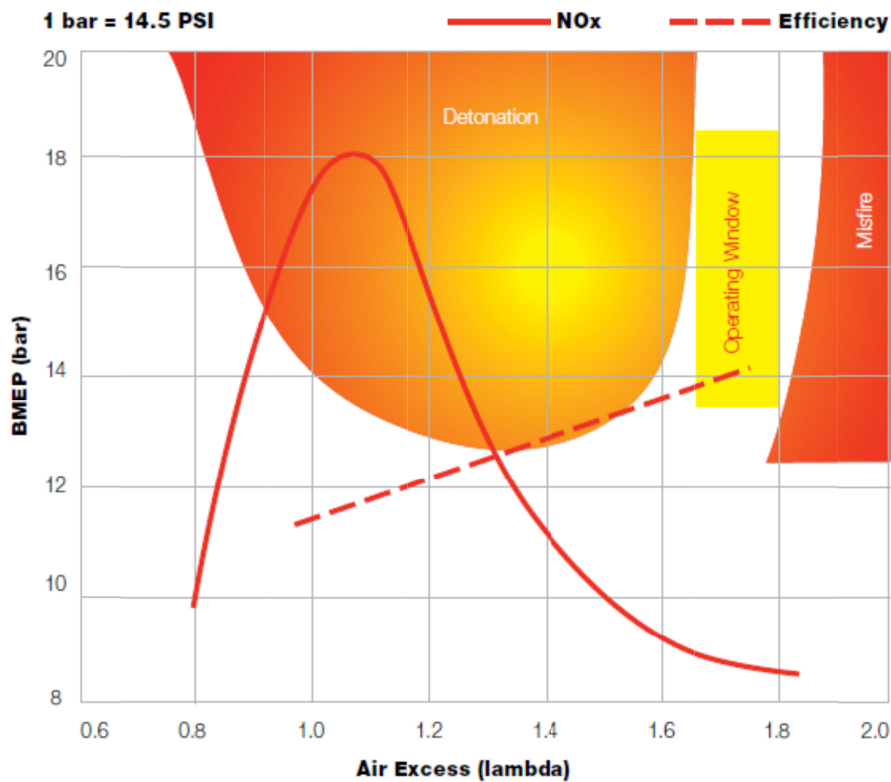
#### Technische oorzaak van methaanemissies

De methaanslip wordt veroorzaakt doordat het brandstofmengsel in de cilinder gedeeltelijk, en in extreme gevallen zelfs geheel, niet deelneemt aan de verbranding. Dit wordt bepaald door zowel het motorontwerp, in het bijzonder de spleetvolumes in de cilinder, als de afstelling, zoals de luchtvermaat. Uit het onderzoek van (KEMA, 2011) blijkt dat de methaanemissie uit gasmotoren in hoofdzaak wordt bepaald door spleetvolumes in de cilinder en de verbrandingscondities in de cilinder. Hoewel veel ontwikkelingen zijn gericht op het minimaliseren van delen in de cilinder die niet deelnemen aan de verbranding, zullen spleetvolumes in de cilinder altijd technisch noodzakelijk blijven voor het stabiel bedrijven van een motor (Van Dijk, 2004).

De toepassing van lean-burn, ofwel een motorbedrijf bij zeer hoge luchtvermaat, zorgt er mede voor dat de hoeveelheid onverbrande koolwaterstoffen hoog blijft, ondanks motortechische ontwikkelingen (Van Dijk, 2004; KEMA, 2011). Het vlamfront kan bij zeer hoge luchtvermaat worden gedoofd nabij de cilinderwand en de spleetvolumes,

waardoor delen van de brandstof onverbrand de cilinder verlaten (KEMA, 2011). De oorzaak van dit effect wordt geïllustreerd in **Figuur 10** (Cummins, 2007b). In deze figuur is de luchtvermaat uitgedrukt in lambda, welke direct gerelateerd is aan het volumepercentage zuurstof in het rookgas (zie onder meer Paragraaf 2.2 en **Figuur 1** voor aanvullende informatie over het effect en het belang van luchtvermaat). Door de motor te bedienen bij een hogere, gemiddelde effectieve druk (BMEP: brake mean effective pressure), wordt het rendement verhoogd. Tegelijkertijd is het stabiel bedienen van de motor met betrekking tot de luchtvermaat kritischer: een zeer hoge luchtvermaat verhoogt de kans dat een motor last heeft van 'misfiring', wat de koolwaterstofemissies zal verhogen (Cummins, 2007b).

**Figuur 10:** Detonatiegrafiek volgens Cummins (Cummins, 2007b)



### Methaanslip bij WKK-gasmotoren vernietigt aanzienlijk deel van de CO<sub>2</sub>-reductie

De inzet van gasmotoren voor WKK-toepassingen bespaart ten opzichte van gescheiden opwekking van warmte en kracht, energie en emissies van het broeikasgas CO<sub>2</sub>. De methaanslip resulteert in de uitstoot van het broeikasgas methaan, waardoor een aanzienlijk deel van de CO<sub>2</sub>-reductie weer wordt vernietigd.

Hier is een rekenvoorbeeld uitgewerkt, uitgaande van WKK-karakteristieken voor de SDE (Hers & Wetzels, 2009):

- Case grote gasmotor: 41%<sub>electrical efficiency</sub>, 49%<sub>thermal efficiency</sub>
- Case kleine gasmotor: 34%<sub>electrical efficiency</sub>, 52%<sub>thermal efficiency</sub>
- Referentie 2006-2011 gescheiden opwekking elektriciteit, STEG, bij gebruiker: 50,5% (Wetzels et al, 2011)
- Referentie gescheiden opwekking warmte: 90% (Wetzels et al, 2011)

Onder deze rekenvoorwaarden levert een grote gasmotor een besparing op in energiegebruik en CO<sub>2</sub>-emissies van 26% en voor een kleine motor is dat 20%. De bestaande en voorgestelde methaan-eis, 1500 respectievelijk 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, zijn omgerekend 420 respectievelijk 336 g C/GJ<sub>aardgas</sub>. Onder de aanname dat de gasmotoren emitteren op het niveau van de bestaande en voorgestelde methaan-eis, dat 90% van de koolwaterstof-emissies bestaat uit methaan en een GWP van 21 CO<sub>2</sub>-eq voor methaan, is berekend dat 10,6 respectievelijk 8,6 kg CO<sub>2</sub>-eq per GJ aardgas wordt geëmitteerd; hierbij moet ook een gewichtscorrectie voor koolstof naar methaan worden toegepast. Hierdoor daalt de netto CO<sub>2</sub>-reductie; de resultaten staan in tabelvorm hieronder.

	CO <sub>2</sub> reductie zonder methaanslip	CO <sub>2</sub> reductie bij CH <sub>4</sub> emissie van 1200 mg C/Nm <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> reductie bij CH <sub>4</sub> emissie van 1500 mg C/Nm <sup>3</sup>
Case grote gasmotor	26%	15%	12%
Case kleine gasmotor	20%	8%	5%

## 6.2 Metingen aan methaanemissies

De emissie van methaan heeft een relatie met de grootte van de motor (Dueck et al, 2008). Deze relatie is zeker niet lineair: er blijken grote verschillen te zijn tussen de diverse fabrikanten (KEMA, 2007, 2009 en 2011). Dit duidt erop dat ontwerp, technische parameters en motorafstellingen een belangrijke rol spelen. Door een niet al te grote motor te kiezen dan wel door een bepaald motormerk te kiezen, kunnen de methaanemissies gereduceerd worden. Daarnaast zullen nog enkele andere mogelijkheden worden behandeld in Paragraaf 6.3.



Door KEMA zijn diverse meetcampagnes aan aardgasmotoren uitgevoerd in 2007, 2009 en 2011 (KEMA, 2007, 2009 en 2011). De meetcampagne in 2007 is uitgevoerd aan tien gasmotoren in de vermogensklasse 1,5 MW<sub>e</sub> tot 5 MW<sub>e</sub>. Van deze tien gasmotoren zouden er twee niet hebben voldaan aan de eis van 1500 mg C/Nm<sup>3</sup>; één van deze ging zelfs ruim boven 2000 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>). Vijf motoren (inclusief de voornoemde twee) zouden niet hebben voldaan aan de voorgestelde eis. Slechts twee motoren emitterden minder dan 1000 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (KEMA, 2007).

Meetcampagnes in Nederland:  
2007 door KEMA

In het voorjaar 2009 is een dertigtal gasmotoren doorgemeten (KEMA, 2009). Van deze gasmotoren bleken er 5 meer te emitteren dan 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>), geconcentreerd bij twee fabrikanten, en 12 meer te emitteren dan 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>), verspreid over 5 verschillende fabrikanten. Opvallend en zorgelijk is dat een drietal motoren, die in 2007 ook door KEMA zijn gemeten (KEMA, 2007), nu 400 tot 600 mg/Nm<sup>3</sup> hoger uitkomen en fors boven de 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> emitteren bij 3% O<sub>2</sub>. Tien motoren emitterden minder dan 1000 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (KEMA, 2009).

Meetcampagnes in Nederland:  
2009 door KEMA

In twee meetcampagnes, namelijk de winter en het voorjaar van 2011, zijn door KEMA opnieuw tien motoren doorgemeten; er zijn dus twintig metingen verzameld (KEMA, 2011). Van de twintig metingen bleken er 4 meer te emitteren dan 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>), waarbij 1 motor tot 2x dit niveau emitteert. Er bleken 8 metingen, inclusief de voornoemde, meer te emitteren dan het niveau van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>). Hierbij zaten drie motoren die bij beide metingen boven dit niveau emitterden. Vier metingen lieten een emissie zien van minder dan 1000 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, waarvan twee metingen bij dezelfde motor lagen. Sommige motoren namen deel aan de meetcampagnes van 2007 en 2009. Het is opvallend dat een aantal motoren, hetzij ten opzichte van deze eerdere meetcampagnes, hetzij ten opzichte van twee metingen in 2011 zelf, een sterk fluctuerende methaanemissie laten zien. Oorzaken hiervan ten opzichte van de meetcampagnes van 2007 en 2009 zijn onbekend. Binnen de 2011-meetcampagnes werd in twee gevallen, de WKK-motoren 5 en 6, een relatief groot verschil in methaanemissie waargenomen, waarbij tegelijkertijd ook een verschil in luchtvermaat, de lambda, is waargenomen. Voor deze twee motoren is ook enige variatie in ontstekingstijdstip waargenomen tussen de twee verschillende meetcampagnes; volgens (Van Dijk, 2004) is het effect hiervan op de methaanemissie echter beperkt. Opvallend is dat een lagere luchtvermaat in deze gevallen ook resulteert in een meetbaar lagere methaanemissie en een hoger motorrendement. Een van de conclusies van KEMA is dat het park aan de methaan-eis van Bems kan voldoen (gemeten range op twee motoren na: 1000-1500 mg C/Nm<sup>3</sup>). De onderkant van de bandbreedte, 1000 mg C/Nm<sup>3</sup>, vormt gelijk de praktische onderkant voor de komende jaren voor het gasmotorpark volgens KEMA.

Meetcampagnes in Nederland:  
2011 door KEMA

Tenslotte heeft KEMA ook enkele biogasmotoren in meetcampagnes meegenomen, maar deze blijven allen onder het niveau van de bestaande Bems-eis; er is één motor welke boven de 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> uitkwam.

KEMA heeft eveneens waargenomen dat de voorgeschreven meetmethode resulteert in een overschatting van de methaanemissie. De overschatting van de methaanemissie bedraagt ongeveer 12% (KEMA, 2011). Een betere meetmethode zou wenselijk zijn. Indien deze meetmethode wordt verbeterd en voorgeschreven, zullen meer gasmotoren uit de voornoemde meetcampagnes voldoen aan de bestaande en voorgestelde eis.

Ook is er in 2008 een meetcampagne uitgevoerd door Wageningen UR Glastuinbouw en Plant Research International (Dueck et al, 2008). Drie van de vijf gemeten motoren hadden een methaanemissie hoger dan de eis van  $1500 \text{ mg C/Nm}^3$  (bij 3%  $\text{O}_2$ ). Eén motor had een emissie lager dan  $1000 \text{ mg C/Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$ . Deze studie concludeert een redelijk duidelijke relatie van de methaanemissie met de vermogensgrootte van de motor (Dueck et al, 2008). Op deze relatie wordt verderop uitgebreid teruggekomen.


De  $\text{NO}_x$ -metingen bij de installaties met SCR, waarbij ureum ook daadwerkelijk werden gedoseerd, kwamen in (KEMA, 2007; KEMA, 2011; Dueck, 2008) allemaal ruim onder de emissiewaarde van  $100 \text{ mg/Nm}^3$  (bij 3%  $\text{O}_2$ ). Vervolgens de meeste motoren in deze meetcampagnes waren uitgerust met SCR; alleen tijdens de meetcampagne van 2011 waren drie motoren zonder SCR uitgerust.

Tijdens de meetcampagne van KEMA in 2009 waren van de 30 motoren 9 zonder SCR uitgerust. Van de 21 motoren met een SCR waren 2 met afgeschakelde ureumdosering, 6 met een wisselende ureumdosering en 13 met ureumdosering. Van de 13 met ureumdosering werd waargenomen dat er 2 een  $\text{NO}_x$ -emissie van meer dan  $100 \text{ mg/Nm}^3$  (bij 3%  $\text{O}_2$ ) hadden; degene met de hoogste emissie zat op het niveau van  $158 \text{ mg/Nm}^3$  (bij 3%  $\text{O}_2$ ). De 6 motoren met een wisselende ureumdosering zaten, evenals de overige 11 met ureumdosering, ruim onder het niveau van  $100 \text{ mg NO}_x/\text{Nm}^3$  (bij 3%  $\text{O}_2$ ) ten tijde van de dosering. Hoewel in het verleden een mogelijke relatie van de methaanemissie met de  $\text{NO}_x$ -emissie is gesuggereerd (o.a. KEMA, 2009), is het in ieder geval duidelijk uit de diverse meetcampagnes dat SCR niet tot hogere methaanemissies leidt. De metingen uit 2011 zijn ook tussen de motor en de katalysator en na de katalysator uitgevoerd; hieruit kan worden geconcludeerd dat de aanwezigheid van een SCR leidt tot enige reductie van de totale methaanemissie. Voor zover achterhaalbaar zijn al deze motoren uitgerust met een SCR inclusief oxidatiekatalysator om eventuele ammoniakslip af te vangen. Deze oxidatiekatalysatoren zijn over het algemeen in staat om de hogere koolwaterstoffen (vanaf  $\text{C}_2$ ) ook weg te oxideren; dat resulteert in een beperkte reductie van de totale methaanemissie. Analyse van de diverse motoren in de meetcampagne van 2011 laat zien dat de hoogte van de  $\text{NO}_x$ -emissies direct uit de motor geen enkele relatie vertoont met de hoogte van de methaanemissie. Het enige opvallende is dat de eerder beschreven twee gevallen binnen de 2011-meetcampagne een relatief groot verschil in methaanemissie laten zien, waarbij tegelijkertijd ook een verschil in luchtvermaat, de lambda, is waargenomen. Bij de lagere luchtvermaat resulteerde dit in een meetbaar lagere methaanemissie en een hoger motorrendement, maar ook in hogere  $\text{NO}_x$ -emissies direct uit de motor. Als binnen hetzelfde motorsysteem deze parameter wordt aangepast, lijkt dat dus gevolgen te hebben voor deze emissies. Vanwege de aanwezigheid van een SCR-katalysator heeft de verhoging van de  $\text{NO}_x$ -emissies direct uit de motor geen gevolgen voor het emissieniveau na de katalysator.

Analyse van het motorvermogen versus de methaanemissie op basis van alle voornoemde meetcampagnes laat zien dat er wel een zekere relatie is met het vermogen, maar dat deze niet lineair verloopt, zie ook **Figuur 15** in Bijlage B. Vermogens kleiner dan  $1 \text{ MW}_e$  laten emissies zien tussen  $190$  en  $1205 \text{ mg C/Nm}^3$  (bij 3%  $\text{O}_2$ ), terwijl vermogens groter dan  $1 \text{ MW}_e$  een spreiding laten zien in methaanemissies, welke niet lineair toeneemt met vermogen. De uitschieters tussen  $1$  en  $2 \text{ MW}_e$  liggen tussen  $770$

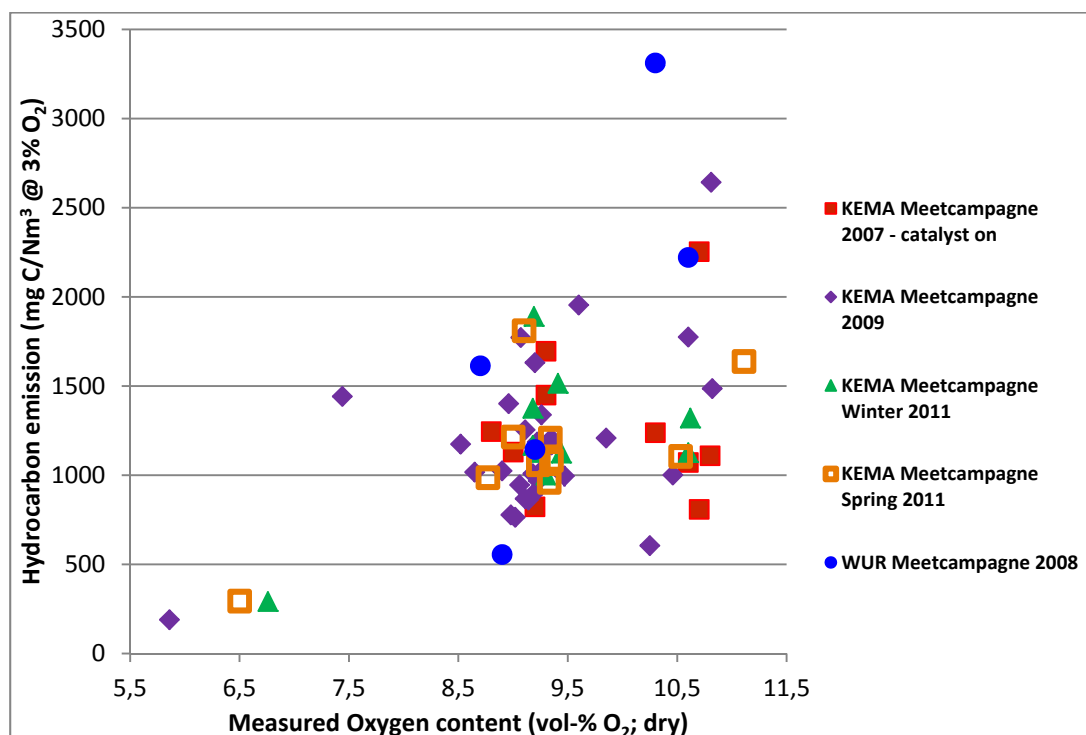
en 2220 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>), waarbij 8 van de 36 motoren niet aan de bestaande Bems eis voldoen. Tussen 3 en 4 MW<sub>e</sub> liggen de uitschieters tussen 600 en 3300 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>), waarbij slechts 1 van de 8 motoren niet aan de bestaande Bems eis voldoet. Feitelijk zou in elke vermogenscategorie een gelijkwaardig aantal en variatie aan motoren moeten worden geanalyseerd om tot een robuuste conclusie te komen, maar gezien de huidige spreiding van de meetresultaten lijkt een lineair verband vrij onwaarschijnlijk. Overigens wordt hier opgemerkt dat in vrijwel alle vermogenscategorieën, motoren zijn te vinden die zowel minder dan 1500 als minder dan 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>) emitteren.

Naar aanleiding van de eerder beschreven twee gevallen binnen de 2011-meetcampagne waarbij een relatief groot verschil in methaanemissie waargenomen in combinatie met een verschil in luchtvermaat, is het zuurstofpercentage versus de methaanemissie geanalyseerd. In **Figuur 11** en Tabel 22 is een grafische en cijfermatige indeling van de diverse metingen weergegeven naar methaanemissie en het gemeten zuurstofpercentage in het rookgas. Het zuurstofpercentage en de lambda hangen direct met elkaar samen: hoe meer luchtvermaat tijdens het motorbedrijf, hoe hoger het zuurstofpercentage. In **Figuur 11** en **Tabel 22** is duidelijk te zien dat bij hogere zuurstofpercentages, een groter deel van de motoren hoge methaanemissies laat zien. Voor een robuuste conclusie verdient het aanbeveling om bij elk zuurstofpercentage een gelijkwaardig aantal en variatie aan motoren te analyseren, maar de hier uitgevoerde analyse duidt erop dat een motorbedrijf bij hoog zuurstofpercentage resulteert in een grotere kans op hoge koolwaterstofemissies. Niet elk motortype reageert op gelijke wijze op hetzelfde zuurstofpercentage en zelfs dezelfde motor kan een variërende methaanemissie laten zien, terwijl het zuurstofpercentage nauwelijks is veranderd. Deze resultaten lijken er wel op te duiden dat een motorbedrijf bij hoog zuurstofpercentage kritischer wordt, waardoor de kans op een hoge methaanemissie toe lijkt te nemen. Feitelijk zou er meer onderzoek gericht moeten zijn op deze parameter; indien juist, zou dit betekenen dat het gebruik van lean-burn technologie om de NO<sub>x</sub>-emissies te reduceren, resulteert in een toename van de methaanemissies. Analyse van het motorvermogen naar het actueel zuurstofpercentage tijdens het motorbedrijf laat zien dat tussen 0,5 MW<sub>e</sub> en 2 MW<sub>e</sub> veruit de meeste motoren worden bedreven tussen 8 en 10 vol-% O<sub>2</sub>, terwijl vanaf 2 MW<sub>e</sub> de motoren vrijwel zonder uitzondering worden bedreven tussen 10 en 11,5 vol-% O<sub>2</sub>.



Zuurstofpercentage tijdens motorbedrijf versus methaanemissie

**Figuur 11:** Gasmotormetingen uit (KEMA, 2007, 2009, 2011; Dueck, 2008) ingedeeld naar methaanemissie en zuurstofpercentage.



**Tabel 22:** Absoluut en procentueel aantal motormetingen naar methaanemissie (mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, droog) en zuurstofpercentage (droog, vol-%). Totaal aantal motormetingen is 65; indien een katalysator aanwezig is, is de meting na de katalysator leidend geweest. Metingen afkomstig uit (KEMA, 2007, 2009, 2011; Dueck, 2008).

	5,5-8 vol% O <sub>2</sub>	8-9 vol% O <sub>2</sub>	9-10 vol% O <sub>2</sub>	10-11,5 vol% O <sub>2</sub>
0-1000 mg C/Nm <sup>3</sup>	3	7	10	2
1000-1200 mg C/Nm <sup>3</sup>	-	3	10	5
1200-1500 mg C/Nm <sup>3</sup>	1	1	7	3
1500-2000 mg C/Nm <sup>3</sup>	-	-	7	2
2000-3500 mg C/Nm <sup>3</sup>	-	-	-	4
Omgerekend naar percentage van totaal aantal motormetingen				
0-1000 mg C/Nm <sup>3</sup>	4,6%	10,8%	15,4%	3,1%
1000-1200 mg C/Nm <sup>3</sup>	-	4,6%	15,4%	7,7%
1200-1500 mg C/Nm <sup>3</sup>	1,5%	1,5%	10,8%	4,6%
1500-2000 mg C/Nm <sup>3</sup>	-	-	10,8%	3,1%
2000-3500 mg C/Nm <sup>3</sup>	-	-	-	6,2%

**Tabel 23:** Aardgasmotormetingen in Denemarken (Brændselsforbrug = brandstofconsumptie; Lugt = geur in Deense Lugt Enheder; Elvirkningsgrad = elektrische efficiëntie) (Tabel 18 uit Nielsen & Thomsen, 2010)

Fabrikat	Type	Brændselsforbrug (TJ/jaar)	NO <sub>x</sub> (g/GJ)	UHC (C) (g/GJ)	CO (g/GJ)	N <sub>2</sub> O (g/GJ)	Lugt (LE/m <sup>3</sup> )	Formaldehyd (g/GJ)	Elvirkningsgrad (%)
Caterpillar	3500	3805	142	423	41	0,44	5650	0,28	37,2
Caterpillar	3600	2723	94	569	57	0,57	-	18,48	38,7
Caterpillar	GM34	538	123	484	49	0,76	-	-	43,3
Deutz	604/620	726	143	182	46	0,65	-	-	34,8
Jenbacher	300	4221	149	352	66	0,67	-	8,28	37,7
Jenbacher	400	452	-	-	-	-	-	-	-
Jenbacher	600	2203	104	314	34	0,56	7008	7,70	41,7
MAN	Rollo	538	143	66	137	-	-	-	33,0
Niigata	Alle	28	87	1188	161	-	-	-	37,0
Rolls-Royce	K	6417	159	470	60	0,59	1800	15,02	41,6
Rolls-Royce	B	364	139	330	47	0,77	-	-	45,5
Wärtsilä	25SG	1369	132	372	64	0,63	-	-	-
Wärtsilä	34SG	2162	111	448	67	0,48	-	14,86	42,1
Wärtsilä	Øvrige	1390	125	537	25	-	-	-	39,2
Waukesha	Alle	252	-	-	-	-	-	-	-
Cummins	Alle	60	157	324	48	-	4150	-	39,6
Øvrige	Alle	785	-	-	-	-	-	-	-

In **Tabel 23** staan metingen die aan gasmotoren in Denemarken zijn uitgevoerd (Nielsen & Thomsen, 2010). Om de cijfers om te rekenen naar mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> moeten deze door 0,28 gedeeld worden. De NO<sub>x</sub>-emissies liggen op het niveau van wat in Nederland nu gangbaar is. De methaan-eis in Bems ligt omgerekend op ongeveer 420 g/GJ<sub>aardgas, groningen</sub>. Ongeveer de helft van de gemeten motoren in Denemarken heeft een hogere UHC-emissie dan de Nederlandse eis (UHC=onverbrande koolwaterstoffen). Aan de eis van 1200 mg/Nm<sup>3</sup>, omgerekend is dat 336 g/GJ<sub>aardgas, groningen</sub>, wordt door 40% van de motoren voldaan. De gemiddelde emissiefactor van aardgasmotoren laat de laatste jaren wel een daling zien richting de genoemde emissie van 1200 mg (C in C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, zie **Figuur 14**. Meer emissiemetingen, bijvoorbeeld over emissies tijdens het opstarten, zijn te vinden in (Jensen, 2007).

Meetcampagnes in Denemarken

## 6.3 Reductie van de methaanemissie bij gasmotoren

Methaan laat zich lastiger afbreken dan andere koolwaterstofverbindingen: er zijn veel hogere temperaturen nodig voor methaanoxidatie in vergelijking met de oxidatie van andere koolwaterstoffen. De zelfontbrandingstemperatuur van methaan, 537°C, ligt aanzienlijk hoger dan dat van andere typische componenten in aardgas (Haynes, 2013). De rookgastemperaturen variëren tussen 350°C en 600°C en zijn met name afhankelijk van de toepassing van turbo en open-chamber of pre-chamber bij de motor (De Wit & Mofid, 2005). Tijdens de meetcampagne van 2011 varieerde de rookgastemperaturen

tussen 385°C en 495°C en was de gemiddelde temperatuur 445°C over de tien verschillende motoren (KEMA, 2011). Er zijn wel nageschakelde technieken beschikbaar om de emissies in het rookgas te reduceren, maar het zijn geen eenvoudige en goedkope technieken. Het voorkomen van methaanemissies via motorzijdige aanpassingen heeft dan ook de voorkeur. Enkele motorzijdige aanpassingen zullen hieronder worden behandeld.

Zoals hiervoor vermeld, is het ook mogelijk om methaanemissies op enkele manieren rookgaszijdig te reduceren. Allereerst kan een katalysator gebruikt worden om methaan bij lagere temperaturen weg te oxideren. Katalysatoren voor beperking van formaldehyde uitstoot en methaanuitstoot uit aardgasauto's zijn in dit kader mogelijk ook relevant.

Een tweede optie is om het rookgas eerst te verhitten en dan over een katalysator te leiden. Omdat bij de methaanverbranding warmte vrijkomt, kan er voldoende warmte ontstaan om het ingaande uitlaatgas weer te verhitten.

Een laatste optie is om te verhitten tot spontane verbranding. Dit systeem is al meer dan 200 keer geleverd en kost ongeveer 0,5 eurocent/kWh. Ook bedrijven die systemen leveren voor de afbraak van industriële ventilatielucht met verdunde koolwaterstoffen of methaan uit de ventilatielucht van kolenmijnen, kunnen dergelijke systemen leveren.

#### Motorzijdige aanpassingen

In een rapport van Gasunie worden reeds enkele motorzijdige aanpassingen behandeld, waarvan de motorafstelling de meest kansrijke aanpassing is voor lean-burn motoren. Voor de methaanemissie is de afstelling van de luchtfactor daarbij de meest relevante parameter (Van Dijk, 2004). Wel geldt er een wet van communicerende vaten: verlaging van de luchtfactor resulteert bij verlaging in minder methaanemissies, maar hogere NO<sub>x</sub>-emissies en vice versa (Van Dijk, 2004). De diverse meetcampagnes in Nederland laten zien dat veel gasmotoren reeds met een SCR zijn uitgerust, zoals eerder beschreven. Het rookgas van de meeste motoren lag pas na de SCR op een emissie van 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>) (KEMA, 2007; KEMA, 2011; Dueck, 2008). Voor nieuwe motoren die moeten voldoen aan een Bems-eis van 100 mg/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>), zal toepassing van SCR vrijwel standaard zijn. Omdat toepassing van SCR verhoging van NO<sub>x</sub>-emissies in het rookgas zal reduceren, creëert dit ruimte voor motorzijdige aanpassingen voor de reductie van methaan. Zoals reeds is geanalyseerd in **Tabel 22**, lijken de diverse meetcampagnes er wel op te duiden dat een motorbedrijf bij hoog zuurstofpercentage (dus hogere lambda) kritischer wordt, waardoor de kans op een hoge methaanemissie toe lijkt te nemen. Aanpassing van de lambda is technisch goed mogelijk (Van Dijk, 2004). Ook uit **Figuur 10** blijkt dat er een optimale luchtfactor is tussen "detonation" en "misfiring", waarop de motor bedreven dient te worden. De zeer hoge luchtvermaat zal de kans op "misfiring" waarschijnlijk doen toenemen. Door nieuwe motorafstelling zullen de meeste gasmotoren met hoge luchtvermaat een emissiereductie ten aanzien van methaan laten zien, terwijl de toegenomen NO<sub>x</sub>-emissies met behulp van een SCR gereduceerd kunnen worden.

Volgens (KEMA, 2011) was er in de meetcampagne van 2011 maar beperkt sprake van "misfiring". De bijdrage ten gevolge hiervan is dus zeer beperkt geweest in deze meetcampagne. Zoals eerder beschreven kan het vlamfront bij zeer hoge luchtvermaat worden gedoofd nabij de cilinderwand en de spleetvolumes, waardoor delen van de

brandstof onverbrand de cilinder verlaten (KEMA, 2011). Voor een aantal gasmotoren vormt dit effect ten gevolge van een wijziging van de luchtvermaat een goede verklaring (KEMA, 2011).

In het rapport van Gasunie worden verder minimalisatie van spleetvolumes in de cilinder, monitoring methaanemissies, waterinjectie en HCCI genoemd (Van Dijk, 2004). De laatste drie vinden (nog) vrijwel geen toepassing in de markt. Het effect en belang van spleetvolumes is reeds beschreven in Paragraaf 6.1. Spleetvolumes worden met name beïnvloed door de zuigers. Bij één van de onderzochte motoren zijn de aluminium zuigers vervangen door stalen zuigers. Het effect van deze stalen zuigers is onderzocht. Volgens (KEMA, 2011) was het onduidelijk of het ontwerp van deze stalen zuigers inderdaad ook minimalisatie van het spleetvolume omvatte. In ieder geval bleek tijdens de meetcampagne van 2011 deze stalen zuigers ongunstig te zijn voor de methaanemissies; een verklaring kan niet worden gegeven, gezien het gebrek aan gegevens omtrent deze stalen zuigers (KEMA, 2011). In dit rapport wordt daarom geadviseerd het effect van stalen zuigers opnieuw te onderzoeken (KEMA, 2011). Reductie van methaanemissies door minimalisatie van spleetvolumes zal vermoedelijk niet eenvoudig zijn (Van Dijk, 2004).

Anders dan bij andere vluchtige koolwaterstoffen (VOS) is het niet mogelijk om methaan met een standaard oxidatiekatalysator af te breken. Methaan is in tegenstelling tot andere koolwaterstoffen (NMVOS) weinig reactief; de afbraak van CO en hogere koolwaterstoffen vindt plaats bij lagere temperaturen dan nodig is voor methaan (Sklorz, 2003; De Wit & Mofid, 2005). Bij TNO heeft onderzoek plaatsgevonden naar een SCR die met plasma ondersteund wordt. Deze zou naast NO<sub>x</sub> ook CH<sub>4</sub> kunnen afbreken. Dit systeem lijkt echter niet verder doorontwikkeld te zijn.

Katalytische methaanreductie

Door Knook Energy Solutions International BV in Hoofddorp wordt momenteel een katalysator ontwikkeld om methaanemissies van gasmotoren af te breken. Volgens de internetsite van Knook wordt binnenkort ook een methaankatalysator geleverd (Knook, 2012). In 2012 is via TU Delft bevestigd dat dit type katalysator op laboratoriumschaal wel is ontwikkeld en getest, maar dat verdere praktijktests nog moeten worden uitgevoerd. Dit staat op de planning voor 2013. Overigens wordt hier opgemerkt dat deze katalysator geïntegreerd moet worden met het besproken katalysatorsysteem in Paragraaf 2.2, wegens een aanwezige SO<sub>x</sub>-trap in dat katalysatorsysteem. Deze SO<sub>x</sub>-emissie komt vrij door verbranding van het geuradditief tetrahydrothiofeen in aardgas; verwijdering hiervan lijkt dus voorlopig noodzakelijk voor deze techniek. Toepassing van de methaankatalysator op het gehele gasmotorpark, ook als het bewezen technologie is, is dus niet zonder meer mogelijk.

Wegens een methaan-eis aan aardgasmotoren in Denemarken is door de Danish Gas Technology Centre onderzoek verricht naar oxidatiekatalysatoren om de methaanemissies uit het uitlaatgas van aardgasmotoren te reduceren. In een rapport uit 2005 wordt beschreven dat de onderzochte katalysatoren, palladium/metaaloxide katalysatoren van Kanthan AF, onvoldoende verwijderingsrendement hebben (De Wit & Mofid, 2005). Het beeld dat methaanverwijdering met katalysatoren nog sterk in de onderzoeksfase verkeert, wordt bevestigd door een review van Gélin. Palladiumkatalysatoren blijken nog het meest veelbelovend te zijn volgens deze review (Gélin, 2009). Mede onder invloed van eisen aan formaldehyde-emissies heeft

Jenbacher onderzoek gedaan naar oxidatiekatalysatoren. De door hun ontwikkelde oxidatiekatalysator voor formaldehyde heeft een standtijd van 4000 uur en is erg gevoelig voor de aanwezigheid van zwavel (bij biogas wordt volledige ontzwaveling aanbevolen) (Elsenbruch, 2009).

Door ECN is onderzoek verricht naar methaan en NO<sub>x</sub> reducerende katalysatoren bij lage temperaturen. In het geval van gasmotoren vindt er gelijktijdige verwijdering plaats van NO<sub>x</sub> én CH<sub>4</sub>, maar ook van andere koolwaterstoffen, aldehyden en CO zonder toevoeging van de hulpstoffen ureum of ammoniak. De kracht van het concept is de eenvoud: een hoogwaardige katalysator verwijdert alle ongewenste stoffen in het rookgas zonder verdere hulpbronnen en appendages. De benodigde energie voor de katalyse wordt gehaald uit het rookgas. Temperaturen beneden 500°C resulteerden in onvolledige methaanverwijdering en bij 400°C was de methaanconversie verlaagd tot ongeveer 10%. De katalysatoren ondervonden ook hinder door zwavelverontreinigingen in het rookgas (Pieterse & Van de Brink, 2006).

De verdere opkomst van auto's met aardgasmotoren zal eveneens leiden tot een verhoging van methaanemissies door onvolledige verbranding in de motor. Hier wordt regelmatig onderzoek naar verricht; enkele recente publicaties zijn (Cargnello et al, 2012; Farrauto, 2012). Een aantal bedrijven biedt oxidatiekatalysatoren voor aardgasmotoren; lang niet altijd wordt vermeld of methaan eveneens wordt gereduceerd door de aangeboden katalysator. Het bedrijf Donaldson claimt wel een katalysator te hebben met een methaanverwijdering uit het rookgas tot ongeveer 80% bij een automotor op gecomprimeerd aardgas (CNG) (Donaldson, 2012). Het is niet duidelijk of dit aangeboden systeem geschikt zou zijn voor toepassing op het Nederlandse gasmotorpark.

Methaanverwijdering met verhitte katalysator

Zoals opgemerkt in het rapport van (De Wit & Mofid, 2005), heeft de Danish Gas Technology Centre een systeem ontwikkeld met rhodiumkatalysatoren voor methaanreductie, welke voldoende actief is voor rookgassen met een temperatuur van 440°C of meer (De Wit et al, 2000). Om een voldoende hoge temperatuur te bereiken voor lage temperatuur rookgassen, is een systeem met naverbrander en warmterecuperatie ontworpen: REGENOX. Alleen bij het opstarten is er hulpwarmte nodig van de naverbrander, daarna produceert de gekatalyseerde reactie voldoende warmte, die, middels warmte-uitwisseling, het inkomende rookgas op de gewenste temperatuur brengt. Daarbij worden de volgende kostencijfers genoemd: € 50.000 voor een oxidatiekatalysator met naverbrander (waarvan € 15.000 voor de naverbrander) voor 1 MW<sub>e</sub> installatie. Het totale systeem met warmterecuperatie kost initieel € 270.000 voor 1 MW<sub>e</sub> installatie; de kosten hiervan kunnen dalen door een eenvoudiger en efficiënter systeem met minder kleppen en katalysatorcapaciteit tot € 70.000 voor 1 MW<sub>e</sub> installatie (De Wit et al, 2000). Een naverbrander is weliswaar zeer goedkoop, maar vereist continue brandstoftoevoer.

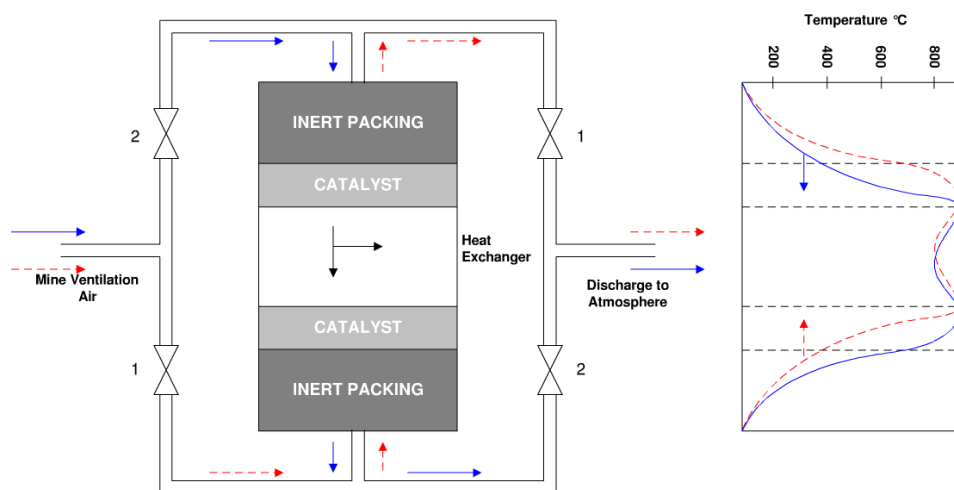
REGENOX commercieel beschikbaar

Technisch is het mogelijk om dit principe verder uit te werken met een SNCR: NO<sub>x</sub>-verwijdering met NH<sub>3</sub> bij hoge temperatuur. Op deze manier kunnen alle ongewenste componenten in het rookgas worden verwijderd (Kristensen et al, 2001). Haldor Topsøe biedt katalytische oxidatiesystemen commercieel aan onder de handelsnamen CATOX en REGENOX, waarbij laatstgenoemde het meest geschikt is voor de koolwaterstofconcentraties in rookgas van gasmotoren (Haldor Topsøe, 2012).



Er zijn diverse systemen om lage concentraties aan koolwaterstof af te breken. Een nieuw toepassingsgebied betreft het verbranden van het methaan dat zich in lage concentraties in de ventilatielucht van kolenmijnen bevindt. Deze concentraties zijn vergelijkbaar met die van het uitlaatgas van gasmotoren. Sinds 1995 is door CANMET, het Energy Technology Centre in Canada, een systeem ontwikkeld om methaan uit de ventilatielucht van mijnen te verwijderen: het CH<sub>4</sub>MIN systeem (Sapoundjiev, 2004; Sapoundjiev, 2005). In dit systeem wordt gebruik gemaakt van warmtewisselaars en de warmte die bij het verbranden van methaan vrijkomt; verder is het systeem bruikbaar tussen 0,1 en 1 vol-% methaan in de ventilatielucht. De lucht moet middels een ventilator door het systeem worden geblazen, waarmee energie verloren gaat. Bij voldoende hoge concentratie methaan kan de thermische energie die vrijkomt, aangewend worden voor elektriciteitsopwekking. Voor een schema van het CH<sub>4</sub>MIN systeem, zie **Figuur 12**, in dit geval toegepast op mijngas (Sapoundjiev, 2005).

**Figuur 12:** CH<sub>4</sub>MIN systeem om methaan uit ventilatiegas van mijnen te verwijderen (Sapoundjiev, 2005)



Een voorbeeld van een systeem dat al 30 jaar op de markt wordt gebracht, om sterk verdunde koolwaterstoffen af te breken uit gasstromen, is de VOCSIDIZER<sup>™</sup> van MEGTEC. Dit is net als CH<sub>4</sub>MIN een zogenaamde flow-reversal oxidizer waarbij beurtelings de ene helft van de het keramische materiaal gebruikt wordt om op te warmen en de andere helft om af te koelen. Het systeem is zelfvoorzienend bij 700 tot 2000 mg CH<sub>4</sub>/Nm<sup>3</sup> en opereert bij ongeveer 1000°C. Nadeel is wel dat het keramische materiaal bij aanvang eerst elektrisch moet worden opgewarmd (MEGTEC 2010). MEGTEC brengt ook andere systemen op de markt en noemt op andere plaatsen ook lagere methaanconcentraties, zo heeft de kleinste uitvoering van de EPSILON een gasdebiet van 5000 Nm<sup>3</sup>/h (vergelijkbaar met een gasmotor van circa 2 tot 3 MW<sub>e</sub>). Een ander bedrijf, Biothermica, heeft een vergelijkbaar systeem, VAMOX<sup>™</sup> genaamd, bruikbaar bij concentraties van 200 tot 1200 mg CH<sub>4</sub>/Nm<sup>3</sup> en met voorverhitting door propaanbranders (Duplessis, 2009).

Hoewel nog niet toegepast bij gasmotoren, zouden deze systemen zich er wel voor lenen. Problematisch kan de start-stop operatie van een gasmotor zijn en langdurige stilstand van de motor. Er is wel enig drukverlies, maar afgezien van een paar kleppen

en een extra ventilator zijn er geen bewegende delen. Ook hebben de systemen geen last van storende stoffen in het gas.

Methaanreductie met naverbranding

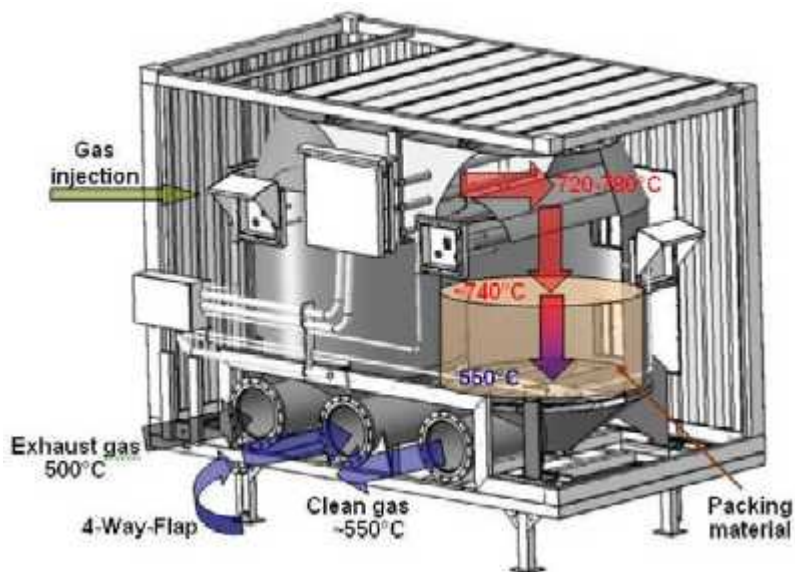
In een Gasunie rapport uit 2004 zijn de opties voor NO<sub>x</sub>- en CH<sub>4</sub>-reductie bij gasmotoren geïnterpreteerd (Van Dijk, 2004). Het rapport geeft de mogelijkheid van na-oxidatiesystemen aan. Hierin wordt de rookgastemperatuur tijdelijk verhoogd om zo de koolwaterstoffen inclusief methaan alsnog af te breken. Volgens Gasunie zijn deze systemen op de markt beschikbaar en kunnen ze minimaal 95% van de methaan omzetten. De installaties vergen wel veel ruimte (net als SCR), wat plaatsing bij bestaande installaties (retrofit) duur maakt. Gasunie schat de CH<sub>4</sub>-reductiekosten voor installaties van circa 1 MW<sub>e</sub> in de range van 1700 €/ton CH<sub>4</sub> (nieuwbouw en gunstige afschrijvingscondities) tot 4100 €/ton CH<sub>4</sub> (retrofit en ongunstige afschrijvingscondities). De resulterende specifieke emissiereductiekosten zijn in de range van ongeveer 0,5 €/kWh<sub>e</sub> tot 1,2 €/kWh<sub>e</sub><sup>20</sup>. In de praktijk komt volgens het Gasunie rapport slechts een beperkt deel van het bestaande gasmotorpark in aanmerking voor retro-fit met een na-oxidatiesysteem. Als referentie noemt Gasunie gasmotorfabrikant Jenbacher die een dergelijk systeem heeft draaien.

Regeneratieve naverbrander commercieel beschikbaar

Naast de eerder beschreven oxidatiekatalysatoren voor formaldehyde-reductie, heeft Jenbacher ook een regeneratieve naverbrander ontwikkeld: het CL.AIR<sup>®</sup> systeem (GE Jenbacher, 2012), zie **Figuur 13**. Dit systeem heeft geen energie-ondersteuning nodig bij vollastbedrijf. Het CL.AIR<sup>®</sup> systeem wordt in een container geleverd en is al op meer dan 200 plaatsen gebruikt (Elsenbruch, 2009). Op het systeem wordt een garantie afgegeven dat de emissie van zowel CO als THC (Total Hydro Carbon; inclusief methaan) gereduceerd wordt tot minder dan 225 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> en formaldehyde tot (veel) minder dan 45 mg/Nm<sup>3</sup>. De levensduur van ligt op 15 jaar. Volgens de toelichting wordt geen gebruik gemaakt van een katalysator en vindt de afbraak bij 740-800°C plaats. Als voorbeeld wordt een installatie genoemd met een 526 kW<sub>e</sub> gasmotor op biogas uit varkensmest, vetafval en etensresten. Het CL.AIR<sup>®</sup> systeem vraagt een extra investering van 100.000 euro (op een totale investering van 1,5 mln). De totale kosten van het CL.AIR<sup>®</sup> systeem bedragen 0,4 tot 0,525 €/kWh<sub>e</sub>. Op basis van enkele praktijkmeting wordt verwacht dat de THC emissie onder de 140 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> uit gaat komen (Elsenbruch, 2009).

<sup>20</sup> Gasunie: "In de fictieve situatie dat deze maatregel op het gehele Nederlandse gasmotorpark (stand 2002) toegepast zou kunnen worden, bedraagt het reductiepotentieel ongeveer 7,7 kton tot 12,5 kton CH<sub>4</sub> op een totale uitstoot in 2002 van 10,1 kton tot 16,5 kton. De bijbehorende specifieke reductiekosten liggen in de orde van grootte van € 2640 tot bijna € 4300 per ton CH<sub>4</sub>. Inclusief correctie voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot verbonden aan de hulpenergie voor het thermisch opstarten van het na-oxidatiesysteem bedragen de reductiekosten ongeveer € 145 tot € 260 per ton CO<sub>2</sub>-equivalent."

**Figuur 13:** CL.AIR© systeem om methaan te reduceren



Door KEMA zijn in 2009 metingen gedaan aan een gasmotor met naverbranding (KEMA, 2010). Het gaat hierbij om een Rolls Royce motor van 2,4 MW<sub>e</sub>. Het gemiddelde verwijdingsrendement van de naverbrander voor C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> is 99,7% (en voor CO 99,6%), zie ook **Tabel 24**. Het methaangehalte van de koolwaterstoffen in het uitlaatgas van de motor voor de naverbrander ligt op 89%. Er zijn bij de motor ook aldehyde metingen uitgevoerd<sup>21</sup>; ook deze componenten worden naverbrand en dalen met 96%. De temperatuur in de naverbrander ligt tussen de 860 °C en 890°C. Volgens de beschrijving betreft het een gesloten naverbrander, maar geeft verder niet veel technische details.

**Tabel 24:** Metingen aan ingang en uitgang naverbrander bij gasmotor

In mg/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub>	[CO]	[NO <sub>x</sub> ]	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (uitgedrukt in C)
Meting 1 ingang	855	353	2417
Meting 2 ingang	854	346	2420
Meting 1 uitgang	4	229	4
Meting 2 uitgang	3	236	7
Meting 3 uitgang	3	227	10

Er zijn ook andere opties zoals de ‘Lean NO<sub>x</sub> Trap Catalysis’ van het Oak Ridge National Laboratory (Parks, 2005). Deze katalysator neemt NO<sub>x</sub> op, en breekt gelijktijdig ook ca. 50% van het methaan af. Bij mijngas wordt er verder nog gesproken over het verbranden in een gasturbine (in plaats van een oxidatiekatalysator tussen de warmtewisselaars) of een eerste processtap waarbij de methaan eerst geconcentreerd wordt. Deze technieken zijn, voor zover bekend, niet marktrijp.

Enkele andere opties

<sup>21</sup> Tijdens WKK-metingen in 2007 zijn aldehyde concentraties bepaald van 0,3 en 0,5 mg/m<sup>3</sup> bij 3 vol-% O<sub>2</sub>. Deze concentraties zijn duidelijk lager dan de in 2009 gemeten aldehyde concentraties van > 4,5 en > 7,0 mg/m<sup>3</sup> bij 3 vol-% O<sub>2</sub> voor de betreffende gasmotor (KEMA, 2010).

Waterstof toevoeging aan aardgas ofwel het HALO-concept, zoals besproken in Paragraaf 3.2, zou ook de emissies van onverbrande koolwaterstoffen moeten reduceren. Er worden in de betreffende studie geen emissieresultaten met betrekking tot dit concept gerapporteerd, maar de verbranding vindt volledig plaats (TIAX, 2006). Experimenten worden uitgevoerd tot 15% H<sub>2</sub>, wat relatief hoge bijmengpercentages zijn. Toepassing in de markt is daarmee niet eenvoudig; ook bevindt het HALO-concept zich nog in de demonstratiefase.

## 6.4 Wetgeving methaanemissie gasmotoren

Op dit moment heeft Nederland, voor zover bij ECN bekend, de scherpste eisen aan koolwaterstofemissies voor stationaire gasmotoren geformuleerd. Met de eisen aan groen label kassen, welke verderop nader worden toegelicht, wordt zelfs alvast een voorschot genomen op de voorgenomen aanscherping. Alleen in Denemarken zijn ook emissie-eisen voor methaan bekend. Deze zijn ruimer dan in Nederland en gelden ook voor biogasmotoren.

Er zijn wel landen met eisen ten aanzien van koolwaterstoffen of vluchtige organische stoffen, maar de definitie omvat vaak niet de methaanemissie (VDMA, 2011a). Ook de eisen in sommige regio's in de VS sluiten de methaanemissie uit (SCAQMD, 2012). Hoewel concrete wetgeving in de meeste landen ontbreekt, is er wel sprake van belangstelling voor de CH<sub>4</sub>-emissies bij het gebruik van biogas in gasmotoren. Het CO<sub>2</sub>-effect komt terug in ketenstudies, maar ook in EU-rapporten wordt de methaanslip ten gevolge van het gebruik van gasmotoren aangekaart (Arcadis, 2010).

### Formaldehyde-eisen

In deze context is het relevant om te vermelden dat de uitstoot van formaldehyde als problematisch voor de luchtkwaliteit wordt gezien. Denemarken noemt een gemiddelde uitstoot van 67 mg/Nm<sup>3</sup>; verderop wordt de formaldehyde-eis in Denemarken beschreven. In Duitsland is de emissie-eis inmiddels aangescherpt naar 45 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Metingen in Nederland laten een veel lagere uitstoot zien. Het is niet duidelijk hoe dit komt. Maatregelen die de methaan-uitstoot reduceren, doen dit ook voor formaldehyde. Andersom is dit niet noodzakelijk het geval<sup>22</sup>.

### Methaan-eis in Denemarken

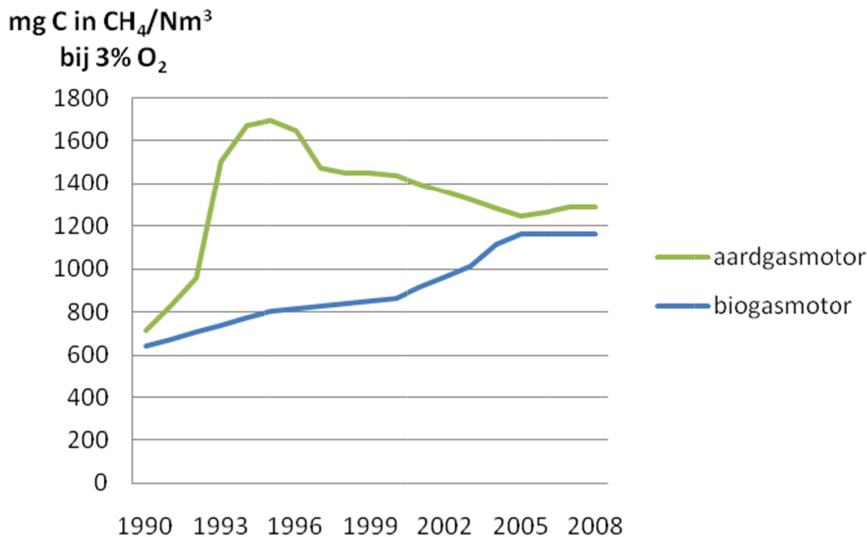
Denemarken is één van de weinige landen die expliciet een emissie-eis voor de koolwaterstofemissie van gasmotoren heeft. Het niveau is 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 5% zuurstof en een elektrisch rendement van 30% (De Wit & Mofid, 2005) voor motoren > 120kW. Dit komt overeen met 470 g C/GJ brandstof (1688 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3%); hier gaat nog een rendementscorrectie overheen van het elektrische rendement gedeeld door 30 (Denemarken, 2005). In Paragraaf 6.1 zijn karakteristieken gegeven voor twee gasmotorcases. Op basis van de genoemde rendementen kan de Deense eis worden omgerekend voor de case kleine gasmotor naar een eis van 1913 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>) en voor de case grote gasmotor naar een eis van 2307 mg C/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>). Dit is aanzienlijk ruimer dan de Nederlandse eis. In 2006 zijn de eisen ook gaan gelden voor

<sup>22</sup> In [http://www.gasteknik.dk/gasteknik/pdf/gasteknik04\\_4.pdf](http://www.gasteknik.dk/gasteknik/pdf/gasteknik04_4.pdf) uit 2004 is bijvoorbeeld sprake van een absorptie proces dat 66% van de formaldehyde verwijdert.

bestaande gasmotoren. Deze eis geldt ook voor biogasmotoren (bij  $\text{NO}_x$  en CO zijn de Deense eisen aan biogasmotoren wel ruimer dan voor aardgasmotoren).

In **Figuur 14** is de emissie-ontwikkeling van gasmotoren in Denemarken zichtbaar. De emissiefactor bij biogas is (aanvankelijk) lager. Dit kan worden verklaard door het gebruik van lean-burn open kamer motoren en geen voorverbrandingskamer motoren zoals bij aardgas het geval is. Ook de grootte van de motoren kan verschillen, wat overigens niet in de publicatie is aangegeven.

**Figuur 14:** Ontwikkeling methaanemissiefactor van gasmotoren in Denemarken



In 2003 is er in Denemarken een formaldehyde eis ingevoerd voor nieuwe gasmotoren ( $> 5 \text{ MW}_e$ ) van  $10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  bij  $5\% \text{ O}_2$  ( $11 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  bij  $3\% \text{ O}_2$ ); hier gaat nog een rendementscorrectie, van het elektrische rendement gedeeld door 30, overheen. Uit onderzoek was gebleken dat de gemiddelde emissie op  $67 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  lag, terwijl voor andere bronnen maxima van  $5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  tot  $20 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  worden voorgeschreven (bij  $10\% \text{ O}_2$ ). Volgens informatie uit 2003 gaan er drie fabrikanten katalysatoren uittesten die formaldehyde reduceren: Enmaco Motorer, Jenbacher en Rolls Royce. De fabrikanten betalen zelf de noodzakelijke aanpassingen (Denemarken, 2003). Op de website wordt eveneens vermeld dat de inwerkingstrededatum van de formaldehyde eis is uitgesteld tot 1 januari 2006. Voor zover achterhaalbaar, is de hier vermelde eis nog steeds van kracht.

Formaldehyde-eis Denemarken

Indien een ondernemer in de glastuinbouw voor een nieuwe kas aan het GLK-label voldoet, kan hij deelnemen aan de Regeling groenprojecten, de overheidsregelingen MIA en VAMIL en het Borgstellingsfonds. Sinds januari 2005 werd in het kader van het Groen Label Kas (GLK) certificatieschema een methaan-eis aan gasmotoren gesteld van max.  $240 \text{ g}/\text{GJ}$  ( $1,2\%$  niet verbrand) voor kleine motoren met directe ontsteking en max.  $320 \text{ g}/\text{GJ}$  ( $1,6\%$  niet verbrand) voor grotere motoren met 'voorkamerontsteking'. In het Certificatieschema Groen Label Kas van eind 2007 werd gesproken over een koolwaterstofemissie-eis van  $1100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  (bij  $3\% \text{ O}_2$ ) (SMK, 2007). In het certificeringschema van 2010 en 2012 staat de emissielimiet voor koolwaterstofemissies op  $1200 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  (bij  $3\% \text{ O}_2$ ) (SMK, 2010; SMK, 2012). Volgens de

Groen label kas Nederland

voorgeschreven meetprocedure en berekening in de regeling gaat het hierbij om het gewicht aan koolstof dat in de koolwaterstoffen aanwezig is. De eis komt daarmee exact overeen met het voorstel dat hier onderzocht wordt. Navraag bij Stichting Milieukeur (SMK) leert dat:

- In 2012 zijn 22 voorlopige certificaten afgegeven aan kassen met een WKK-gasmotor, op een totaal van 31 certificaten.
- In 2011 zijn 18 voorlopige certificaten afgegeven aan kassen met een WKK-gasmotor, op een totaal van 28 certificaten.
- In 2010 zijn 18 voorlopige certificaten afgegeven aan kassen met een WKK-gasmotor, op een totaal van 39 certificaten.

Omdat de methaan-eis een verplichte basiseis is om een GLK-label te verkrijgen voor kassen met een WKK-gasmotor, geldt dat voornoemde aantallen WKK-gasmotoren aan de voorgestelde methaan-eis voldoen.

Formaldehyde-eis Duitsland

In Duitsland geldt een emissie-eis voor formaldehyde van 60 mg/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> (67 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>) en in 2009 is deze eis aangescherpt naar 40 mg/Nm<sup>3</sup> bij 5% O<sub>2</sub> (45 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>) voor biogasmotoren (Elsenbruch, 2009; VDMA, 2011b). Daarbij is voor biogasmotoren (< 500 kW) een extra subsidie van 1 ct/kW<sub>e</sub> beschikbaar gekomen ter compensatie van extra investeringen. Maatregelen zoals een na-oxidatiesysteem om de formaldehyde uitstoot te beperken, hebben ook effect op de emissie van methaan (Elsenbruch, 2009).

## 6.5 Verwachte kosten en effecten

In scenarioberekeningen van ECN en PBL is een verwachte methaanslip in 2020 van gasmotoren in de sector land- & tuinbouw berekend van ongeveer 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq (Daniëls & Kruitwagen, 2010). Doorrekening van het effect van de voorgestelde eis, 1200 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, levert een reductiepotentieel op van ongeveer 0,1 Mton CO<sub>2</sub>-eq in 2020. Voor een deel van de aardgasmotoren met hoge methaanemissies zal nageschakelde techniek, zoals naverbranders, toegepast moeten worden om aan een dergelijke eis te voldoen. Vanwege de zeer hoge verwijderingsgraad van de naverbranders zal de gerealiseerde reductie in dat geval aanzienlijk groter zijn dan hier berekend.

De diverse meetcampagnes laten zien dat voor veel vermogensklassen motoren op de markt beschikbaar zijn, die aan de voorgestelde eis kunnen voldoen zonder enige aanpassing. Verder lijkt het motorbedrijf bij zeer hoge lambda ook te resulteren in een kritisch motorbedrijf, waardoor methaanemissies gemiddeld genomen toenemen. Door nieuwe afstelling van deze motoren en hoge NO<sub>x</sub>-emissies, ten gevolge van deze nieuwe afstelling, te verwijderen met een SCR en een eenvoudige oxidatiekatalysator, zou een deel van de bestaande motoren aan de voorgestelde norm kunnen voldoen. Het opnieuw afstellen van motoren moet voor beperkte kosten uitvoerbaar zijn. Een nieuwe afstelling bij lagere lambda zal in een aantal gevallen ook gepaard gaan met een efficiëntieverbetering.

Een ander optie is dat bij motoren met een te hoge emissie een nageschakelde techniek wordt geplaatst. Jenbacher noemt voor een regeneratieve naverbrander gemiddelde kosten van 0,4-0,525 €/kWh<sub>e</sub>. Er is hier een kosteffectiviteit berekend op basis van een dergelijk systeem inclusief benodigde extra energie-inzet, waarbij de karakteristieken voor een regeneratieve naverbrander is gehanteerd volgens (Elsenbruch, 2009). Er is hier aangenomen dat de methaanuitstoot met 95% wordt gereduceerd. Bij volledige toepassing van deze technologie op het gasmotorpark, betekent dit een reductiepotentieel van 0,95 Mton CO<sub>2</sub>-eq in 2020. Uitgaande van de karakteristieken van een grote gasmotor (zie Paragraaf 6.1 en (Hers & Wetzels, 2009)), zijn de reductiekosten 60-80 €/ton CO<sub>2</sub>-eq. In de diverse meetcampagnes zijn enkele motoren gerapporteerd op een structureel hoger niveau dan de bestaande eis. Emissies op het niveau van 2000 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (560 g/GJ), resulteren in een kosteneffectiviteit van 44-58 €/ton CO<sub>2</sub>-eq. Voor de kosteneffectiviteitsberekeningen is er vanuit gegaan dat gasmotoren op dit emissieniveau en hoger, een naverbrander zullen moeten toepassen. Indien de kosten en effecten zwaar meewegen bij besluitvorming omtrent aanscherping, verdient het aanbeveling deze nauwkeuriger te inventariseren.

Berekende kosten-effectiviteit

## 6.6 Conclusie methaan-eis bij gasmotoren

Nederland loopt voorop met de bestaande methaan-eis aan stationaire gasmotoren. Alleen in Denemarken is eveneens een emissie-eis geformuleerd, die echter soepeler is dan de Nederlandse Bems-eis. Het aantal gasmotoren dat in Nederland staat en het effect van de methaanslip van deze motoren, vormt echter een belangrijke drijfveer om eisen aan deze installaties op te leggen.

Technisch is ook de aangescherpte koolwaterstof-eis van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> goed haalbaar voor nieuwe motoren zonder nageschakelde technieken. Dit betekent waarschijnlijk dat een aantal motorfabrikanten ofwel hun motor aan moet passen of deze niet meer aan zal bieden op de Nederlandse markt. Voor bestaande motoren is het technisch mogelijk om aan de eis te voldoen met nageschakelde technieken, bijvoorbeeld door het plaatsen van een (regeneratieve) naverbrander of een oxidatiekatalysator in combinatie met verhitting middels warmte-uitwisseling. Ook motorzijdige aanpassingen, in het bijzonder de lambda-afstelling, lijkt voor een deel van het bestaande gasmotorpark voldoende mogelijkheden te bieden om de methaanemissies tot beneden gewenste niveau's te reduceren. Een mogelijke toename van de NO<sub>x</sub>-emissie door motorzijdige aanpassingen kan, door nageschakelde technieken die toch veelal toegepast dienen te worden voor nieuwe motoren, alsnog gereduceerd worden.

Een belangrijke afweging bij de keuze voor de methaan-eis is of alleen motorzijdige aanpassingen gewenst zijn, of dat ook end-of-pipe technieken acceptabel zijn. Men kan overwegen om de voorgestelde eis, 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, in te voeren voor nieuwe motoren, zodat reeds bij aanschaf, zonder toepassing van nageschakelde technieken, een beperktere methaanslip wordt gecreëerd. Voor bestaande motoren zou een

Eis welke het Ministerie kan overwegen

overgangsregeling overwogen kunnen worden. Het niveau van de bestaande eis vormt daarvoor een goede basis, zodanig dat in ieder geval een deel van de motoren met motorzijdige afstelling tot methaanreductie kan komen. Motoren met een extreem hoge methaanslip zullen waarschijnlijk een naverbrander moeten toepassen in dat geval. Tenslotte is gebleken op grond van een van de meetcampagnes dat de voorgeschreven meetmethode resulteert in een overschatting van de methaanemissie met ongeveer 12%. Het Ministerie kan overwegen de meetmethode te herzien.



# 7

## Invoering methaan-eis bij biogasmotoren en kleine aardgasmotoren

### 7.1 Invoering methaan-eis bij biogasmotoren en kleine aardgasmotoren

In de Bems-wetgeving is geen eis ten aanzien van emissies van koolwaterstoffen vastgesteld voor motoren op biogas en voor aardgasmotoren kleiner dan  $1 \text{ MW}_e/2,5 \text{ MW}_{th}$ . In dit hoofdstuk is een technische basis voor invoering van een methaan-eis nader geanalyseerd. Een eventuele methaan-eis zou op het niveau van de bestaande eis voor grote gasmotoren ( $1500 \text{ mg C/Nm}^3$  bij 3 vol-%  $\text{O}_2$ ) of op het niveau van de in Hoofdstuk 6 beschreven aangescherpte eis ( $1200 \text{ mg C/Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$ ) kunnen liggen.

Voorstel aanscherping

De emissie-eisen in Bems voor biogasmotoren ten aanzien van  $\text{NO}_x$  en  $\text{SO}_2$  zijn geformuleerd voor verbranding van vergistingsgas. De definitie van vergistingsgas volgens Bems is beschreven in Paragraaf 3.1. Biogas kent een lagere verbrandingswaarde dan aardgas en heeft vaak ook een wisselende samenstelling (KIWA, 2008). Dit vormt mogelijk een complicatie om biogasmotoren aan methaan-eisen te laten voldoen.

Biogasmotoren

In een aanzienlijk deel van de gevallen zou een groot gedeelte van het spontaan ontstane biogas bij afwezigheid van een nuttige aanwending, zijn geëmitteerd. Dit is bijvoorbeeld het geval bij mestopslag, waar door spontane vergisting het gas diffuus wordt geëmitteerd. Nuttige aanwending van dit gas resulteert in deze gevallen dus in een reductie van methaanemissie van bijvoorbeeld mest. Ook als de nuttige aanwending van biogas plaatsvindt in een biogasmotor, waar methaanslip plaatsvindt, resulteert dit in een netto reductie van diffuse biogas-emissie.

Men dient zicht echter ook bewust te zijn dat bij stortgas affakkelen als referentie geldt, in lijn met (Buck et al, 2010). Hier zou vrije methaanemissie dus niet hebben plaatsgevonden, als het biogas niet nuttig zou zijn aangewend. Door het affakkelen van stortgas vindt immers volledige verbranding van methaan plaats.

Tenslotte wordt bij mest-covergisting extra biogas geproduceerd door de inzet van het co-substraat. Dit extra biogas wordt vanwege een nuttige toepassing geproduceerd en zou anders niet zijn geproduceerd. Onvolledige verbranding van vergistingsgas in een biogasmotor verdient in een aanzienlijk deel van de gevallen dus de voorkeur boven vrije methaanemissie, maar er zijn ook diverse situaties waarin vrije methaanemissie geen correcte referentie is. Vanuit deze optiek valt een emissie-eis voor dit type biogasmotoren te rechtvaardigen.

Kleine aardgasmotoren

Aardgasmotoren worden veel toegepast als WKK-installatie. Deze toepassing bespaart ten opzichte van gescheiden opwekking van warmte en kracht, energie en CO<sub>2</sub>-emissies. Emissie van het broeikasgas methaan resulteert echter in vernietiging van een aanzienlijk deel van deze CO<sub>2</sub>-reductie. In een rekenvoorbeeld in Paragraaf 6.1 is het effect van methaanemissies op de totale CO<sub>2</sub>-emissie verder uitgewerkt. Uit dat rekenvoorbeeld blijkt dat bij gelijke methaanemissie voor kleine aardgasmotoren de CO<sub>2</sub>-besparing door WKK-toepassing meer wordt gereduceerd dan voor grote aardgasmotoren. Kleine aardgasmotoren met hoge methaanemissies zijn dan ook minstens zo ongewenst vanuit dat perspectief, als grote aardgasmotoren met hoge methaanemissies. Het emissiepatroon van kleine aardgasmotoren wijkt wel sterk af van grote aardgasmotoren: naar het zich laat aanzien is de methaanemissie uit kleine aardgasmotoren lager dan uit grote aardgasmotoren, zie ook **Figuur 15** in Bijlage B.

## 7.2 Technische analyse methaanemissie biogasmotoren en kleine gasmotoren

In hoofdstuk 6, paragraaf 6.3 is een uitvoerige beschrijving gegeven van technische mogelijkheden om methaanemissies te reduceren. Rookgaszijdige en motorzijdige maatregelen voor reductie van methaanemissies zijn aldaar beschreven. Daarnaast kan reeds bij aanschaf van de motor rekening worden gehouden met methaanemissies.

Metingen aan biogasmotoren

Door KEMA zijn in de meetcampagne van 2009 een drietal biogasmotoren doorgemeten met koolwaterstofemissies van 1174, 1442 en 190 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> (KEMA, 2009). De bijbehorende vermogens bij deze emissies zijn respectievelijk 1400, 1000 en 360 kW<sub>e</sub>. Daarnaast is in de meetcampagne van 2011 ook een biogasmotor gemeten van 360 kW<sub>e</sub>, welke een emissie van 292 en 295 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3 vol-% O<sub>2</sub> liet zien tijdens de twee metingen (KEMA, 2011).

In **Tabel 25** is een aantal metingen aan Deense biogasmotoren opgenomen (Nielsen & Thomsen, 2010). De tabel maakt duidelijk dat er grote verschillen zijn tussen de diverse motoren. Omdat de Bems-eis voor NO<sub>x</sub> ongeveer 95 g NO<sub>x</sub>/GJ<sub>aardgas</sub> of 104 g NO<sub>x</sub>/GJ<sub>biogas</sub><sup>12</sup> is, zijn deze cijfers niet direct te vertalen naar de Nederlandse situatie: de

extra arme (lean-burn) afstelling die veelvuldig wordt toegepast om aan de Nederlandse NO<sub>x</sub> eis te voldoen, resulteert veelal in hogere koolwaterstofemissie. Wellicht kan de Jenbacher motor zowel aan de NO<sub>x</sub>-eis in Bems als aan een mogelijke methaan-eis voldoen met enkel een lean-burn afstelling. Voor de overige motoren zal lean-burn afstelling vermoedelijk niet resulteren in de gewenste emissieniveau's. Het is voor de Jenbacher- en MAN-motor ook mogelijk met behulp van SCR aan scherpe NO<sub>x</sub>-eisen te voldoen en zonder verdere aanpassingen aan een methaan-eis van 1200 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> te voldoen. De metingen geven geen directe aanleiding om biogasmotoren anders te behandelen dan aardgasmotoren met betrekking tot methaanemissies.

**Tabel 25:** Emissiecijfers van biogasmotoren gemeten in Denemarken (Tabel 21 uit Nielsen & Thomsen, 2010)

Motorfabrikant	NO <sub>x</sub> (g/GJ)	UHC ( g C/GJ) [omrekening naar mg C/Nm <sup>3</sup> bij 3% O <sub>2</sub> <sup>12</sup> ]	CO (g/GJ)
Deutz/MWM	228	525 [1720] <sup>12</sup>	306
MAN	365	121 [400] <sup>12</sup>	228
Jenbacher	161	284 [930] <sup>12</sup>	344
Rolls Royce	205	535 [1750] <sup>12</sup>	240

Tijdens de diverse meetcampagnes in Nederland zijn niet veel kleine gasmotoren doorgemeten. Er zijn in totaal 6 metingen verzameld voor motoren kleiner dan 1 MW<sub>e</sub>, waarvan een aantal biogasmotoren zijn (KEMA, 2009, 2011; Dueck et al, 2008), zie eventueel ook **Figuur 15** in Bijlage B. De hoogste gemeten emissie is 1205 mg/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>). De overige metingen lieten methaanemissies zien die daar aanzienlijk onder liggen. Methaanemissies lijken over het algemeen dus geen groot probleem te vormen voor deze vermogenscategorie. Meer gegevens in deze vermogenscategorie zijn wenselijk om een beter inzicht te krijgen in het emissiepatroon van deze gasmotoren. Daarnaast zouden NO<sub>x</sub>-eisen voor kleine gasmotoren een extra arme (lean burn) afstelling noodzakelijk kunnen maken, waardoor de methaanemissie van een aantal kleine motoren in de toekomst kan toenemen. Het resultaat van dit effect zou nader geanalyseerd moeten worden. Overigens is het goed mogelijk dat kleine motoren met een driewegkatalysator (zie Paragraaf 2.2) aan methaan-eisen kunnen voldoen; bij gebrek aan meetresultaten aan dit type motoren kan dit echter niet verder worden onderbouwd.

Metingen aan kleine gasmotoren

## 7.3 Wetgeving methaanemissie

In Hoofdstuk 6, Paragraaf 6.4 is een uitvoerige beschrijving gegeven ten aanzien van emissie-eisen. Alleen Denemarken heeft op dit moment methaan-eisen aan biogasmotoren, die gelijk zijn aan die voor aardgasmotoren, inclusief kleine vermogens tot 120 kW. Deze eis is soepeler dan de Nederlandse methaan-eis voor grote aardgasmotoren van 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Ten aanzien van formaldehyde wordt er in Denemarken wel een eis aangekondigd voor aardgasmotoren, maar niet voor biogasmotoren. Wellicht heeft dit te maken met het zwavelgehalte in biogas en mogelijke problemen met de gebruikte oxidatiekatalysator. In Duitsland zijn wel

Wetgeving in Denemarken en Duitsland

formaldehyde eisen van kracht voor biogasmotoren en aardgasmotoren, waarbij voor aardgasmotoren, voor zover bij ECN bekend, geen ondergrens aan het vermogen is gegeven, zie ook Paragraaf 6.4.

## 7.4 Verwachte kosten en effecten

### Kosten en effecten biogasmotoren

Recente rapportage omtrent hernieuwbare energie in Nederland laat zien dat in 2010 1,9 PJ RWZI-gas op circa 80 locaties, 0,9 PJ stortgas (berekend bij benadering), 5,7 PJ biogas uit mest(co)vergisters op 97 locaties en 2,2 PJ overig biogas op circa 45 locaties, is toegepast voor elektriciteitsopwekking (CBS, 2012). Dit vindt vrijwel volledig toepassing in gasmotoren en betreft dus ongeveer 10,7 PJ biogas. De productie van biogas zal in de toekomst waarschijnlijk toenemen, maar toepassing van biogas kan ook plaatsvinden als aardgas substituuut of voor de opwekking van hernieuwbare warmte. Recente aanvragen voor Stimulering Duurzame Energie (SDE) geven een beeld dat alle drie de technieken toegepast zullen worden. De recente aanvragen voor SDE laten eveneens zien dat diverse vermogens gasmotoren zijn gerealiseerd dan wel aangevraagd; een aanzienlijk deel hiervan zit boven 1 MW<sub>e</sub>. Naar verwachting zal de toepassing van biogas in gasmotoren blijven bestaan. Uitgaande van 10,7 PJ biogas, een gelijk emissiepatroon als dat bij aardgasmotoren en de energie-inzet behorend bij de berekende methaanslip in paragraaf 6.5, is de methaanslip voor biogasmotoren hier ingeschat op 0,13 Mton CO<sub>2</sub>-eq. Verder is hier ingeschat dat een eis van 1500 deze emissie reduceert met circa 0,02 en een eis van 1200 dit reduceert met circa 0,03 Mton CO<sub>2</sub>-eq. Plaatsing van naverbranders zal 95% van de methaanslip verwijderen. Voor de kosten van deze technologie wordt hier verwezen naar berekeningen in paragraaf 6.5.

### Kosten en effecten kleine aardgasmotoren

Het Nederlandse gasmotorpark is in 2008 geïnventariseerd voor een studie van ECN (Kroon & Wetzels, 2008). Uit de inventarisatie van diverse vermogensklassen bleken toen ruim 3000 gasmotoren kleiner dan 1 MW<sub>e</sub> opgesteld te staan; daarvan stonden meer dan 1650 gasmotoren in de sector Land- & Tuinbouw en ongeveer 450 gasmotoren in de sector Gezondheid en ongeveer 450 gasmotoren in de sector Diensten. De CBS statistieken van de productiemiddelen elektriciteit laten zien dat het gemiddelde gasmotorvermogen is toegenomen in de Land- & Tuinbouw (van 0,44 MW<sub>e</sub> in 1998 naar 1,09 MW<sub>e</sub> in 2010), maar voor de overige sectoren is het gemiddelde vermogen over deze periode niet of slechts beperkt toegenomen (CBS, 2013). Voor de sectoren Gezondheid en Overige Producenten, waar de sector Diensten onder is gebracht door CBS, is het gemiddelde motorvermogen over deze periode vrijwel constant (gemiddeld 0,33 MW<sub>e</sub> per motor). Het overgrote deel van het gasmotorpark, bij benadering dus 3000 van de in totaal ongeveer 4250 gasmotoren, is dus kleiner dan 1 MW<sub>e</sub> (statistieken berekend op basis van (CBS, 2013)).

Zoals beschreven in Paragraaf 7.2 zal op basis van de meetcampagnes, naar het zich laat aanzien, een methaan-eis voor kleine aardgasmotoren een beperkt effect sorteren, tenzij deze eis geformuleerd zou worden op een scherper niveau dan 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>. Wegens de hogere reductiekosten voor kleine vermogens, lijkt het stellen van een eis scherper dan 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> niet voor de hand liggend. Vanwege het beperkte effect van een methaan-eis op het niveau van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub>, is het

reductiepotentieel hier niet verder kwantitatief uitgewerkt. Mogelijk dat enkele motoren met een excessief hoge methaanemissie aanwezig zijn in het bestaande park. Middels een eis kan bij deze motoren methaanreductie worden afgedwongen. Een belangrijke reden om methaan-eisen te stellen voor kleine aardgasmotoren zijn mogelijke toekomstige wijzigingen in het gasmotorpark ten gevolge van nieuwe technologie en het mogelijke effect van emissie-eisen, met name voor  $\text{NO}_x$ , op methaanemissies uit kleine gasmotoren. Zoals berekend in Paragraaf 6.1, hebben hoge methaanemissies uit kleine gasmotor-WKK's een sterk negatief effect op de totale  $\text{CO}_2$ -reductie. Daarnaast is het overgrote deel van het gasmotorpark kleiner dan 1 MW<sub>e</sub>, zodat het voornoemde effect mogelijk grote gevolgen heeft voor de totale hoeveelheid methaanemissies. Ondanks dat het bestaande gasmotorpark geen directe aanleiding lijkt te geven om methaan-eisen te stellen, vormt dit een belangrijk motief om in de toekomst toch methaan-eisen te stellen voor kleine gasmotoren.

## 7.5 Conclusie methaan-eis bij biogasmotoren

In het buitenland worden vrijwel geen methaan-eisen aan biogasmotoren opgelegd. Alleen Denemarken kent een methaan-eis, die relatief ruim is. Hoewel er niet veel metingen zijn verricht aan biogasmotoren, is het technisch mogelijk om dit type motoren aan een methaan-eis te laten voldoen. Daarnaast is ongelimiteerde methaanslip van dit type motoren ongewenst en kan in de toekomst, door extra arme afstelling om aan  $\text{NO}_x$ -eisen te voldoen, de methaanemissie toenemen. Daar tegenover staat dat voor een deel van de biogasmotoren onvolledige verbranding de voorkeur heeft boven een veel grotere methaanemissie door natuurlijke vergisting als het biogas niet nuttig wordt aangewend. Ook de wisselende samenstelling van biogas en de matige inventarisatie van de prestaties van biogasmotoren maken dat een methaan-eis vooralsnog niet op een scherp niveau geformuleerd kan worden. Op basis van de huidige inzichten kan men overwegen een methaan-eis te stellen op het niveau van 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> bij 3% O<sub>2</sub> voor nieuwe motoren. Voor deze categorie zal deze eis vrijwel probleemloos haalbaar zijn. Voor de meeste bestaande motoren zal een eis op dit niveau ook haalbaar zijn zonder technische maatregelen te moeten nemen. Voor deze categorie kan een overgangsregeling worden overwogen. Tenslotte is een uitgebreidere inventarisatie van het biogasmotorpark in Nederland en de methaanemissies, ook ten gevolge van andere emissie-eisen, gewenst.

Eis welke het Ministerie kan overwegen voor biogasmotoren

In het buitenland worden vrijwel geen methaan-eisen aan kleine aardgasmotoren opgelegd. Alleen Denemarken kent een methaan-eis voor aardgasmotoren met een minimumvermogen van 120 kW. De eis is relatief ruim. Over het algemeen is de methaanemissie uit kleine aardgasmotoren aanzienlijk lager dan de methaanemissie uit grote aardgasmotoren. De methaanemissie uit kleine aardgasmotoren kan in de toekomst toenemen door een extra lean-burn afstelling van de motoren om aan  $\text{NO}_x$ -eisen te voldoen. Dit effect, gecombineerd met een aanzienlijk aantal kleine aardgasmotoren in Nederland en het negatieve effect van hoge methaanemissies op de  $\text{CO}_2$ -besparing, rechtvaardigt de formulering van een emissie-eis. Overwogen kan worden om een methaan-eis voor kleine aardgasmotoren te formuleren op een gelijk niveau als dat voor grote aardgasmotoren. Overeenkomstig de conclusies in hoofdstuk

Eis welke het Ministerie kan overwegen voor kleine aardgasmotoren

6 is dat dus een eis van  $1200 \text{ mg C/Nm}^3$  bij 3%  $\text{O}_2$ . Voor nieuwe aardgasmotoren zal formulering van een dergelijke eis naar verwachting niet problematisch zijn. Ook voor de meeste bestaande motoren zal een dergelijke eis haalbaar zijn zonder toepassing van technische maatregelen. Tenslotte is het wenselijk om de bestaande, kleine aardgasmotoren uitgebreider te inventariseren ten aanzien van methaanemissies, inclusief inventarisatie van het effect van een lean-burn afstelling om aan aangescherpte  $\text{NO}_x$ -eisen te voldoen. Naast de voornoemde inventarisatie zouden ook emissieprestaties van kleine gasmotoren met een driewegkatalysator (zie Paragraaf 2.2) geïnventariseerd kunnen worden.

# Referenties

- Agritica (2008): *SQ2 rookgasreiniger praktijkrijp*. Nieuwbericht 24 oktober 2008.  
[http://www.agritica.com/show\\_news.asp?v=1&jaar=8&id=11992&lang](http://www.agritica.com/show_news.asp?v=1&jaar=8&id=11992&lang) (laatst bezocht oktober 2012)
- Arcadis (2010): *Assessment of the options to improve the management of bio-waste in the European Union*. Arcadis, Duerne, Belgium, 12 februari 2010.  
Website:  
[http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/pdf/ia\\_biowaste%20-%20ANNEX%20F%20-%20environmental%20assumptions.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/pdf/ia_biowaste%20-%20ANNEX%20F%20-%20environmental%20assumptions.pdf)
- Attainment Technologies (2004): *Emission Solutions For Today*. Attainment Technologies, L.L.C, EPA CHP Partnership, May 2004.  
<http://www.attainmenttech.com/solutions.html#lean> (laatst bezocht maart 2013)
- Austin, A. (2010): *Methane Migraine - Are stringent air quality regulations impeding dairy digester implementation in California?*, Biomass Magazine, January 2010.
- Avesco Swissmotor (2009a): *Erdgas Kompakt-BHKW mit patentierter, geregelter Abgasrückführung*; Biogas Module auf Anfrage. Avesco AG, Langenthal, Zwitserland, op internet in 2009. Website:  
[http://www.avesco.ch/fileadmin/Bilder/Energiesysteme/bhkw/070719\\_bhkw2.1..pdf](http://www.avesco.ch/fileadmin/Bilder/Energiesysteme/bhkw/070719_bhkw2.1..pdf)
- Avesco Swissmotor (2009b): *Avesco Kompakt BHKW 50 - 280 kW elektrische Leistung (Brochure)*. Avesco AG, Langenthal, Zwitserland, op internet in 2009. Website:  
<http://www.avesco.ch/fileadmin/Bilder/Energiesysteme/bhkw/kompakt.pdf>
- Avesco Swissmotor (2012a): *Avesco Kompakt BHKW 30 - 280 kW elektrische Leistung (Brochure)*. Avesco AG, Langenthal, Zwitserland. Website:  
[http://www.avesco.ch/fileadmin/Bilder/Energiesysteme/bhkw/070719\\_bhkw2.1..pdf](http://www.avesco.ch/fileadmin/Bilder/Energiesysteme/bhkw/070719_bhkw2.1..pdf) (laatst bezocht november 2012)
- Avesco Swissmotor (2012b): *Avesco-Blockheizkraftwerke für Klär-/Biogasanlagen (Brochure)*. Avesco AG, Langenthal, Zwitserland. Website:  
[http://www.avesco.ch/fileadmin/Dokumente/News/Energiesysteme/BHKW-MAILING\\_d\\_LOW\\_31.3..pdf](http://www.avesco.ch/fileadmin/Dokumente/News/Energiesysteme/BHKW-MAILING_d_LOW_31.3..pdf) (laatst bezocht november 2012)

- Basel (2012): *Verordnung über die Verschärfung von Emissionsbegrenzungen für stationäre Anlagen. Vom 14. August 1990.* Umweltschutz, Kanton Basel. <http://www.baselland.ch/786-14-htm.294384.0.html> (download november 2012)
- Baxter, L. (2005): *Biomassa impact on SCR catalyst; Technical report.* IEA Bioenergy Task 32, Brigham Young University, Provo, UT, USA, October 2005.
- BFE (2005): *Biogasanlage Reidermoos Energie- und Düngerproduktion.* EnergieSchweiz Bundesamt für Energie BFE, Bern, juni 2005. Website: [http://www.biomasseenergie.ch/Portals/0/1\\_de/01\\_Wie\\_produzieren/Pdf/biogas-reidermoos.pdf](http://www.biomasseenergie.ch/Portals/0/1_de/01_Wie_produzieren/Pdf/biogas-reidermoos.pdf)
- BHKW (2011): *BHKW-Kenndaten 2011 – Module, Anbieter, Kosten.* Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch E.V. Berlin. [http://asue.de/themen/blockheizkraftwerke/broschueren/bhkw\\_kenndaten\\_2011.html](http://asue.de/themen/blockheizkraftwerke/broschueren/bhkw_kenndaten_2011.html) (download november 2012)
- Bining, A (2006): *California Advanced Reciprocating Internal Combustion Engine (ARICE) Program and Collaborative – Status and Update.* 3<sup>rd</sup> Annual Advanced Stationary Reciprocating Engines Meeting, Argonne, 2006. <http://lasersparkpluginc.com/uploads/sp1.pdf> (laatst bezocht oktober 2012)
- BIOX (2006): *Betreft definitieve vergunningaanvraag BIOX krachtens de Wet milieubeheer, de Wet verontreiniging oppervlaktewateren en de Wet op de waterhuishouding. Ten behoeve van de voorgenomen bouw van een terminal en biomassa-installatie op het Sloehavengebied te Vlissingen.* BioX Group B.V., De Bilt, 12 mei 2006.
- Blizman, B.J, D.B. Makel, J.H. Mack, R.W. Dibble (2006): *Landfill Gas Fueled HCCI Demonstration System.* Proceedings of ICEF2006 ASME Internal Combustion Engine Division 2006, Fall Technical Conference, Sacramento, California, USA, November 2006. Website: <http://escholarship.org/uc/item/0qp039sp>
- BluePoint (2005a): Online informatie. Website: [http://www.energysolutionscenter.org/resources/PDFs/GT\\_SP04\\_SmallEngine\\_CHP.pdf](http://www.energysolutionscenter.org/resources/PDFs/GT_SP04_SmallEngine_CHP.pdf)
- BluePoint (2005b): *The Lean-One™; Solving Tomorrow's Energy Needs Today Solving Tomorrow's Energy Needs Today.* BluePoint Energy inc Carson City, NV, USA, 2005. Website: <http://www.energysolutionscenter.org/distgen/AppGuide/DataFiles/BluePoint260Spec.PDF>
- BluePoint (2005c): Online informatie. Website: <http://www.energysolutionscenter.org/distgen/AppGuide/Manf/BluePoint.html>
- BMW (2001): *Technische Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren.* BMW, 2001. <http://www.bmwfj.gv.at/Unternehmen/gewerbetechnik/Documents/Emissionen%20aus%20Stationaermotoren.pdf> (download november 2012)
- BMW (2007): *Technische Grundlage für die Beurteilung van Biogasanlagen.* BMW Oostenrijk, 2007.



- [http://www.lea.at/download/Biogas/TechnischeGrundlageBiogasanlagen\\_BM\\_WA\\_2007.pdf](http://www.lea.at/download/Biogas/TechnischeGrundlageBiogasanlagen_BM_WA_2007.pdf) (laatst bezocht november 2012)
- Boom, T. (2008): *Internationale verkenning aanscherping emissie-eisen WKK installaties*. Concept rapport, InfoMil, 14 maart 2008.
- Brown, D., R. Holtbecker (2007): *Next steps in exhaust emissions control for Wärtsilä low-speed engines*. In Detail Wärtsilä Technical Journal, issue no 1, 2007.  
Website:  
[http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about\\_us/in\\_detail/1\\_2007/indetail1\\_07\\_LR\\_final.pdf](http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/in_detail/1_2007/indetail1_07_LR_final.pdf)
- BTG (2005): *BTG-Factsheet biogas*. Biomass technology group, Enschede, 2005.
- Buck, S. te, B. van Keulen, L. Bosselaar, T. Gerlagh (2010): *Protocol Monitoring Hernieuwbare Energie Update 2010*. AgentschapNL, Ministerie van EZ, Publicatienummer 2DENB1013. Website:  
<http://www.agentschapnl.nl/sites/default/files/bijlagen/Protocol%20Monitoring%20Hernieuwbare%20Energie%20Update%202010%20DEN.pdf> (laatst bezocht januari 2013)
- Buderus (2012): *Warmtekrachtkoppelingen. SES WKK*. Nefit B.V., Deventer, 2012.  
Website: <http://www.buderus.nl/>
- Burgess, J. (2009): *Low Emission Gas Engine Technology*. Cummins Westport, June 2009. Website: <http://divacreative.com/biomethane/downloads/Low-Emission-Bus-Technology-John%20Burgess-Cummins.ppt>
- California (2006a): *Frequently Asked Questions Regarding the Stationary Diesel Engine California Environmental Protection Agency*. Air Resources Board. May 8, 2006.  
Website:  
[http://www.empirecat.com/cm/emissionssolutions/FAQ\\_Stationary\\_Diesel\\_Engines\\_atcmfaq.pdf](http://www.empirecat.com/cm/emissionssolutions/FAQ_Stationary_Diesel_Engines_atcmfaq.pdf)
- California (2006b): *Proposed Emission Reduction Plan for Ports and Goods Movement in California*. California Environmental Protection Agency, 21 maart 2006.  
Website:  
[http://www.arb.ca.gov/planning/gmerp/march21plan/march22\\_plan.pdf](http://www.arb.ca.gov/planning/gmerp/march21plan/march22_plan.pdf)
- California (2012): *Final Regulation Order, amendments to the airborne toxic control measure for stationary compression ignition engines*. Section 93115, effective May 19, 2011. <http://www.arb.ca.gov/diesel/documents/FinalReg2011.pdf> (laatst bezocht november 2012)
- Cargnello, M, J. J. Delgado Jaén, J. C. Hernández Garrido, K. Bakhmutsky, T. Montini, J. J. Calvino Gámez, R. J. Gorte, P. Fornasiero (2012): *Exceptional activity for methane combustion over modular Pd@CeO<sub>2</sub> subunits on functionalized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Science, 10 augustus 2012, Vol. 337 no. 6095 pp. 713-717, DOI: 10.1126/science.1222887
- Caterpillar (2012): *Caterpillar to offer 3500C Tier 3 Marine Power Solutions*. Press release van Augustus 2011. Website:  
[www.cat.com/cda/files/2988453/7/M11PR6.doc](http://www.cat.com/cda/files/2988453/7/M11PR6.doc) (laatst bezocht december 2012)

- CBS (2012): *Hernieuwbare energie in Nederland 2011*. Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag/Heerlen, 2012. ISBN: 978-90-357-1658-2
- CBS (2013): *CBS Statline – Productie en Productiemiddelen Elektriciteit*. <http://statline.cbs.nl/> (laatst bezocht januari 2013)
- CleanAIR (2012): *The CleanAIR PERMIT™ DPF – Catalyzed Particulate Filter for Diesel Engines*, CleanAIR systems, Caterpillar. Website: <http://www.cleanairsys.com/products/filters/index.htm> (laatst bezocht november 2012)
- Coenen J. M., van Gastel, K. de Jong (2004): *Potentieel voor duurzame energie met stortgas uit afvalstorten*. Cogen Projects en Energieprojecten.com in opdracht van SenterNovem, Utrecht, September 2004.
- Couch, P. (2007): *Application of Hydrogen Assisted Lean Operation to a Biogas Engine (BioHALO)*. 4<sup>th</sup> Annual Advanced Stationary Reciprocating Engines Conference, Downey, CA. TIAX Company, September 2007. Website: [http://sites.energetics.com/recips07/pdfs/Day2\\_1pm\\_trackA/Couch\\_TIAX.pdf](http://sites.energetics.com/recips07/pdfs/Day2_1pm_trackA/Couch_TIAX.pdf)
- Credner, M. (2004): *Energetische und wirtschaftliche Analyse des Aufbereitungsverfahrens für Biogas zum Betrieb einer Mikrogastrubine*. Fachhochschule Trier Umwelt Campus Birkenfeld, Birkenfeld. 2004.
- Cummins (2007a): *Low BTU gas generator sets; > 1570-1750 kW | GQ series*. van internet. Website: [www.cumminspower.com](http://www.cumminspower.com) (laatst bezocht december 2012)
- Cummins (2007b): *Lean-burn engine technology increases efficiency, reduces NOx emissions*. Paper written by Keith Packham, Power topic #7009, Cummins Power Generation. Website: <http://cumminspower.com/www/literature/technicalpapers/PT-7009-LeanBurn-en.pdf> (laatst bezocht december 2012)
- Cummins (2009): *Lean-Burn Gas Generator Sets*. Van internet. Website: <http://www.cumminspower.com/en/products/generators/leanburn/> (laatst bezocht december 2012)
- Cummins (2011): *Every Alternative ISL G, Natural gas engines for truck and bus*. Bulletin 4103996, Cummins Westport Inc., 2011. (geraadpleegd december 2012)
- Cummins (2012): *Cummins Particulate Filter - Meeting Low Emissions With The Right Technology*. Website: [http://cumminsengines.com/sites/every/misc/Technology/tier4info/tier\\_4\\_info\\_cpf\\_page](http://cumminsengines.com/sites/every/misc/Technology/tier4info/tier_4_info_cpf_page) (laatst bezocht november 2012)
- Dambrink, K. (2005): *Onderzoek biogas/biodieselmotor met deNO<sub>x</sub>*. Novem ref.: 2020-04-11-14-004. HoSt B.V., Hengelo, 30 december 2005.
- Daniëls, B.W., J.C.M. Farla, L.W.M Beurskens, Y.H.A Boerakker, H.C. de Coninck, A.W.N. van Dril, R. Harmsen, H. Jeeninga, P. Kroon, P. Lako, H.M. Londo, M. Menkveld, A.J. Seebregts, G.J. Stienstra, C.H. Volkers, H.J. de Vries, J.R. Ybema (2006): *Verkenning klimaatdoelstellingen en energiebesparing 2020; Analyses met het Optiedocument energie en emissies 2005*. ECN-C--05-106, Petten, februari 2006.
- Daniëls, B.W., S. Kruitwagen (2010): *Referentieraming energie en emissies 2010-2020*. ECN-E--10-004, april 2010.

- DCL (2012a): *MINE-X SOOTFILTER*. DCL International Inc., brochure van internet  
 Website: <http://www.dcl-inc.com/images/stories/PDF/Products/Product05/00.pdf> (laatst bezocht november 2012)
- DCL (2012b): *DPF Systems for Stationary Engines*. DCL International Inc., presentatie beschikbaar op internet. Website: <http://www.dcl-inc.com/images/stories/PDF/DPFs%20for%20Large%20Stationary%20Engines.pdf> (laatst bezocht november 2012)
- DCL (2012c): *Diesel Particulate Filters for Large Engines*. DCL International Inc..  
 Website: <http://www.dcl-inc.com/products/stationary/diesel-particulate-filters-for-large-engines> (laatst bezocht november 2012)
- DE solutions, (2004): *Clean Distributed Generation Performance and Cost Analysis*. Subcontract Number: 4000026015. DE Solutions, Encinitas, CA, April 2004.  
 Website: <http://www.gulfcoastchp.org/Library/Type?id=Presentations&pageNumber=2>.
- Denemarken (2003): *2. supplement til Luftvejledningen; Grænseværdien for formaldehyd for gasmotorer i Luftvejledningen, vejledning nr. 2 2001 fra Miljøstyrelsen*. Miljøministeriet, Industrikontoret, Journalnr. bedes anført ved besvarelse, J.nr.M 4021-0001, Ref.: ET/9, 30. september 2003. Website: <http://www.mst.dk/NR/rdonlyres/1D18DD3E-CA63-4830-B491-7144DA9ACDCF/0/2aEmissionsgr%C3%A6nsev%C3%A6rdienforformaldehydfor%20gasmotorerfortolkning.pdf>.
- Denemarken (2005): *621 af 23/06 2005. Bek. om begrænsning af emission af nitrogenoxider, uforbrændte carbonhydrider og carbonmonooxid m.v. fra motorer og turbiner*. Status volgens internetsite December 2012: geldende wetgeving. Miljøministeriet, 23 juni 2005. Website: <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=12836&exp=1>
- Dibble, R. (2006): *Landfill Gas Fueled HCCI Demonstration System*. 3<sup>rd</sup> Annual Advanced Stationary Reciprocating Engines Meeting, June 2006, Argonne, IL. Makel Engineering. Website: <http://sites.energetics.com/recips06/Presentations/Dibble.pdf>
- Dieselnet (2006): *Retrofitting America's Diesel Engines: A Guide to Cleaner Air Through Cleaner Diesel*. November 2006. Diesel Technology Forum. Website: [http://www.dieselforum.org/fileadmin/templates/Resources/RetrofitMaterialsFactSheets/Retrofitting\\_America\\_s\\_Diesel\\_Engines\\_11-2006.pdf](http://www.dieselforum.org/fileadmin/templates/Resources/RetrofitMaterialsFactSheets/Retrofitting_America_s_Diesel_Engines_11-2006.pdf)
- Dieselnet (2012): *Emission Standards – USA, Stationary Diesel Engines / Nonroad Diesel Engines*. November 2012, Diesel Technology Forum. Websites: <http://www.dieselnet.com/standards/us/stationary.php>  
<http://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>
- Dijk, C.J. van, J.P. van der Knaap, T.J. Dijkstra, J.J. Hanemaaijer, A.E.G. Tonneijk (2003): *Rookgasschade in beeld Risico's van NO<sub>x</sub> en etheen bij CO<sub>2</sub> dosering uit WKK-installaties*. Nota 255, Plant Research International B.V., Wageningen, juli 2003.
- Dijk, G.H.J. van (2004): *Inventarisatie CH<sub>4</sub>- en NO<sub>x</sub>-emissiereductie voor aardgasmotoren*. RE 2003.R.0612. Gasunie Research, Energy Innovation & Consultancy, Groningen, 17 februari 2004.

- Donaldson (2012): *Donaldson is now offering oxidation catalysts for compressed natural gas engines*. Download brochure:  
<http://www.asia.donaldson.com/en/exhaust/support/datalibrary/1053777.pdf>  
 (laatst bezocht december 2012)
- DTE Energy (2004): *On-Site CHP Energy Systems employ CEGR technology*. Press release from DTE Energy, January 16, 2004. Website:  
<http://news.thomasnet.com/fullstory/29802> (laatst bezocht maart 2013)
- Dueck, Th. A., C.J. van Dijk, F. Kempes, T. van der Zalm (2008): *Emissies uit WKK-installaties in de glastuinbouw. Methaan, etheen en NO<sub>x</sub> concentraties in rookgassen voor CO<sub>2</sub> dosering*. Nota 505, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen, januari 2008.
- Duplessis, N. (2009): *Ventilation air methane oxidation using a VAMOX<sup>tm</sup> system at an active coal mine in the USA*. Biothermica Technologies Inc, Montreal, Canada. Website:  
[http://www.biothermica.com/brochure\\_pdf/vam\\_oxy\\_2009\\_05\\_08.pdf](http://www.biothermica.com/brochure_pdf/vam_oxy_2009_05_08.pdf)
- Dusault, A. (2009): *Difficulties Posed by Air District Permitting Practices for Dairy Methane Digesters in San Joaquin and Sacramento Air Districts*. Memorandum, July 31<sup>st</sup> 2009, Docket 09-IEP-1G. Website: <http://www.energy.ca.gov/>
- EBM (2004): *WKK und Gaskessel; Birseckstrasse, Münchenstein*. Elektra Birseck Münchenstein, Münchenstein. Zwitserland, 2004. Website:  
[http://www.ebm.ch/fileadmin/Bilder/Waerme/W\\_rmekraftkopplung\\_und\\_Gas\\_kessel\\_Birseckstrasse\\_M\\_nchenstein.pdfin](http://www.ebm.ch/fileadmin/Bilder/Waerme/W_rmekraftkopplung_und_Gas_kessel_Birseckstrasse_M_nchenstein.pdfin)
- Elsenbruch, T. (2009): *Formaldehyd-Emissionen Status & Lösungen*. GE Energy. Jenbacher Gasmotoren, 26. Nov. 2009. Website: [http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek\\_Politik\\_und\\_Verwaltung/Bibliothek\\_LLFG/dokumente/KoNaRo/veranstaltungsbeitraege/FG\\_09\\_11\\_26/formaldehyd\\_GEJppt.pdf](http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LLFG/dokumente/KoNaRo/veranstaltungsbeitraege/FG_09_11_26/formaldehyd_GEJppt.pdf) (laatst bezocht maart 2013)
- Energieprojecten (2004): *Gasmotor met katalysator op waterzuivering Köttingen*. Van internet 2004. Website: <http://www.Energieprojecten.com>.
- EPA (2006): *Standards of Performance for Stationary Compression Ignition Internal Combustion Engines*. 40 CFR Parts 60, 85, 89, 94, 1039, 1065, and 1068 [EPA-HQ-OAR-2005-0029, FRL- ] RIN 2060-AM82. 6560-50-p, Environmental Protection Agency. Website:  
<http://www.epa.gov/ttnatw01/nsps/cinsps/cinspspg.html> (laatst bezocht december 2012)
- EPA (2011): *Standards of Performance for Stationary Compression Ignition and Spark Ignition Internal Combustion Engines*. 40 CFR Parts 60, 1039, 1042, 1065 and 1068 [EPA-HQ-OAR-2010-0295, FRL-9319-5] RIN 2060-AP67. Environmental Protection Agency. Website:  
<http://www.epa.gov/ttnatw01/nsps/cinsps/cinspspg.html> (laatst bezocht december 2012)
- EPA (2012): *Nonroad Compression-Ignition Engines – Exhaust Emission Standards*. Code of Federal Regulations: 40 CFR 89.112, 40 CFR 1039.101, 40 CFR 1039.102.  
<http://www.epa.gov/otaq/standards/nonroad/nonroadci.htm> (laatst bezocht november 2012)

- Factor (2003): *Kleiner is besser*. Factor Wärme&Kraft, no 1 2003. Website:  
[http://www.faktor.ch/pdf/1/16\\_17.pdf](http://www.faktor.ch/pdf/1/16_17.pdf)
- Farrauto, R.J. (2012): *Low-temperature oxidation of methane*. Science, 10 augustus 2012, Vol. 337, no. 6095, pp. 659-660, DOI: 10.1126/science.1226310.
- GE Jenbacher (2012): *GE's CLAIR Exhaust After-Treatment System*. Website:  
[http://www.ge-energy.com/products\\_and\\_services/products/gas\\_engines\\_power\\_generation/ges\\_clair\\_exhaust\\_after\\_treatment\\_system.jsp](http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/ges_clair_exhaust_after_treatment_system.jsp) (laatst bezocht december 2012)
- Gélin, P (2009): *Catalytic complete oxidation of methane at low temperature*. CNRS – Lyon University. Presentation at Topsøe Catalysis Forum 2009
- Genesys (2005): *BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht*. Projekt Nr. 46598 Vertrag Nr. 86716, Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Genesys GmbH, Frauenfeld (Zwitzerland) Dezember 2005.
- Granger, P, V.I. Parvulescu (2011): *Catalytic NO<sub>x</sub> abatement systems for mobile sources: form three-way to lean burn after-treatment technologies*. Chemical Reviews, 2011, 111, p 3155-3207.
- Groningen (2006): *Vergunning Wet Milieubeheer, BIOX Vlissingen, locatie Delfzijl*, Gedeputeerde Staten van Groningen, februari 2006.
- Groningen (2007): *Aanvullend besluit vergunning Wet Milieubeheer, BIOX Vlissingen, locatie Delfzijl*, Gedeputeerde Staten van Groningen, Groningen, april 2007.
- Gsgnet (2009): *2009 Global Sourcing Guide*. Uitgebracht door [www.gsgnet.net](http://www.gsgnet.net) en [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com). Website:  
[http://www.gsgnet.net/gsgpdfs/09\\_EmisStandrds.pdf](http://www.gsgnet.net/gsgpdfs/09_EmisStandrds.pdf)
- Haldor Topsøe (2012): *Catalytic oxidation – removing volatile organic compounds*.  
[http://www.topsoe.com/business\\_areas/air\\_pollution\\_control/processes/catalytic\\_oxidation.aspx](http://www.topsoe.com/business_areas/air_pollution_control/processes/catalytic_oxidation.aspx) (laatst bezocht december 2012)
- Haynes, W.M. (2013): *Flammability of Chemical Substances*. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 93rd Edition (Internet Version 2013), CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.
- Hellén, G. (2006): *Hiukkaspäästöjen rajoitustarpeet ja haasteet moottorivalmistajalle*. Göran Hellén is Hoofd van de Wärtsilä Afdeling 'Emission Control'. Gepresenteerd tijdens FINE -teknologiaohjelma päätösseminaari, Tampere-talo, 13 en 14 maart 2006. Website:  
[http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/FINE/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta\\_ja\\_aktivointi/Seminaarit/Paatosseminaari\\_2006/Aineisto/Maanantai/Hellen.pdf](http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/FINE/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Seminaarit/Paatosseminaari_2006/Aineisto/Maanantai/Hellen.pdf)
- Hellén, G. (2007): *Marine Emission Control Technologies by Wärtsilä*. Wärtsilä Green Solutions Seminar, Gothenburg, 26 September 2007.
- Herdin, G.R. (2002): *Standesanalyse des Gasmotors im Vergleich zu den Zukunftstechniken (Brennstoffzellen und Mikroturbine) bei der Nutzung von aus Biomasse gewonnenen Kraftstoffen*. Jenbacher AG, Austria, 2002. Website:  
<http://www.herzo-agenda21.de/PDF/AnalyseGasmotorMitBiomasse.pdf>

[http://www.wartsila.com/Wartsila/sweden/docs/locals/sweden/press/env\\_seminar\\_2007/NO<sub>x</sub>\\_reduction\\_techniques.pdf](http://www.wartsila.com/Wartsila/sweden/docs/locals/sweden/press/env_seminar_2007/NOx_reduction_techniques.pdf)

Hers, J.S., W. Wetzels (2009): *Onrendabele top berekeningen voor nieuw WKK-vermogen 2009*. ECN-E--08-082, Februari 2009.

Humm, O. (2001): *Blockheizkraftwerke Mehr Leistung, weniger Emissionen*. Internet artikel. Website:

<http://www.energie.ch/themen/haustechnik/blockheizkraftwerke/index.htm>  
(laatst bezocht november 2012)

ICF (2007): *Cleaner Diesels: Low Cost Ways to Reduce Emissions from Construction Equipment*. Gemaakt voor U.S Environmental Protection Agency, ICF International, Fairfax, maart 2007. Website:

<http://www.epa.gov/cleandiesel/documents/100r07002.pdf>

IenM (2012): Besluit van 31 oktober 2012 tot wijziging van het Activiteitenbesluit milieubeheer en het Besluit omgevingsrecht en enkele andere besluiten (nieuwe activiteiten, integratie Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties milieubeheer, vereenvoudigingen en reparaties in het Activiteitenbesluit milieubeheer). Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, jaargang 2012, no. 558, 16 november 2012

IMO (2012): *Nitrous Oxides - Regulation 13*. Website:

[http://www.imo.org/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/nitrogen-oxides-\(nox\)-%E2%80%93regulation-13.aspx](http://www.imo.org/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/nitrogen-oxides-(nox)-%E2%80%93regulation-13.aspx) (laatst bezocht december 2012)

InfoMil (1999): *NO<sub>x</sub>-bestrijding bij oude gasmotoren*. InfoMil Nieuwsbrief, nummer 16 december 1999.

InfoMil (2012): *Informatieblad Bems, Werkingssfeer*. <http://www.infomil.nl/> (laatst bezocht november 2012)

InfoMil (2013): *Meten luchtmissies, herleiding van meetgegevens*.

<http://www.infomil.nl/> (laatst bezocht maart 2013).

IPPC (2005): *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. May 2005. Website: <http://eippcb.jrc.es>

Jensen, T.K. (2007): *Faster CHP gas engine start with less emission*. Project summary. Report. File Number : 727-71, Danish Gas Technology Centre 30.09.2007.

Website: [http://www.dgc.eu/publications/pdf/start\\_stop.pdf](http://www.dgc.eu/publications/pdf/start_stop.pdf)

JM (2010): *Emissions Control Products for Stationary Diesel Engines*. van internet, Johnson Matthey, Londen. 2010. Website:

<http://ect.jmcatalysts.com/site.asp?siteid=836&pageid=888&furtherid=945>.

JM (2012): *New NO<sub>x</sub> catalyst gives Chrysler's Dodge ram the edge*. Johnson Matthey, laatst bezocht Oktober 2012.

[http://www.matthey.com/sustainability/sustainability\\_2/sustainability\\_case\\_studies\\_2009\\_10/new\\_nox\\_catalyst](http://www.matthey.com/sustainability/sustainability_2/sustainability_case_studies_2009_10/new_nox_catalyst)

Kanton Zürich (2012): *Vollzug periodische Emissionskontrolle bei stationären Motoren im Kanton Zurich*. Stand 20101221, Baudirektion Kanton Zürich.

[http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/betriebe\\_anlagen\\_bau\\_stellen/feuerungen.html](http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/betriebe_anlagen_bau_stellen/feuerungen.html) (download november 2012)

- Kaufmann, U. (2011): *Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz – Ausgabe 2010*. Dr. Eicher+Pauli AG, Liestal. Publication für die Bundesamt für Energie in Bern. [www.bfe.admin.ch/](http://www.bfe.admin.ch/) (laatst bezocht november 2012)
- KEMA (2007): *Overzichtsrapportage emissieonderzoek methaanemissies bij gasmotoren op continu vollast – juli 2007*. Auteurs H.J. Olthuis & P.A.C. Engelen, 50792926-TOS/TCM 07-7080. KEMA, Arnhem, 4 September 2007.
- KEMA (2009): *Overzichtsrapportage vervolgonderzoek methaanemissies bij gasmotoren op continu vollast - voorjaar 2009*. Auteur: P.A.C. Engelen, 50964183-TOS/TCM 09-6715. KEMA, Arnhem, 3 november 2009.
- KEMA (2010): *Vervolgonderzoek gasvormige emissies bij gasmotoren op continu vollast - meetresultaten 31e motor bij HB Energy te Honselersdijk*. Auteur: H.J. Olthuis., 50964225-TOS/TCM 10-5677, KEMA, Arnhem, 28 januari 2010. Rapport beschikbaar via: <http://www.rwsleefomgeving.nl/onderwerpen/broeikasgassen/wkk-installaties/> (laatst bezocht januari 2013)
- KEMA (2011): *Hydrocarbon emissions from gas engine CHP-units 2011 measurement program*. Auteur: G.H.J. van Dijk, 74100741-GCS 12-1002 (anonymized report). KEMA, Groningen, 28 Juni 2012. Rapport beschikbaar via: <http://www.rwsleefomgeving.nl/onderwerpen/broeikasgassen/wkk-installaties/> (laatst bezocht januari 2013)
- Kjemtrup, N. (2009): *Future emission control for marine vessels*. Gepresenteerd tijdens Topsøe Catalysis Forum, 27/28 September 2009. Website: [http://www.topsoe.com/sitecore/shell/Applications/~/\\_media/PDF%20files/Topsøe\\_Catalysis\\_Forum/2009/Kjemtrup.ashx](http://www.topsoe.com/sitecore/shell/Applications/~/_media/PDF%20files/Topsøe_Catalysis_Forum/2009/Kjemtrup.ashx)
- KIWA (2008): *Analyse van biogassen uit vergistingsinstallaties*. KIWA, 2 September 2008. GT-080142.
- Knook (2008): *Typegoedkeuring voor KNOOK SQ2 rookgasreiniger door Interpolis*. Nieuwsbericht Knook Energy Solutions International BV, Hoofddorp, 08 september 2008. Website: [http://www.kesi.nl/cms/index.php?option=com\\_content&view=article&id=11&Itemid=14](http://www.kesi.nl/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=14)
- Knook (2012): *Binnenkort levert Knook ook een methaankatalysator*. Knook Energy Solutions International BV, Hoofddorp. Website: [http://www.kesi.nl/cms/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5&Itemid=8](http://www.kesi.nl/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=8) (laatst bezocht december 2012)
- Kristensen, P.G., B. Karll, G. Horstmann (2001): *Reduction of emissions from lean-burn gas engines through regenerative incineration and SNCR*. Danish Gas Technology Centre. Proceedings of the International Gas Research Conference, Pages: IUO18/1-IUO18/13, 2001. ISSN: 0736-5721.
- Kroon, P., W. Wetzels, (2008): *Onderbouwing actualisatie Bees B; Kosten en effecten van de voorgenomen wijziging van het besluit emissie-eisen stookinstallaties B*. ECN-E--08-020, ECN, Petten, April 2008.

- Kroon, P., P. Lako, J.A.Z. Pieterse, (2009): *Technologieverkenning. Kansrijke nieuwe technieken voor minder emissies naar de lucht in 2030*. ECN-E--09-047, ECN, Petten, Juni 2009.
- Lebbe, Y. (2008): *(μ)-WKK voor residentieel gebruik; Hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling : haalbaarheid en rendabiliteit*. Onderdeel van de cursus Opleiding 'Energieadviseurs' 2007-2008, Brussel, 7 januari 2008.  
Website: [http://www.curbain.be/download/09\\_4\\_Cogen\\_nl.pdf](http://www.curbain.be/download/09_4_Cogen_nl.pdf)
- MAN (2001): *Very Large Diesel Engines for Independent Power Producers and Captive Power Plants*. MAN Diesel, Copenhagen, 2001. Website:  
<http://www.new4stroke.com/large.pdf>
- MAN (2003): *Emission Control MAN B&W Two-stroke Diesel Engines*. MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark.
- MAN (2009): *Two-stroke Low Speed Diesel Engines for Independent Power Producers and Captive Power Plants*. MAN Diesel, Copenhagen, May 2009. Website:  
[http://www.mandieselturbo.com/files/news/files\\_of11743/tech\\_paper\\_low%20speed.htm.pdf](http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of11743/tech_paper_low%20speed.htm.pdf)
- MAN (2012): *MAN Diesel & Turbo has launched the world's first marine engine that meets the IMO's strictest Tier III emission standards*. Bericht op internet van 28 maart 2011. <http://www.dieselnets.com/news/2011/03man.php> (laatst bezocht december 2012)
- Matsui, T, M. Hondo, A. Machino, K. Yokoyama, H. Sasaki, Y. Taniguchi, S. Matubayashi, K. Nishimoto, T. Nakazono (2001): *NO<sub>x</sub> storage reduction catalyst system for lean-burn gas engines*. Rapport op internet.  
[www.kgu.or.kr/download.php?tb=bbs\\_017&fn=Rcp30.pdf](http://www.kgu.or.kr/download.php?tb=bbs_017&fn=Rcp30.pdf) (laatst bezocht oktober 2012)
- MEGTEC (2010): *VOCSIDIZER<sup>tm</sup> Regenerative thermal VOC oxidation*. MEGTEC, brochure van internet in 2010. Website:  
[http://www.megtec.com/documents/UK\\_Vocsidizer.pdf](http://www.megtec.com/documents/UK_Vocsidizer.pdf)
- Nellen, C., K. Boulouchos, (2000): *Natural Gas Engines for Cogeneration: Highest Efficiency and Near-Zero Emissions through Turbocharging, EGR and 3-way Catalytic Converter*. I.C. Engines and Combustion Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich, SAE paper 2001-01-2825, oktober 2000.
- NERI (2010): *Denmark's National Inventory Report 2008; Emission Inventories 1990-2008 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. NERI Technical Report No. 667, 2008. Website:  
<http://www2.dmu.dk/Pub/FR784.pdf>
- Nielsen, M., O.K. Nielsen & Thomsen, M. (2010): *Emissionskortlægning for decentral kraftvarme, Energinet.dk miljøprojekt nr. 07/1882. Delrapport 5. Emissionsfaktorer og emissionsopgørelse for decentral kraftvarme, 2006*. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. April 2010.  
Website: <http://www2.dmu.dk/pub/fr781.pdf> (laatst bezocht december 2012)
- NHO (2012): *The Business Sector's NO<sub>x</sub> Fund*. Website:  
<http://www.nho.no/nox/english/> (laatst bezocht december 2012)



- Nussbaumer, T. (2010): *Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels on Particulate Matter (PM)*. Verenum, Zurich/ Lucerne University of Applied Sciences. Presentatie tijdens de Expert Group on Techno-Economic Issues, EGTEI, Meeting Zurich, 3 februari 2010.
- Parks, J., J. Tassitano, J. Storey (2005): *Lean NO<sub>x</sub> Trap Catalysis: NO<sub>x</sub> Reduction for Lean Natural Gas Engine*. Oak Ridge National Laboratory. 2nd Annual Advanced Stationary Reciprocating Engines Conference, Diamond Bar, CA, March 15-16, 2005.
- Pieterse, J.A.Z., R.W. van de Brink (2006): *Selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> in real exhaust gas of gas engines using unburned gas – catalyst deactivation and advances toward long-term stability*. Report of ECN, February 2006. ECN-RX--06-053.
- Plage, F. (2007): *Onderzoeksverslag 'Schone motor voor de binnenvaart'*. Projectgroep 2, afdeling werktuigbouw, Hogeschool Rotterdam, 1 februari 2007. Website: <http://www.bartdijkman.nl/werktuigbouwkunde/ENH%20-%20Onderzoeksverslag%20-%20PRG%20%20-%20Vdef.pdf>.
- Roser, R. (2005): *Ultra-Clean Engine Based CHP*. BluePoint Energy, Inc., 2nd Annual Advanced Stationary Reciprocating Engines Conference, Diamond Bar, CA, March 16, 2005. Website: <http://events.energetics.com/recip05/pdfs/presentations/rosier.pdf>.
- Ruch, D. (2005): *BHKW-Optimierung und SCR Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht*. In opdracht van Bundesamt für Energie, Genesys GmbH, Frauenfeld, December 2005.
- S&L Energieprojekte (2013): *Technische Daten S&L Erdgas motoren bis 1225 kW*. <http://www.sl-energie.com/index.php?id=2> (laatst bezocht maart 2013)
- Sacramento (2012): *Sacramento Municipal Air Quality Management District*. <http://www.airquality.org/> (laatst bezocht November 2012)
- San Joaquin (2012): *San Joaquin Valley Air Pollution Control District*. <http://www.valleyair.org/Home.htm> (laatst bezocht november 2012)
- Sapoundjiev, H. (2004): *CH4MIN Technology A Sustainable Energy Solution for Destruction of Dilute Methane Emissions and the Production of Useful Energy*. Catalytic Solutions for Vents, Fugitives and Incomplete Combustion Emissions, Calgary, Canada, 1 april 2004.
- Sapoundjiev, H., J. Gilles (2005). *Introduction of catalytic flow-reversal reactor (CH4MIN) technology and its potential in China coal mines*. CANMET Energy Technology Centre, Varennes, Québec, Canada. 2005. Website: <http://www.coalinfo.net.cn/coalbed/meeting/2203/papers/coal-mining/CM051.pdf> (laatst bezocht december 2012)
- SCAQMD (2012): *Rule 1110.2 - Emissions from Gaseous- and Liquid-Fueled Engines*. SCAQMD South Coast Air Quality Management District, Diamond Bar, California, Amended September 7, 2012. Website: <http://www.aqmd.gov/rules/rulesreg.html>
- Schmidt, E. (2007) Diesel Emissions Control Systems, Donaldson, September 19 2007.

- Schneeberger, L. (2006): *Biogas - eine alternative Energiequelle mit Zukunft*.  
Maturaarbeit von Lucius Schneeberger, Klasse 1c, Gymnasium Köniz-  
Lerbermatt, 14. September 2006. Website:  
[http://www.biomasseenergie.ch/Portals/0/1\\_de/01\\_Wie\\_produzieren/Pdf/bio\\_gas-reidermoos.pdf](http://www.biomasseenergie.ch/Portals/0/1_de/01_Wie_produzieren/Pdf/bio_gas-reidermoos.pdf)
- Scholz, C.M.L. (2007): *NO<sub>x</sub> storage and reduction over a lean-burn automotive catalyst*.  
Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- Sklorz, M., et al. (2003): *Katalysatoren an Biogasmotoren; Schlussbericht Untersuchungen zum Einsatz von Oxidationskatalysatoren an landwirtschaftlichen Biogas-Verbrennungsmotoren*. Nr. 182,  
www.lfu.bayern.de, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg,  
oktober 2003.
- Smekens, K.E.L., et al. (2010, in voorbereiding): *Actualisatie Optiedocument 2009: opties voor het verminderen van broeikasgas- emissies, energiegebruik en luchtverontreiniging*. ECN, Petten.
- Smit, P.X., N.J.A. van der Velden (2008): *Energiebenutting warmtekrachtkoppeling in de Nederlandse glastuinbouw*. Rapport 2008-019, Mei 2008, LEI, Den Haag.  
<https://www.wageningenur.nl/en/Publications.htm?publicationId=publication-way-333636393139>
- SMK (2007): *Certificatieschema Groen Label Kas*. GLK.8-2007, Stichting Milieukeur, Den Haag, ingaande 24 oktober 2007. Website:  
[http://www.milieukeur.nl/upload/schema/glkschema\\_nl8.pdf](http://www.milieukeur.nl/upload/schema/glkschema_nl8.pdf)
- SMK (2010): *Certificatieschema Groen Label Kas; datum van ingang: 1 maart 2010; geldig tot: 1 januari 2011*. Code: GLK.9-2010, Stichting Milieukeur, Den Haag, 2009. Website:  
[http://www.smk.nl/files/categories/5/545/GLKSCHEMA\\_NL9%20versie%202010-2%20010310.pdf](http://www.smk.nl/files/categories/5/545/GLKSCHEMA_NL9%20versie%202010-2%20010310.pdf)
- SMK (2012): *Certificatieschema Groen Label Kas; datum van ingang: 1 januari 2013; geldig tot: 1 januari 2014*. Code: GLK.10-2013, Stichting Milieukeur, Den Haag, 2012. Website:  
<http://www.smk.nl/files/categories/5/545/certificatieschema%20GLK%2010%202013.pdf>
- Soltic, P., D. Edenhauer, A. Winkler (2008): *Energetische Optimiering von Biogas - BHKW'S; Schlussbericht*. EMPA, Dübendorf, 10 juli 2008. Website:  
<http://www.bfe.admin.ch/>
- Stachowitz, R.W., D.E. Watson, D.M. Newbury (2005): *Design and Development of Waukesha's Stoichiometric, Cooled EGR Engine for the California ARICE Program*. ASME 2005 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, September 11-14, 2005, Canada, paper no ICEF2005-1329, pp 609-619.
- Stowa (2005): *Potentieel voor Duurzame Energie met Biogas uit Rioolwaterzuiveringsinstallaties*. Rapport W03 2005, ISBN 90.5773.291.2, Stowa, Utrecht, 2005.

- Stowa (2011): *Optimalisatie WKK en Biogasbenutting*. 2011, Rapport 33, ISBN 978.90.5773.549.3. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Tai, C., T. Reppert, J. Chiu, L. Christensen, K. Knoll, J. Stewart, A. Williams (2006): *US10 Capable Prototype Volvo MG11 Natural Gas Engine Development: Final Report*. 2003-2006, NREL/SR-540-40756, October 2006.
- Tallner, L. (1993): *Produktion und Nutzung von Deponiegas*. (Stand 1993 aber immer noch aktuell), Diplomarbeit Fachhochschule Nordostniedersachsen, 1993. Websites: <http://lotal.heim.at/dgas/index-d.htm>; <http://www.fh-wolfsburg.de/cms/de/pws/wilhelms/downloads/et-fohlen-verbrennungsmotoren.pdf>
- Thompson, J. Stewart, A (2003): *Diesel Engine Retrofit Cost*. AM/7, Memo voor Caroline Garber, March 17, 2003. Website: [http://dnr.wi.gov/air/pdf/attach5\\_final\\_WI\\_diesel\\_retrofit\\_tech\\_cost\\_analysis.pdf](http://dnr.wi.gov/air/pdf/attach5_final_WI_diesel_retrofit_tech_cost_analysis.pdf)
- Tiangco, V. (2007): *Research, Development & Demonstration of Advanced Bioenergy Concepts in California*, Presentation for California Biomass Collaborative 4<sup>th</sup> Forum, March 27-28 2007. Obtained via: [www.energy.ca.gov](http://www.energy.ca.gov)
- TIAX (2006): *Application of Hydrogen Assisted Lean Operation to Natural Gas-Fueled Reciprocating Engines (HALO)*. Report for project contract DE-FC26-04NT42235 for US DoE, January 2006. Website: <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/885936-5UDKxt/885936.pdf>
- Toll Customs (2012): *Excise duty on emissions of NO<sub>x</sub> 2012*. English Translation of Circular no. 14/2012 S, Oslo, 1 January 2012. Website: [http://www.toll.no/templates\\_TAD/Article.aspx?id=219620&epslanguage=en](http://www.toll.no/templates_TAD/Article.aspx?id=219620&epslanguage=en) (laatst bezocht december 2012)
- Toom, B. den (2009): *Duurzame energieopwekking in Zwembaden; Structurele kostenverlaging en 'groen' imago*. ISSO ThemaTech april 2009. Website: [http://www.unica.nl/documenten/publicaties/\\_imago.pdf](http://www.unica.nl/documenten/publicaties/_imago.pdf) (laatst bezocht maart 2013)
- Tower, P. (2003): *New Technology for Removal of Siloxanes in Digester gas Results in lower Maintenance Costs and air Quality Benefits in Power Generation Equipment*. Applied Filter Technology. Snohomish, WA, USA, WEFTEC 03 78th Annual Technical Exhibition and Conference, October 11-15, 2003. Website: <http://www.appliedfiltertechnology.com/Userfiles/Docs/WEFTEC03AFTSAG.pdf>
- VAR (2009): *Bouw gft-vergistinginstallatie afgerond*. VAR B.V., Wilp-Achterhoek, In VAR Magazine voorjaar 2009.
- VDMA (2011a): *Exhaust Emission Legislation Diesel- and Gas engines*. VDMA Engines and Systems, Frankfurt am Main, November 2011. Website: [http://www.cimac.com/cimac\\_cms/uploads/explorer/Working%20groups/broschuere\\_2011\\_en.pdf](http://www.cimac.com/cimac_cms/uploads/explorer/Working%20groups/broschuere_2011_en.pdf) (laatst bezocht december 2012)
- VDMA (2011b) : *Abgasgesetzgebung Diesel- und Gasmotoren*. VDMA e.V., Motoren und Systeme, Frankfurt am Main, November 2011. Website: <http://vdma->

- [motoren.de/sites/www.vdma-engines.com/files/emi\\_2011\\_teil2\\_stationaer\\_1.pdf](http://motoren.de/sites/www.vdma-engines.com/files/emi_2011_teil2_stationaer_1.pdf) (laatst bezocht december 2012)
- Vermeulen, P.C.M. (2012): *Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw*, KWIN edities 20 (2008), 21 (2010) en 22 (2012-2013). Wageningen UR Glastuinbouw.
- Vreuls, H.H.J.; P.J. Zijlema (2011): *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO<sub>2</sub>-emissiefactoren, versie Januari 2011*. 20 Januari 2011, AgentschapNL, Utrecht.
- VROM (1998): *Besluit emissie-eisen stookinstallaties milieubeheer B*. Staatsblad 1998, nr. 166, 18 maart 1998.
- VROM (2008): *Ontwerp-Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties milieubeheer*. Tweede Kamer, vergaderjaar 2008-2009, 29 383, nr. 119, 9 december 2008.
- VROM (2009a): *Meerjarenprogramma herijking van de VROM-regelgeving; Nr. 134 Lijst van vragen en antwoorden inzake het Ontwerp-Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties milieubeheer*. Tweede Kamer, vergaderjaar 2008-2009, 29 383, nr. 134, 15 juli 2009.
- VROM (2009b): *Besluit van 7 december 2009, houdende nieuwe regels voor de emissie van middelgrote stookinstallaties (Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties milieubeheer)*. Staatsblad 2009, nr. 547, 24 december 2009.
- Vronay, J.C. (2007): *Challenges Facing Developers of Air/Fuel Ratio Control Systems for or High Speed, Spark-Ignited, Stationary Reciprocating Engines Fitted with NSCR Systems*. Continental Controls Corporation. 4th Annual Advanced Stationary Reciprocating Engines Conference, Downey, California, 18-19 September 2007. Website: <http://sites.energetics.com/recips07/index.shtml>
- Wärtsilä (2012): *Wärtsilä RT-flex50 Technology Review*. Brochure uit 2008. [www.wartsila.com](http://www.wartsila.com) (laatst bezocht december 2012)
- West, J. (2006): *MAN Diesel Engines for Power Generation*. MAN Unlimited. Annual Customer Conference, October 18<sup>th</sup> & 19<sup>th</sup>, 2006, Dublin.
- Wetzels, W., I. Blezer, J.M. Sipma (2011): *Beleidsstudie naar WKK- en warmtepomptechnologieën. Eindrapport 21 juni 2011*. ECN-E--10-096, 21 juni 2011.
- Widmann, B.A., et al. (2002): *Pflanzenölbetrieben Blockheizkraftwerke; Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen Schwachstellenanalyse und Bewertung*. Abschlussbericht 176, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg, Juli 2002.
- Wit, J. de, K. Johansen, P.L. Hansen, H. Rossen, N.B. Rasmussen (2000): *Catalytic emission control with respect to CH<sub>4</sub> and CO for highly efficient gas fueled decentralized heat and power production*. Paper at the 5<sup>th</sup> International Conference on Furnaces and Boilers (INFUB), Porto, Portugal, April 2000.
- Wit, J. de, I. Mofid. (2005): *Methane Oxidation Catalyst for Gas Engines*. Danish Gas Technology Centre, Hørsholm, 2005. Project report, ISBN 87-7795-298-7. <http://www.dgc.eu/publications/pdf/catalyst.pdf> (laatst bezocht december 2012)

Yao, M. (2009): *Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines*. Progress in Energy and Combustion Science, 35, p. 398-437, 2009.

Zürich (2012): *Emissionsgrenzwerte Stationäre Verbrennungsmotoren*. Stadt Zürich, Umwelt- und Gesundheitsschutz. [http://www.stadt-zuerich.ch/content/gud/de/index/umwelt/luft/feuerungen/stationaere\\_verbre nnungsmotoren.html](http://www.stadt-zuerich.ch/content/gud/de/index/umwelt/luft/feuerungen/stationaere_verbre nnungsmotoren.html) (download november 2012)

# Bijlage A. Afkortingen & Omrekeningen

bhp = brake horsepower. Bij motoren: eenheid voor output-vermogen oftewel het asvermogen. Omrekening:  $1 \text{ bhp} = 745,70 \text{ W}$  (Bron: Handbook of Chemistry and Physics).

bhp-hr = brake horsepower-hour. Bij motoren: eenheid voor energie als kinetisch output. Omrekening:  $1 \text{ bhp-hr} = 745,70 \text{ W}/1000 = 0,746 \text{ kWh} = 2,685 \text{ MJ}$

EGR = Exhaust Gas Recirculation oftewel rookgas recirculatie. Technologie waarbij (een deel van) het rookgas/uitlaatgas van de motor wordt gemengd met de verbrandingslucht en opnieuw door de verbrandingsmotor gaat, zie ook Paragraaf 2.2.

Standaard omrekening:  
g/bhp-hr

g/bhp-hr = gram per brake horsepower-hour; eenheid voor emissie. Omrekeningen van g/bhp-hr naar g/GJ zijn bij benadering gegeven om een grootte-orde van emissies aan te geven; bij de omrekening speelt namelijk het rendement van de motor een rol, welke onbekend is en varieert van motor tot motor. Tenzij anders aangegeven, is een motorrendement van 40% verondersteld (zie ook Paragraaf 1.2). Standaard omrekening in dit rapport:  $1 \text{ g/bhp-hr} = 1/((745,70 \text{ W}/40\%) \times 3600 \text{ sec}) = 149,00 \text{ g/GJ}$ . Indien met andere motorrendementen is gerekend, dient men in voorgaande omrekening 40% te vervangen door het aangegeven motorrendement.

Standaard omrekening:  
g/kWh

g/kWh = gram per kilowatt hour; eenheid voor emissie. De omrekening van g/kWh naar g/GJ brandstofverbruik is uitgevoerd om een grootte-orde van de emissies aan te geven. Bij de omrekening speelt namelijk het motorrendement een rol en deze varieert van motor tot motor; een motorrendement van 40% is verondersteld (zie ook Paragraaf 1.2). Voor de omrekening van  $\text{g/kWh}_{\text{output}}$  naar  $\text{g/GJ}_{\text{input}}$  is dus vermenigvuldigd met  $1000/3,6 \times 40\%$ . Indien met andere motorrendementen is gerekend, dient men in voorgaande omrekening 40% te vervangen door het aangegeven motorrendement.

kWh = kilowatt hour; eenheid voor energie. Bij motoren is dit meestal kinetisch output, zie ook Paragraaf 1.2. Omrekening:  $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$  (Bron: Handbook of Chemistry and Physics).

LHV = Lower Heating Value oftewel de onderste verbrandingswaarde. Bij deze verbrandingswaarde wordt, in tegenstelling tot de bovenste verbrandingswaarde, de mogelijke condensatiewarmte van het rookgas genegeerd.

ppm(vd) = parts per million (volumetric dry); eenheid voor emissies, zie ook Paragraaf 1.2.

SCR = Selective Catalytic Reduction. Technologie waarbij  $\text{NO}_x$  wordt gereduceerd met behulp van een katalysator. Als reductiemiddel wordt veelal urea gebruikt.

THC = total hydrocarbons oftewel de totale hoeveelheid onverbrande koolwaterstoffen (zie ook UHC).

UHC = unburned hydrocarbons oftewel de totale hoeveelheid onverbrande koolwaterstoffen (zie ook THC).





# Bijlage C. Commentaar van PlaGaMo

Commentaar van Platform Gasmotoren (PlaGaMo), vertegenwoordigd door dhr. Stijn Schlatmann (Energy Matters) en dhr. Jacob Klimstra (Jacob Klimstra Consultancy). Er is commentaar ontvangen 25 februari 2013 en op 12 maart 2013 via het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. Een samenvatting van de hoofdpunten is hieronder weergegeven.

## **PlaGaMo merkt ten aanzien van een NO<sub>x</sub>-eis bij gasmotoren op aardgas < 2,5 MW<sub>th</sub>**

### **op:**

- De toepassing van SCR is te duur voor deze categorie motoren en wordt momenteel alleen maar toegepast voor CO<sub>2</sub> bemesting in de glastuinbouw. De kosten voor NO<sub>x</sub>-bestrijding liggen hoger dan alhier geciteerd, in de orde van 10 €/kg en hoger.
- De toepassing van een driewegkatalysator is alleen geschikt voor stoichiometrische gasmotoren en is daarmee ongeschikt voor gasmotoren waarbij een hoog elektrisch rendement wordt nagestreefd. Een hoog elektrisch rendement wordt namelijk gerealiseerd middels toepassing van lean burn technologie bij gasmotoren. Juist een hoog elektrisch rendement kent veel toepassing in Nederland.
- Andere methoden voor NO<sub>x</sub>-reiniging of warmte-kracht aandrijving zijn niet gangbaar of commercieel beschikbaar. Daaronder vallen rookgasrecirculatie (in combinatie met een driewegkatalysator) en de SQ2 rookgasreiniger, die beide voor de grotere gasmotoren alleen in proefopstellingen zijn toegepast met overwegend onbevredigend resultaat.
- De huidige Bems-eis is een waarde die scherp is voor de gangbaar geleverde gasmotoren. Met deze eis zit Nederland aan de onderkant van de range van emissie-eisen die wereldwijd worden gehanteerd. Aanscherping is op dit moment niet mogelijk.

### **Reactie ECN:**

- De geciteerde kosten zijn 15-25 €/kg NO<sub>x</sub> waarbij als referentie de Bems-wetgeving dient. Alleen indien de oude Bees B-wetgeving als referentie dient (wat voor bestaande motoren nog van toepassing is), zijn de reductiekosten 5-10 €/kg NO<sub>x</sub>, afhankelijk van het motorvermogen. Er is in een eerder stadium reeds kennis genomen van de kosteninschatting volgens PlaGaMo.
- Zoals eerder beschreven kan het Ministerie kan een NO<sub>x</sub>-eis van 140 mg/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>) overwegen voor deze categorie motoren. Dit is enigszins soepeler dan het initiële voorstel; nageschakelde techniek zal, ook bij dit voorstel, veelal noodzakelijk zijn om aan deze eis te voldoen. Er wordt echter wel ruimte gecreëerd om met meerdere typen nageschakelde technologie deze eis te realiseren, inclusief de goedkopere driewegkatalysator. De warmte-kracht verhouding behorend bij stoichiometrische gasmotoren, ligt inderdaad anders dan bij lean burn motoren. Toepassing van gekoelde rookgasrecirculatie kan deze wel verbeteren.

- In het rapport is omschreven wat de status is van de overige technieken voor NO<sub>x</sub> reiniging of warmte-kracht aandrijving; diverse methoden bevinden zich inderdaad in de demonstratiefase. In het bijzonder voor driewegkatalysatoren, al of niet in combinatie met rookgasrecirculatie, wordt verwezen naar het betreffende hoofdstuk, alwaar diverse referenties omtrent de beschikbaarheid van deze technologie zijn gegeven.

**PlaGaMo merkt ten aanzien van een NO<sub>x</sub>-eis bij gasmotoren op biogas op:**

- Voor aanscherping van de NO<sub>x</sub>-emissie-eis is een SCR nodig. Deze zijn zeer gevoelig voor verontreinigingen; er zijn reinigingstechnologieën beschikbaar, maar die zijn onvoldoende betrouwbaar. Actief kool is relatief betrouwbaar maar leidt tot onacceptabel hoge kosten. De overige technologieën worden nog nergens op de schaal van Nederlandse WKK's commercieel toegepast.
- Aanscherping van emissie-eisen voor biogasmotoren < 1 MW<sub>e</sub> zal het economisch plaatje voor dit type installaties nog onaantrekkelijker maken.
- De huidige Bems-eis is een waarde die scherp is voor de gangbaar geleverde gasmotoren. Met deze eis zit Nederland aan de onderkant van de range van emissie-eisen die wereldwijd worden gehanteerd. Het is zeer twijfelachtig of de aangekondigde eis in Californië technisch haalbaar is, omdat toepassing van vergistingsgas in gasmotoren nauwelijks plaatsvindt. Duitsland is toonaangevend voor biogasmotoren en daar vindt de meeste technologieontwikkeling plaats. Het voorstel is dan ook om de Duitse wetgeving te volgen.

**Reactie ECN:**

- Er wordt verwezen naar het betreffende hoofdstuk waar de gasreinigingstechnologie is beschreven en ook kostencijfers zijn opgenomen. De kosten liggen in een range welke niet op voorhand als onacceptabel kan worden bestempeld. Daarnaast wordt opgemerkt dat biogasmotoren in aanmerking komen voor subsidie om een terugverdientijd te garanderen; de subsidiabele kosten dienen aangepast te worden indien de emissie-eisen inderdaad aangescherpt worden, zodanig dat de gehanteerde terugverdientijd gegarandeerd blijft.

**PlaGaMo merkt ten aanzien van een Fijnstof-eis bij dieselmotoren op:**

- De genoemde reductietechnologie is niet gangbaar of commercieel beschikbaar.
- De voorgestelde emissie-eis geldt niet voor grote motoren in de VS en is scherper dan de eis in Duitsland. Voorgesteld wordt om niet de emissie-eisen in de VS als uitgangspunt te nemen, wegens andere marktomstandigheden aldaar, maar de Duitse regelgeving, dat is de TA-Luft. De Duitse markt is leidend in Europa en dit leidt tot een beter level playing field.

#### Reactie ECN:

- Er wordt verwezen naar het betreffende hoofdstuk waar de beschikbaarheid van de noodzakelijke filters is beschreven. Ook wordt gewezen op het advies omtrent de inwerkingstrededatum en niet vooruit te lopen op Amerikaanse wetgeving. De genoemde reductietechnologie zal namelijk tegen die tijd zeer ruimschoots beschikbaar zijn.
- De voorgestelde eis is 15 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>), terwijl de Duitse eis 22,5 mg fijnstof/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>) betekent. Het verschil tussen beide eisen is zeer beperkt.

#### PlaGaMo merkt ten aanzien van een NO<sub>x</sub>-eis bij (bio)dieselmotoren op:

- Veel fabrikanten van grote dieselmotoren werken aan LNG/aardgas-gedreven motoren in plaats van dieselmotoren om aan Tier eisen te kunnen voldoen. Er zijn echter situaties waar gas als brandstof niet mogelijk is. De voorgestelde eis biedt geen ruimte voor het toepassen van dieselmotoren in dergelijke situaties. Gezien de kosten verbonden aan dieselolie zullen dergelijke motoren alleen sporadisch toegepast worden. Het opleggen van belemmerende eisen aan deze kleine categorie resulteert nauwelijks in emissiereductie.
- Voorgesteld wordt om niet de emissie-eisen in de VS als uitgangspunt te nemen, wegens andere marktomstandigheden aldaar, maar de Duitse regelgeving, dat is de TA-Luft. De Duitse markt is leidend in Europa en dit leidt tot een beter level playing field.

#### Reactie ECN:

- Het reductiepotentieel is ingeschat en is, zoals beschreven in het betreffende hoofdstuk, relatief beperkt. Het is technisch echter mogelijk aan een eis van 250 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> (bij 3% O<sub>2</sub>) te voldoen. Niet duidelijk is waarom deze eis belemmerend zou werken voor deze categorie. De motoren die worden aangemerkt als noodvermogen worden op grond van het jaarlijkse aantal vollasturen reeds uitgesloten van eisen in de bestaande wetgeving.

#### PlaGaMo merkt ten aanzien van een Methaan-eis bij gasmotoren ≥ 2,5 MW<sub>th</sub> op aardgas op:

- Het CO<sub>2</sub> equivalent van de totale methaan emissie wordt door ECN geschat op 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq. Uitgaande van recente cijfers komt PlaGaMo op een emissie van 0,66 Mton CO<sub>2</sub>-eq voor de 3000 MW<sub>e</sub> in de tuinbouw en 0,8 Mton CO<sub>2</sub>-eq voor het totaal opgestelde vermogen (ca. 3600 MW<sub>e</sub>). Hierbij is uitgegaan van een gewogen gemiddelde emissie op basis van de meetrappen van KEMA en een afname van het aantal draaiuren tot ca 3000.
- De berekeningen in “*Methaanslip bij WKK-gasmotoren vernietigt aanzienlijk deel van de CO<sub>2</sub>-reductie*” in paragraaf 6.1 zijn zeer gevoelig voor uitgangspunten. Uitgaande van een moderne, grote gasmotor met 43% E-rend en 49% W-rend wordt de CO<sub>2</sub>-besparing 28,4%, 17,6% respectievelijk 14,9%. Als in plaats van een STEG, het gemiddelde Nederlandse elektriciteitspark als referentie wordt gehanteerd, resulteert dit in een CO<sub>2</sub>-besparing van 37,8%, 28,5% respectievelijk 26,1%. Bij toepassing van een kolencentrale als referentie zijn deze rekenresultaten nog

gunstiger. Ook moderne, kleine gasmotoren presteren beter dan de gehanteerde referenties.

- Katalytische of regeneratieve naverbranders zijn uitermate kostbaar.
- Een groot gedeelte van de gasmotoren heeft een methaanemissie tussen 1200 en 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> terwijl een gewogen emissie (naar aantal toegepaste motoren) dicht bij de 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> uitkomt. Door de eis op 1200 te zetten wordt nu een te groot aantal motoren uitgesloten. Bovendien tonen de metingen van KEMA aan dat de spreiding in emissie van één type motor aanzienlijk kan zijn. Dat vereist ook een zekere marge in de harde emissie-eis. Daar komt nog bij dat de gaskwaliteit meer gaat variëren, zelfs binnen de huidige voorgeschreven bandbreedte en dit leidt ook tot ruimere afstelling met daarbij tevens hogere methaanemissies.
- Met de huidige methaan-eis van 1500 mg C/Nm<sup>3</sup> loopt Nederland internationaal voorop. Met deze eis worden extreme hoge waarden van methaanemissie voorkomen. Bij de huidige gemiddelde emissie van 1200 mg C/Nm<sup>3</sup> wordt, zoals hiervoor berekend, nog steeds een aanzienlijke CO<sub>2</sub> emissiereductie gerealiseerd. De CO<sub>2</sub> prestatie van gasmotor-WKK is zelfs met deze methaanemissie van alle fossiele bronnen nog superieur.

#### Reactie ECN:

- Er is kennis genomen van de emissieberekening volgens PlaGaMo; overigens wordt hier op gewezen dat de in het rapport geciteerde methaanslip een raming betreft voor 2020. De onderliggende cijfers van PlaGaMo, met name het aantal vollasturen van 3000, wijken naar beneden af in vergelijking met de geciteerde methaanslip in dit rapport. Dit aantal vollasturen wijkt ook zeer sterk af van de bedrijfsvoering in de glastuinbouw volgens recente statistieken. Er wordt melding gemaakt van 4140 vollasturen in 2010 en 4000 vollasturen in 2011, terwijl over de gehele periode 2005-2011 het minimum aantal vollasturen voor WKK in de glastuinbouw 3500 was (Van der Velden & Smit, 2012). Niet uitgesloten wordt dat het geciteerde potentieel van 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq onder invloed van toekomstverwachtingen anders komt te liggen.
- Voor de berekeningen in "*Methaanslip bij WKK-gasmotoren vernietigt aanzienlijk deel van de CO<sub>2</sub>-reductie*" is aangesloten bij (Wetzels et al, 2011). PlaGaMo vergelijkt in de berekening moderne motoren met het gemiddelde, bestaande STEG-park over 2006-2011, waarbij voor het STEG-park ook is gecorrigeerd voor distributieverliezen. De vergelijking van PlaGaMo zou echter met een moderne STEG (circa 59%, exclusief distributieverliezen) uitgevoerd moeten worden. Ook de vergelijking met het bestaande Nederlandse elektriciteitspark zou met het moderne deel van het Nederlandse elektriciteitspark uitgevoerd moeten worden. Tenslotte kan men zich afvragen of vergelijking van diverse brandstoftypes, namelijk kolen en gas, wel opportuun is. Desalniettemin laten ook de berekeningen van PlaGaMo zien dat een aanzienlijk deel van de gerealiseerde CO<sub>2</sub>-reductie, ondanks andere referenties, wordt vernietigd.
- Voor de kosten van de technologie wordt verwezen naar het betreffende hoofdstuk. Naar verwachting zal echter een aanzienlijk deel van het gasmotorpark aan de voorgestelde eis kunnen voldoen middels optimalisatie van de motorafstelling en dus zonder nageschakelde techniek. Optimalisatie van de motorafstelling levert ook een geringe brandstofbesparing op voor de motoreigenaar.

- Met betrekking tot variatie in de gaskwaliteit wordt onder andere verwezen naar het hoofdrapport van de Evaluatie Bems:

InfoMil, ECN, Ministerie van IenM (2013): *Evaluatie Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties*. ECN-E--13-025, mei 2013.

De effecten van de mogelijke variatie in aardgaskwaliteit zijn niet gestaafd met praktijkgegevens. Aangezien de bandbreedte in de Wobbe-index (en het methaangetal) in het Nederlandse aardgasnet slechts in zeer beperkte mate wordt gebruikt, zijn er op dit moment geen of te weinig gegevens beschikbaar om een uitspraak te doen in welke mate methaan-eisen zouden moeten worden bijgesteld. In een later stadium zal dit opnieuw worden onderzocht.

- In het betreffende hoofdstuk is reeds beschreven dat Nederland internationaal voorop loopt met een methaan-eis. Het belang van en de potentiële reductie van methaanslip is eveneens uitgebreid beschreven in het betreffende hoofdstuk.

#### **PlaGaMo merkt ten aanzien van een Methaan-eis bij gasmotoren op biogas en kleine motoren (< 2,5 MW<sub>th</sub>) op:**

- Er zijn onvoldoende metingen aan de methaanemissie van kleinere motoren uitgevoerd om daadwerkelijk een uitspraak over de emissie te kunnen doen. Verder gelden grotendeels dezelfde argumenten als hierboven. Over het algemeen zal de methaanemissie voor deze categorie wat lager liggen dan voor grote motoren. Daarom wordt voorgesteld geen emissie-eis op te nemen. Een zelfde eis als voor grotere motoren zal geen effect hebben terwijl het wel tot een kostenverhoging zal leiden.

#### **Reactie ECN:**

- Een opmerking omtrent het aantal metingen is eveneens genoteerd in het betreffende hoofdstuk. Zowel PlaGaMo als ECN concluderen dat kleine gasmotoren over het algemeen een lagere methaanslip zullen hebben dan grote gasmotoren. Indien voor de meeste motoren niet problematisch, vormt dat voldoende grond om wel een emissie-eis op te nemen om eventuele excessieve emissies bij kleine gasmotoren te reduceren, zoals ook opgemerkt in de conclusies. Onduidelijk is waarom een emissie-eis voor kleine gasmotoren resulteert in een kostenverhoging.

# Bijlage D. Commentaar van Platform Bio-energie

**Commentaar van Platform Bio-Energie (PBE) op conceptrapport 'De mogelijke aanscherping van vijf eisen in het Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties', ontvangen 26 Februari 2013 via het Ministerie van Infrastructuur en Milieu**

PBE heeft de wijze waarop ze de afgelopen periode heeft kunnen kennis nemen van de ontwikkelingen rond de evaluatie van de Bems zeer gewaardeerd. Hierbij willen we kort reageren op het conceptrapport 'De mogelijke aanscherping van vijf eisen in het Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties'.

In algemene zin vindt PBE dat bij het vaststellen van de hoogte van emissie-eisen dient te worden uitgegaan van best bewezen technieken waarmee die eisen kunnen worden gerealiseerd. In onze visie zijn dat technieken die hebben aangetoond in een normale bedrijfssituatie (het specifieke proces, de specifieke schaalgrootte) voldoende bedrijfsuren in de praktijk te functioneren. Op basis van de gepresenteerde studie zijn we er niet van overtuigd dat die technieken er voor alle vijf situaties, waarvoor mogelijke aanscherping van de emissie-eisen wordt overwogen, dat het geval is. De studie hanteert regelmatig onderbouwing als 'offerte' informatie, of ad hoc opmerkingen van leveranciers 'dat geen problemen worden verwacht', die in de politiek als 'boterzacht' zou worden gekwalificeerd.

Daarnaast gaat het vanuit ons standpunt niet alleen om de technische haalbaarheid. De economische consequenties zijn in het rapport slechts op hoofdlijnen aangetipt, waarbij de kanttekening is gemaakt dat bij verdere besluitvorming daar uitgebreidere studie naar dient te worden gedaan. Er wordt een aantal rookgasreinigingstechnieken overwogen die vooral voor kleinschalige toepassingen ons inziens qua kosten buiten proportie zijn en de ontwikkeling van biogasprojecten in bijvoorbeeld de agrarische sector volledig zullen blokkeren.

Een aantal van de overwogen rookgasreinigingstechnieken, zoals SCR, is zeer complex en vergt in de bedrijfsvoering extra kosten, inspanning en gespecialiseerde kennis die niet kan worden gevraagd van de gemiddelde initiatiefnemer, dikwijls boeren.

## **Scherpere NO<sub>x</sub>-eis voor Biogasmotoren:**

Volgens ECN hebben de meeste landen nog geen emissielimieten voor biogasmotoren die bij de 100 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> en 3% O<sub>2</sub> in de buurt komen. De conclusie dat de eis 'technisch implementeerbaar' is, vinden wij te weinig onderbouwd met ervaringen en resultaten uit de praktijk. Zoals ook door ECN zelf aangegeven, is voor verdere besluitvorming een betere economische onderbouwing van de consequenties noodzakelijk. Ons voorstel is een proefprogramma te ontwikkelen waarin bedrijfservaringen en meetresultaten ons verder brengen op de weg naar wat

daadwerkelijk in de praktijk haalbaar is, alvorens besluiten worden genomen tot aanscherping van emissie-eisen voor nieuwe en mogelijk zelfs bestaande installaties.

#### **Aanscherping fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren**

Ook hier blijken volgens ECN de beoogde aangescherpte emissie-eisen slechts in enkele landen van kracht, die vergelijkbaar of scherper zijn. Tevens blijkt er weinig praktijkervaring te zijn met rookgasreinigingstechnieken om aan die eisen te voldoen. Daarmee is er ons inziens nog geen sprake van een nu bewezen techniek om aan een aanscherping van fijnstof-eisen te kunnen voldoen. Ons voorstel is om te leren van toekomstige ontwikkelingen in de VS voor tot aanscherping van eisen over te gaan, waarbij niet exact de invoeringsdata van emissieregelgeving in de VS wordt gevolgd, maar na-ijlend om de ervaringen te kunnen implementeren.

#### **Invoering methaan-eis bij biogasmotoren**

Het mogelijk stellen van methaan-eisen aan een per definitie juist sterk methaanemissie-reducerend proces als vergisting komt ons, zoals ook al eerder is aangegeven, als technocratische benadering van emissie-regelgeving voor. Zonder de vergistingsprocessen zou er een veel grotere methaan emissie plaatsvinden die niet door emissie-regels wordt gelimiteerd.

#### **Deelvraag 6: Biomassa en BEMS**

*Beschrijvingen als 'inmiddels blijkt vloeibare biomassa nu eenduidig in het Activiteitenbesluit onder biomassa te vallen' en 'pyrolyse olie (uit biomassa) (ook witte lijst stoffen) staat niet in de witte lijst en valt derhalve niet onder biomassa', laten zien dat het met de definitie van 'biomassa' nog altijd lastig is. De vervolgvraag doet zich voor: hoe zit het dan met getorreficeerde biomassa? Voor initiatiefnemers is de definitie van biomassa in de verschillende contexten nog steeds ingewikkeld, hopelijk voor bevoegde gezagen niet. PBE zou graag in overleg met u eraan willen bijdragen om tot een inzichtelijke, voor de markt hanteerbare definitie van 'biomassa' in de verschillende contexten te komen.*

Afsluitend willen wij aangeven graag met u een industrie gerichte dialoog te willen opzetten waar, naast de hiervoor genoemde definitie van biomassa, ook meer praktijk verbonden ervaringen worden betrokken in de ontwikkeling van emissieregelgeving, van belang voor biomassa.

De voorliggende studie is sterk gebaseerd op literatuur/internetonderzoek en 'hear-say' van leveranciers van rookgasreinigingsapparatuur die een ander belang kunnen hebben dan het geven van realistische praktijkwaarden. Een industrieel gerichte dialoog, waardoor wijzigingen integraal op haalbaarheid worden getoetst en de kosteneffectiviteit van de maatregelen wordt bekeken. Vanuit de verschillende achtergronden van het Platform denken wij daar een bijdrage aan te kunnen leveren.

### Reactie ECN:

De (cursief afgedrukte) paragraaf “Deelvraag 6: Biomassa en Bems” is niet van toepassing op dit rapport, maar op het samenvattend rapport van de Evaluatie Bems, alwaar het is behandeld. Daartoe wordt verwezen naar:

InfoMil, ECN, Ministerie van IenM (2013): *Evaluatie Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties*. ECN-E--13-025, mei 2013.

- PBE maakt enkele, algemene opmerkingen ten aanzien van de bronnen en referenties waarop het rapport is gebaseerd en stelt vraagtekens bij de kwaliteit ervan. ECN wijst erop dat de gevonden informatie is onderbouwd met referenties, welke duidelijk zijn opgenomen in het rapport met bijbehorende detailinformatie, zoals gebruikelijk in een onderzoeksrapport. PBE onderbouwt deze statements verder niet.
- PBE merkt op dat de economische consequenties voor biogasprojecten summier zijn behandeld, maar een fors effect zal hebben op de financiële haalbaarheid van projecten. ECN verwijst naar het betreffende hoofdstuk waar de gasreinigingstechnologie is beschreven en uit referenties blijkt dat de kosten acceptabel zijn. Daarnaast wordt opgemerkt dat een deel van de biogasmotoren in aanmerking komt voor subsidie om een terugverdientijd te garanderen; de subsidiabele kosten dienen aangepast te worden indien de emissie-eisen inderdaad aangescherpt worden, zodanig dat de gehanteerde terugverdientijd gegarandeerd blijft. De wijze van subsidiëring en de voorwaarden voor subsidietoekenning voor hernieuwbare energie is in de afgelopen jaren diverse malen gewijzigd. Kostprijsverhoging resulteert in een hogere, benodigde subsidie om een terugverdientijd te garanderen. Onder eerdere subsidiestelsels had dit geen nadelige consequenties voor de toekenning. Onder de huidige SDE+ systematiek resulteert een hogere, benodigde subsidie in een lagere kans op subsidietoekenning.
- PBE merkt op dat de genoemde technologie niet kan worden gevraagd van de initiatiefnemer. Ten aanzien van kosten wordt verwezen naar het voorgaande punt. Ten aanzien van de benodigde inspanning en gespecialiseerde kennis die niet van de initiatiefnemer kan worden geleverd volgens PBE, kan men zich afvragen of dergelijke argumenten geëigend zijn om de milieubelasting te vergroten.
- Ten aanzien van een scherpere NO<sub>x</sub>-eis voor biogasmotoren verwijst ECN naar het betreffende hoofdstuk, alwaar een overzicht met diverse projecten voor biogasmotoren is opgenomen. Ook wordt verwezen naar de diverse fabrikanten die technologie aanbieden om aan de betreffende eisen te voldoen. Uiteraard staat het PBE vrij om een aanvullend proefprogramma te bepleiten.
- Ten aanzien van een aanscherping fijnstof-eis bij (bio)dieselmotoren merkt ECN op dat de landen met vergelijkbare of strengere wetgeving, onder meer Duitsland en de VS omvat. Diverse partijen zien dit als toonaangevende landen. Uiteraard staat het PBE vrij om een latere inwerkingtrededatum te bepleiten.
- Ten aanzien van invoering methaan-eis bij biogasmotoren verwijst ECN naar het betreffende hoofdstuk, waar een gedeelte is opgenomen omtrent de vrije methaanemissie ten gevolge van spontane (mest)vergisting. Dit argument is gedeeltelijk terecht. Echter, juist co-vergisting, wat wordt uitgevoerd door substraat aan mest toe te voegen in de vergister, wordt bewust uitgevoerd om meer biogas te



produceren dan het geval zou zijn geweest door spontane vergisting in de mestopslag. Daarnaast wordt in het bijzonder stortgas gefakkeld, indien niet nuttig aangewend. De referentie van volledig diffuse methaanemissie is dus slechts gedeeltelijk terecht. Daarnaast vormt dit direct een reden om de emissie-eis soepeler te formuleren dan voor aardgasmotoren, zoals opgenomen in het betreffende hoofdstuk. Tenslotte zal de emissie-eis voor biogasmotoren veelal zonder nageschakelde techniek gerealiseerd kunnen worden. De betere energetische benutting van het biogas in de installatie brengt tenslotte ook een voordeel voor exploitant met zich mee, omdat het rendement van de installatie enigszins toeneemt.



**ECN**

Westerduinweg 3  
1755 LE Petten

Postbus 1  
1755 ZG Petten

T 088 515 4949  
F 088 515 8338  
info@ecn.nl  
www.ecn.nl

