



Emissies uit WKK installaties in de glastuinbouw

Methaan, etheen en NOx concentraties in rookgassen voor CO2 dosering

Th.A. Dueck, C.J. van Dijk, F. Kempkes & T. van der Zalm





Emissies uit WKK installaties in de glastuinbouw

Methaan, etheen en NO_x concentraties in rookgassen voor CO₂ dosering

Th.A. Dueck¹, C.J. van Dijk², F. Kempkes¹ & T. van der Zalm²

¹ Wageningen UR Glastuinbouw

² Plant Research International

© 2008 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	3
1. Inleiding	5
2. Opzet meetcampagnes	7
2.1 Selectie componenten	7
2.2 Selectie bedrijven	7
2.3 Meetpunten en conditionering rookgassen	8
2.4 Meetapparatuur	9
2.5 Berekening methaanslip	10
3. Resultaten concentratiemetingen	11
3.1 Bedrijf Nr. 1	11
3.2 Bedrijf Nr. 2	15
3.3 Bedrijf Nr. 3	18
3.4 Bedrijf Nr. 4	21
3.5 Bedrijf Nr. 5	24
4. Methaanslip	29
5. Effecten van NO _x en etheen op planten	31
5.1 Stikstofoxiden (NO _x)	31
5.2 Etheen	34
6. Conclusies en aanbevelingen	35
7. Literatuur	39
Bijlage I. Kengetallen klimaatcomputer	41
Bijlage II. Meten van luchtemissies	43

Voorwoord

In het kader van het energieonderzoek binnen het programma Kas als energiebron, is in opdracht van het Ministerie van LNV en PT door Wageningen UR Glastuinbouw onderzoek gedaan naar emissies van rookgassen. Tijdens CO₂ dosering komen ondanks het reinigen, een deel van deze emissies in de kas terecht. Door verbeterde (dichtere) kassen en gewijzigde teeltomstandigheden zoals semi-gesloten telen is de luchtuitwisseling afgenomen en neemt nog verder af. De kwaliteit van de gedoseerde CO₂ ten behoeve van de gewasgroei wordt daardoor een steeds belangrijker en kritischer factor.

Ook het ontbreken van betrouwbare cijfers van methaan emissies bij WKK-installaties was aanleiding voor dit onderzoek. Daarnaast vormde de vele klachten van tuinders over gewasschades aanleiding om tegelijk in het project te kijken naar concentraties van rookgassen op gewasniveau. In dit project worden de concentratiepatronen van de belangrijkste rookgascomponenten in beeld gebracht.

Tom Dueck
Wageningen UR Glastuinbouw
januari 2008

Kennisoverdracht:

Dat het onderwerp leeft binnen de Nederlandse Glastuinbouw blijkt wel uit het feit dat er gedurende de uitvoering van het project regelmatig door de vakpers en individuele tuinders is geïnformeerd naar de voortgang. Dit heeft al geleid tot enkele publicaties vooruitlopend op de uiteindelijke resultaten waarbij in sommige gevallen de auteurs van dit rapport om een reactie is gevraagd.

Met CO₂ uit rookgasreiniger blijft het opletten geblazen. Vakblad voor de Bloemisterij 45: 42-44 (november 2006).

Onderzoek naar rookgasreiniger. Nieuwe Oogst Tuinbouw (januari 2007).

Effectgrenswaarden van rookgassen in de kas. Groeinieuws. LTO Groeiservice (juli 2007).

Veilig CO₂ blijven doseren uit WKK. Groente & Fruit 31: 16-17 (augustus 2007).

Geen vertrouwen meer in CO₂ uit eigen WKK. Vakblad voor de Bloemisterij 32: 36-37 (augustus 2007)..

Kleine kans op rookgasschade. Vakblad voor de Bloemisterij 48: 42-44 (december 2007).

Voordrachten:

Gassen in de kas. Posterpresentatie bij de opening van WUR Glastuinbouw, Bleiswijk. (juni 2007).

CO₂, op zoek naar het optimum. Leo Marcelis & Ep Heuvelink. Groeibijeenkomst Westland Energie Services, (oktober 2007).

Samenvatting

WKK-installaties produceren elektriciteit voor belichting en levering aan het net, warmte voor de kas en rookgassen voor CO₂ t.b.v. gewasgroei en -productie. In Nederland worden eisen gesteld aan de emissie van rookgassen uit gasmotoren, o.a. door het certificeringsschema Groen Label Kas, waarbij het vooral om de gassen NO_x, etheen en methaan gaat. Methaan is waarschijnlijk niet zozeer een fytotoxisch gas, maar wel een sterk broeikasgas en als zodanig belastend voor het milieu. NO_x en etheen, daarentegen zijn wel toxisch voor planten. Met enige regelmaat worden door tuinders negatieve effecten op groei en productkwaliteit van kasgewassen gemeld. Er zijn aanwijzingen dat deze toegeschreven kunnen worden aan NO_x en etheen. In dit project werden de concentraties van de belangrijkste componenten in gereinigde rookgassen (NO_x, etheen en methaan) uit WKK-installaties die verschillen in vermogen en type bepaald. Daarvoor werden metingen uitgevoerd op vijf bedrijven, direct achter de rookgasreiniger en in de kas op plantniveau.

Gebleken is dat de NO_x, etheen en methaan concentraties in het rookgaskanaal afhankelijk zijn van het vermogen van de motor en de effectiviteit van de reiniger; de reiniger reduceert wel de concentratie aan NO_x en etheen, maar heeft nauwelijks effect op de methaanconcentratie. De mate van methaanslip varieerde van 541 tot 3335 mg/m₀³ (0,7- 4,5%), en er lijkt een lineair verband te bestaan tussen het motorvermogen en de hoeveelheid methaanslip in rookgassen. Dit bevestigt eerdere vermoedens dat grotere motoren meer onverbrande brandstof emitteren. De concentraties aan NO_x liepen hoog op (100-300 ppb), hetzij redelijk continu in de tijd, hetzij als piekbelastingen, beide met mogelijk nadelige gevolgen voor het gewas. Overschrijdingen van de effectgrenswaarde vinden vooral plaats in perioden met weinig ventilatie. De hoeveelheid etheen die met de rookgassen in de kas wordt gebracht blijkt relatief gering te zijn en komt overeen met het achtergrondniveau in de buitenlucht (< 5 ppb). Echter, deze metingen zijn uitgevoerd in goedgeventileerde kassen, en het is niet uit te sluiten dat verhoogde concentraties van etheen voor kunnen komen in perioden waarin minder wordt geventileerd.

Tijdens het doseren van CO₂ in de kas worden de rookgassen sterk verdund. De verhouding tussen de concentratie direct achter de reiniger en in de kas verschilt niet alleen per bedrijf maar ook per component. Verondersteld wordt dat methaan niet of nauwelijks door het gewas wordt opgenomen, en de verdunning uitsluitend het gevolg is van lekverliezen en ventilatie. Voor NO_x wijkt de verdunningsfactor echter sterk af van die van methaan, wat naast de lek- en ventilatieverliezen verklaard zou kunnen worden door opname door het gewas.

CO₂ dosering via rookgassen uit WKK-installaties houdt een risico in voor het milieu en het gewas. Met name de NO_x concentraties kunnen dermate hoog oplopen dat de effectgrenswaarde ter bescherming van planten wordt overschreden met mogelijk nadelige gevolgen voor het gewas.

Met betrekking tot het milieu spelen vooral NO_x en methaan een belangrijke rol. De concentraties van deze componenten in het rookgaskanaal zijn afhankelijk van het type motor en voor wat de NO_x concentraties betreft van de effectiviteit van de reiniger. Het terugdringen van deze milieubelasting kan alleen door het stellen van generieke kwaliteitseisen aan WKK-reiniger installaties (bron gerichte maatregelen).

De ontwikkeling van de semi-gesloten kas zal naast energiebesparing ook invloed hebben op de luchtkwaliteit in de kas indien rookgassen van WKK-installaties gebruikt gaan worden voor CO₂ dosering. De gemeten concentraties bij (vrijwel) gesloten ramen in dit project geven een indruk van de concentratieniveau's die in een semi-gesloten kas bereikt kunnen worden. De NO_x concentraties kunnen onder die omstandigheden oplopen tot ca. 300 ppb. Het verdient aanbeveling bij de ontwikkeling van de semi-gesloten kas rekening te houden met CO₂ dosering met rookgassen en de risico's hiervan in kaart te brengen.

Risico's voor het gewas zijn afhankelijk van de gevoeligheid van het gewas, het seizoen en de teeltstrategie. Als gevolg hiervan zijn er geen algemene richtlijnen te geven of in bepaalde situaties problemen zullen optreden. Het stellen van generieke emissie-eisen aan WKKs alleen is daarom onvoldoende om problemen van slechte luchtkwaliteit bij CO₂ dosering uit WKKs te beheersen. Tuinders hebben enkele mogelijkheden om in te kunnen spelen op

de risico's die verbonden zijn aan CO₂ dosering met rookgassen uit WKK installaties. Omdat de concentraties in de kas sterk afhankelijk zijn van de CO₂ vraag, de mate van ventilatie en het gebruik van schermen, die allemaal variabel zijn over de seizoenen, zou de tuinder over kunnen stappen op zuiver CO₂ in perioden met weinig ventilatie en veel schermen. Ook het aanpassen van de doseringsstrategie biedt mogelijkheden om het risico te beperken omdat uit de metingen blijkt dat de concentraties aan rookgassen dan minder hoog oplopen.

In de praktijk wordt de luchtkwaliteit op plantniveau niet gemeten waardoor de tuinder niet in staat is om tijdig in te grijpen. Daarom zou een monitoringsysteem aan te bevelen zijn voor continue bewaking van NO_x en etheen op plantniveau bij CO₂ dosering via rookgassen.

1. Inleiding

In de Nederlandse glastuinbouw neemt het gebruik van aardgasgestookte installaties met warmtekracht koppeling (WKKs) nog steeds toe. De verwachting is dat er in de komende jaren jaarlijks ca. 600 MWe aan vermogen wordt bijgeplaatst. De installaties produceren elektriciteit voor belichting en levering aan het net, warmte voor de kas en rookgassen voor CO₂ t.b.v. gewasgroei en -productie. In Nederland worden conform het Besluit emissie-eisen stookinstallaties (Bees) eisen gesteld aan de NO_x emissie van gasmotoren (Anon., 1998). Verder worden in het certificeringsschema Groen Label Kas (GLK 8-2007) eisen gesteld ten aanzien van de maximaal toelaatbare emissie van NO_x en methaan vanuit WKK-installaties (Anon., 2007). Methaan is waarschijnlijk niet zozeer een toxisch gas, maar wel een sterk broeikasgas en als zodanig belastend voor het milieu. Momenteel ontbreekt het aan betrouwbare meetwaarden die inzicht geven in de emissie van methaan uit WKK installaties. In de Nederlandse glastuinbouw zijn verschillende typen WKK-rookgasreiniger combinaties in gebruik. Het type, leeftijd en vermogen van de installatie spelen zeer waarschijnlijk een rol met betrekking tot het emissiepatroon van de gasmotor/reiniger combinatie.

CO₂ dosering in kassen is al meer dan 25 jaar gemeengoed in de glastuinbouw. De positieve effecten van het doseren van CO₂ met behulp van rookgassen zijn algemeen bekend: hogere productie en/of betere kwaliteit. Er zijn echter aanwijzingen dat er ook negatieve effecten op groei en productkwaliteit kunnen optreden. Deze worden met name toegeschreven aan de effecten van rookgassen uit WKK installaties. De belangrijkste componenten die hierbij een rol spelen zijn stikstof oxiden (NO_x) en etheen, al is het niet uitgesloten dat er nog andere componenten een rol spelen waarvan het risico voor het gewas nog onvoldoende onderkend is. Uit praktijkwaarnemingen zijn voorbeelden bekend, zoals het afvallen van bloemen en/of vruchten door etheen bij komkommer, paprika en tomaat. Van NO_x is bekend dat het van verminderde groei en productieverlies tot bladverbranding kan leiden.

Om eventuele schade aan gewassen te voorkomen zijn er eisen gesteld aan de maximaal toelaatbare concentraties van enkele toxische componenten in de rookgassen. Door middel van een rookgasreiniginginstallatie moet worden voorkomen dat deze grenswaarden worden overschreden. Desondanks komen met enige regelmaat schadegevallen voor. Hierbij gaat het soms om incidentele schades, meestal het gevolg van een korte blootstelling aan ongereinigde of onvoldoende gereinigde rookgassen door een technische storing aan de installatie. Daarnaast komen ook minder eenduidig te verklaren schades voor zoals achterblijvende groei of minder kwaliteit ed. Dit duidt op een meer chronische blootstelling die niet direct te herleiden zijn naar een storing in de installatie omdat de betreffende motoren technisch gezien probleemloos draaien.

Er is betrekkelijk weinig bekend over de concentratieniveaus en mogelijke effecten van toxische gasvormige stoffen in de kas. Bij de huidige generatie kassen komen de rookgassen met name in de winterperiode, wanneer de kas zoveel mogelijk dicht wordt gehouden, in relatief hoge concentraties in contact met het gewas. Dit betekent een verhoogd risico met betrekking tot schade of mindere groei van het gewas. Met de stijgende energiekosten worden kassen steeds dichter gemaakt om energie te besparen. Deze ontwikkeling betekent dat de potentiële problemen van rookgassen in de kas groter zijn geworden en zullen worden, ook in de zomerperiode. In een eerder uitgevoerd en verkennend onderzoek (Van Dijk *et al.*, 2003) zijn deze aanwijzingen bevestigd. In kasteelten met CO₂-dosering uit WKK-installaties zijn niveaus van NO_x en etheen gemeten die schadelijk kunnen zijn voor gewassen.

Doel van dit project is het in kaart brengen van de concentraties van de belangrijkste componenten in gereinigde rookgassen (NO_x, etheen en methaan) van verschillende motor/reiniger combinaties. De metingen worden uitgevoerd direct achter de rookgasreiniger en in de kas op plantniveau. Getracht zal worden een relatie te leggen tussen rookgasconcentraties afkomstig van een type/grootte van de WKK/reiniger combinatie en concentratie van rookgassen in de kas op plantniveau.

2. Opzet meetcampagnes

2.1 Selectie componenten

Gereinigde rookgassen van gasmotor(en) van WKK-installaties bevatten naast CO₂ ook componenten als koolmonoxide (CO), methaan (C₂H₄), stikstofoxiden (NO_x) en koolwaterstoffen (o.a. etheen). Door het gebruik van aardgas komt vrijwel geen SO₂ vrij. Deze luchtverontreinigingscomponenten en met name NO_x en etheen zijn potentieel schadelijk voor een teelt. CO is niet schadelijk voor planten maar is al vanaf relatief lage concentraties wel zeer gevaarlijk voor mensen (kolendampvergiftiging). Voor zover bekend is methaan ook niet schadelijk voor planten, methaan is echter een sterk broeikasgas en als zodanig belastend voor het milieu. Op grond van bestaande informatie is er voor gekozen de meetcampagnes in de verschillende teelten te richten op de componenten NO_x, etheen en methaan. De concentratiemetingen moeten inzicht geven in:

1. Concentratieniveaus van NO_x, etheen en methaan in gereinigde rookgassen van verschillende motor/reiniger combinaties;
2. De concentraties op plantniveau (ofwel: welke concentraties 'voelen' de planten) bij CO₂ dosering met rookgassen van de verschillende motor/reiniger combinaties;
3. De variatie in concentraties over enkele dagen en tussen verschillende teelten/bedrijven;
4. Implicaties voor schadelijke effecten op het gewas (toetsing aan de bestaande kennis over effectgrenswaarden).

2.2 Selectie bedrijven

De metingen zijn uitgevoerd op vijf bedrijven met verschillende WKK-reinigercombinaties (Tabel 1). Bij de selectie is rekening gehouden met de factoren als leeftijd en vermogen van de WKK installatie, twee belangrijke factoren die de samenstelling van de rookgassen sterk kunnen beïnvloeden. In de praktijk blijkt dat vrijwel uitsluitend rookgasreinigers met ureum injectie worden toegepast. De enige nieuwe techniek in ontwikkeling is de Knook SQ2 katalytische rookgasreiniging. De proefopstelling is echter nog niet operationeel waardoor de in het kader van dit project geplande metingen niet door konden gaan.

Voor de evaluatie van de concentratiemetingen is gebruik gemaakt van een aantal gegevens uit de verschillende klimaatcomputers (zie ook Bijlage I).

Tabel 1. Overzicht van de belangrijkste kenmerken van de installaties waar de metingen zijn uitgevoerd.

Bedrijf nr.	Teelt	Meetperiode	Gasmotor		Rookgasreiniger
			Vermogen (MWe)	Bouwjaar	
1	Rozen	Maart	3,2	2005	Ureum
2	Paprika	Mei	2,0	2006	Ureum
3	Tomaat	Juni	1,9	2001	Ureum
4	Schefflera	Augustus	0,69	1997	Ureum
5	Paprika	Oktober	1,56	2006	Ureum

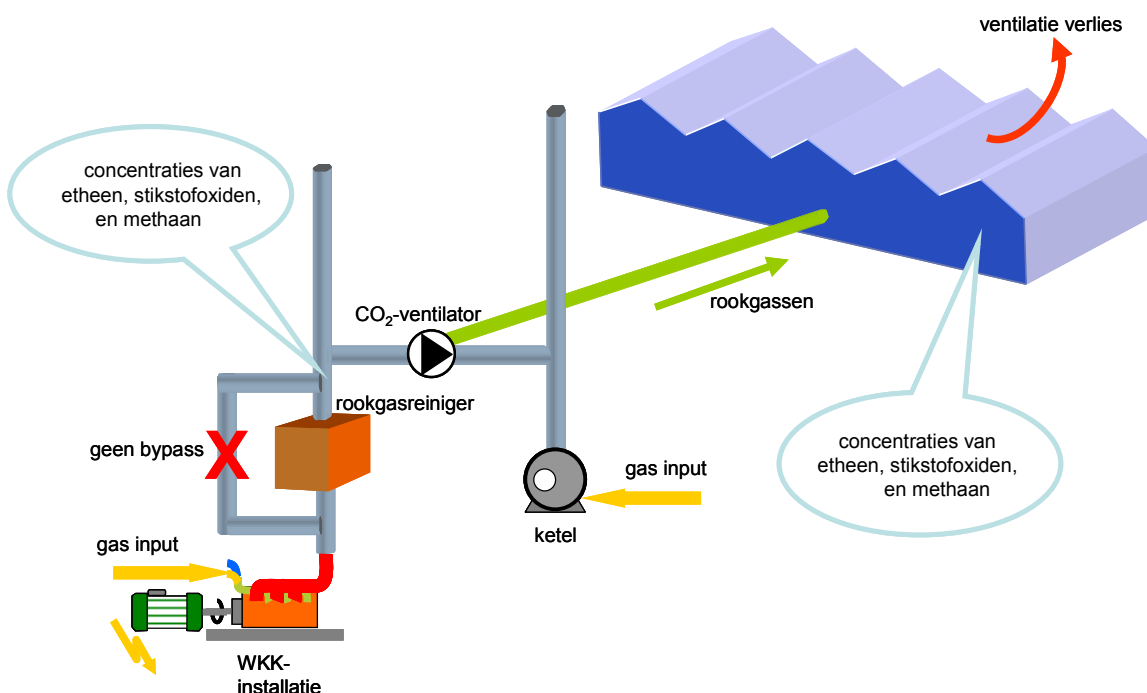
2.3 Meetpunten en conditionering rookgassen

Rookgaskanaal

De metingen in het rookgaskanaal vonden plaats na de rookgasreiniger. Voor de metingen werd een hoeveelheid rookgas door middel van een teflon vacuüm pomp aan het kanaal onttrokken en na conditionering naar de analysers getransporteerd waar vervolgens de concentratie werd bepaald. De rookgascondities zijn ongeschikt om direct naar de analysers en GC te leiden en moeten eerst geconditioneerd worden. Hiervoor werd de aan het kanaal onttrokken rookgasstroom eerst via een condensafvanger geleid en vervolgens door een peltier rookgaskoeler gekoeld tot 6°C om het waterdamp gehalte tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen. Bij de meeste bedrijven kon gebruik worden gemaakt van bestaande aansluitpunten in het rookgaskanaal. Waar dat niet het geval was zijn nieuwe aansluitpunten aangebracht. Om eventuele niet-homogeniteit zoveel mogelijk te voorkomen zijn de aansluitpunten op de praktisch meest optimale plaats in het kanaal aangebracht.

Kas

Voor de concentratiemetingen op plantniveau (bovenkant gewas) werd een hoeveelheid lucht door middel van een teflon vacuüm pomp aan het kascompartiment onttrokken en via een geïsoleerde FEP (teflon) meetleiding naar de meetapparatuur geleid. Conditionering van de aangezogen lucht was niet noodzakelijk. Het aanzuigpunt van de meetleiding in de kas werd zo dicht mogelijk bij een bestaande CO₂-meetpunt gebracht.



Het doseren van rookgassen vanuit de WKK

2.4 Meetapparatuur

De NO_x concentraties werden gemeten met behulp van twee Monitorlabs NO_x analysers (model 8840). Een analyser was afgesteld op de verwachte concentratieniveaus op plantniveau (ppb range), de andere op de niveaus in het rookgaskanaal (ppm range). De meetwaarden van beide analysers werden elke 5 minuten opgeslagen.

De methaan en etheen concentraties werden gemeten met een SRI online gaschromatograaf (type 8610). De gaschromatograaf was voorzien van een meetpuntomschakelaar waardoor alternerend een luchtmonster uit de kas en uit het rookgaskanaal werd geanalyseerd. De meetcyclus voor beide componenten en meetpunten bedroeg 30 minuten waarna de meetwaarden werden opgeslagen. Gelijktijdig met de concentratiemetingen werden in het rookgaskanaal ook de temperatuur, druk en zuurstofgehalte bepaald.

De certificeringgegevens van de verschillende calibratiegassen zijn te verkrijgen op aanvraag.

2.4.1 Bepaling NO_x -concentraties in droog rookgas

Monsterneming:	meting op één punt midden in het rookgaskanaal, 2 m achter de reiniger
Meetprincipe:	on-line, continue registrerend, chemoluminescentie
Meetbereiken:	0 - 10 vppm; 0 - 100 vppm
Detectiegrens:	0,1 vppm - 1 vppm
Gebruikte monitor:	Monitor Labs Model 8840
Calibratiegassen:	lucht (nulgas), 70 vppm NO . De onzekerheid in de concentratie van het gebruikte kalibratiegas is 2%.
Analyseonzekerheid:	meetwaarden 0 - 10 vppm \pm 0,1 vppm meetwaarden 0 - 100 vppm \pm 0,5 vppm

2.4.2 Bepaling NO_x -concentraties in de kas

Monsterneming:	meting op één punt op plantniveau (bovenkant gewas)
Meetprincipe:	on-line, continue registrerend, chemoluminescentie
Meetbereik:	0 - 500 vppb
Detectiegrens:	2 vppb
Gebruikte monitor:	Monitor Labs Model 8840
Calibratiegassen:	lucht (nulgas), 120 vppb NO . De onzekerheid in de concentratie van het gebruikte kalibratiegas is 2%.
Analyseonzekerheid	meetwaarden 0 - 500 vppb \pm 3 vppb

2.4.3 Bepaling van etheen en methaan concentraties in droog rookgas

Etheen

Monsterneming:	meting op één punt midden in het rookgaskanaal, 2 m achter de reiniger
Meetprincipe:	on-line, continue registrerend gas chromatograaf
Gebruikte GC:	SRI 8610 C + purge & trap
Meetbereik:	0 - 200 vppm
Detectiegrens:	2 vppb
Calibratiegassen:	lucht (nulgas), 104 vppm. De onzekerheid in de concentratie van het gebruikte kalibratiegas is 5%.
Analyseonzekerheid	meetwaarden 0 - 100 vppb \pm 5%

Methaan

Monsterneming:	meting op één punt midden in het rookgaskanaal, 2 m achter de reiniger
Meetprincipe:	on-line, continue registrerend gas chromatograaf
Gebruikte GC:	SRI 8610 C + purge & trap
Meetbereik:	0 - 5000 vppm
Detectiegrens:	2 vppm
Calibratiegassen:	lucht (nulgas), 521 vppm. De onzekerheid in de concentratie van het gebruikte calibratiegas is 5%
Analyseonzekerheid	meetwaarden 0 - 1000 vppm ± 5%

2.4.4 Bepaling van etheen en methaan concentraties in de kas

Etheen

Monsterneming:	meting op één punt op plantniveau (bovenkant gewas)
Meetprincipe:	on-line, continue registrerend gas chromatograaf
Gebruikte GC:	SRI 8610 C + purge & trap
Meetbereik:	0 - 200 vppb
Detectiegrens:	2 vppb
Calibratiegassen:	lucht (nulgas), 183 vppb. De onzekerheid in de concentratie van het gebruikte calibratiegas is 5%. De certificeringgegevens zijn te verkrijgen op aanvraag.
Analyseonzekerheid	meetwaarden 0 - 100 vppb ± 5%

Methaan

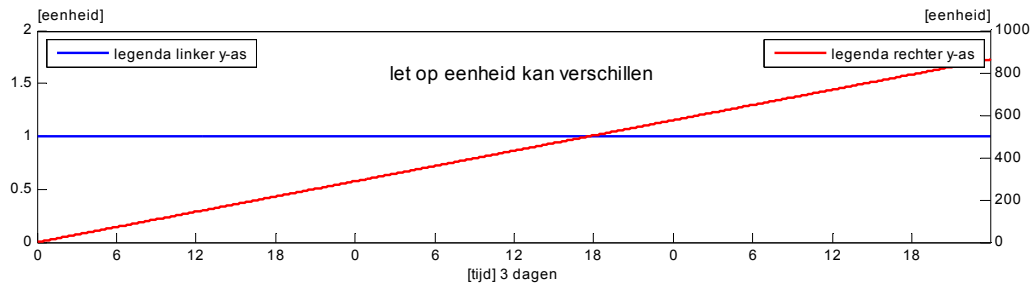
Monsterneming:	meting op één punt op plantniveau (bovenkant gewas)
Meetprincipe:	on-line, continue registrerend gas chromatograaf
Gebruikte GC:	SRI 8610 C + purge & trap
Meetbereik:	0 - 5000 vppm
Detectiegrens:	2 vppm
Calibratiegassen:	lucht (nulgas), 1 vppm. De onzekerheid in de concentratie van het gebruikte calibratiegas is 5%. De certificeringgegevens zijn te verkrijgen op aanvraag.
Analyseonzekerheid	meetwaarden 0 - 5 vppm ± 5%

2.5 Berekening methaanslip

Emissie-eisen hebben betrekking op droge lucht of droog rookgas en worden herleid naar standaard druk (101.3 kPa) en temperatuur (273 °K). De methaanconcentraties in het rookgaskanaal worden herleid naar een standaard zuurstofconcentratie en vervolgens uitgedrukt in mg/m_0^3 en als een percentage energiewaarde van het brandstofgebruik (onderste verbrandingswaarde), waarbij 1% slip betekent dat er per GJ 10MJ onverbrand methaan ontstaat. Een uitgebreide beschrijving van deze methodiek wordt gegeven in Bijlage II.

3. Resultaten concentratiemetingen

De resultaten van de concentratiemetingen worden per bedrijf gepresenteerd. Voor het in beeld brengen van de concentratiepatronen is uit de beschikbare data, indien mogelijk, een periode geselecteerd met daarin een duidelijke weersomslag zodat de metingen op verschillende omstandigheden betrekking hebben. Per bedrijf is een aaneengesloten meetperiode van drie etmalen (72 uur) geselecteerd. In dit hoofdstuk wordt voor elk bedrijf de periode van deze 72 uur gepresenteerd en besproken. Daaraan voorafgaand een korte toelichting op de wijze waarop de meetwaarden in onderstaande paragrafen zijn weergegeven.



De gemeten concentraties¹ worden in grafieken gepresenteerd (zie ook bovenstaand voorbeeld). Op de horizontale as van de grafieken is de meetperiode van telkens drie dagen weergegeven op basis van uren van de dag. Vrijwel elke grafiek heeft zowel een linker als rechter verticale as, de bijbehorende eenheid staat boven de as tussen rechte haken. De legenda in de linkerbovenhoek is hoort bij de linker verticale as. De legenda in de rechterbovenhoek hoort bij de rechter verticale as.

3.1 Bedrijf Nr. 1

3.1.1 Algemeen

Bedrijf nr. 1 betreft een rozenkwekerij van ca. 6 ha met belichting. De metingen zijn verricht achter een gasmotor van 3,2 MWe met een ureum-rookgasreiniger in maart 2007. In dit rapport worden de meetresultaten over drie opeenvolgende dagen gepresenteerd, van 21 tot en met 23 maart. De rookgasreiniger was niet continu in bedrijf maar werd pas ingeschakeld als er CO₂ vraag was (besparing van ureum). De continue concentratiemetingen geven daardoor inzicht in de concentraties in zowel gereinigde als ongereinigde rookgassen.

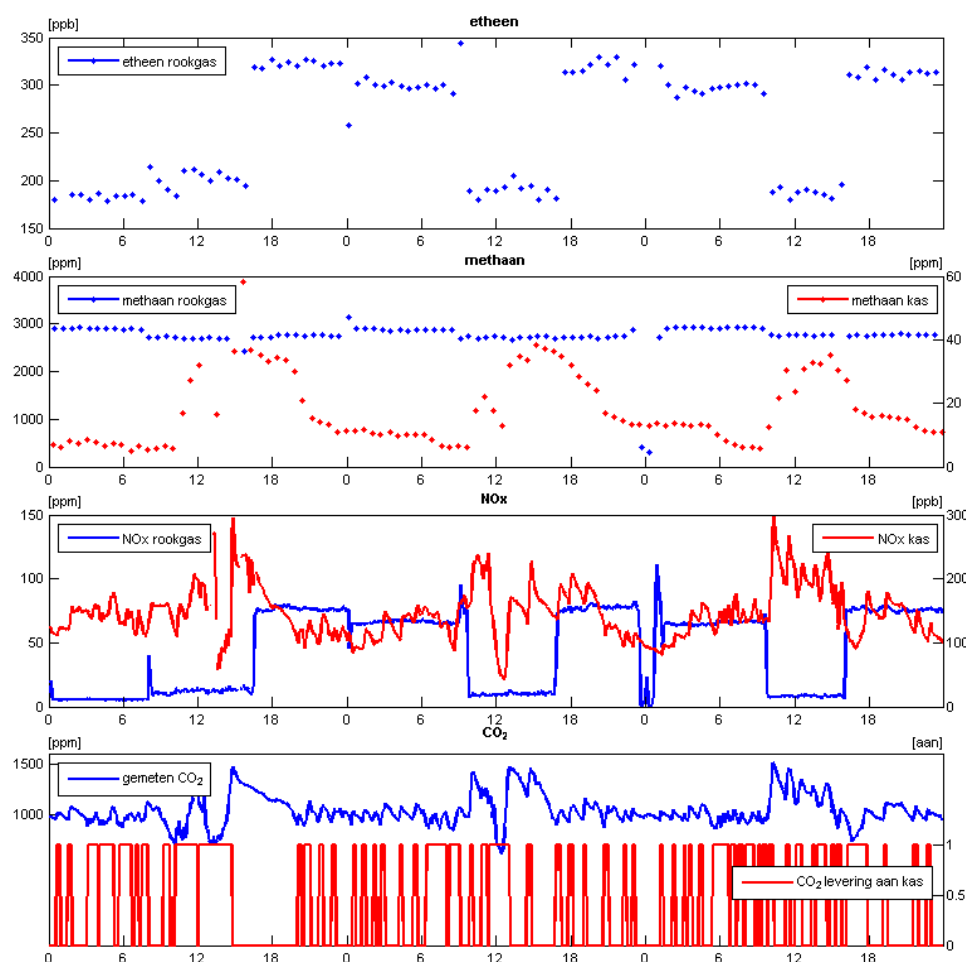
3.1.2 Etheen

Het in- en uitschakelen van de rookgasreiniger heeft duidelijk invloed op de etheenconcentratie in de rookgassen (Figuur 1 –etheen rookgas–). Als de reiniger aanstaat, ligt de etheenconcentratie direct achter de reiniger rond de 190 ppb, staat de reiniger uit dan ligt de concentratie rond de 310 ppb. De etheenconcentraties in de kas, op plant-niveau, lagen beneden de detectiewaarde van 5 ppb (niet weergegeven in de figuur). Het vermogen dat de motor op een bepaald moment levert heeft invloed op het concentratiepatroon. Aan het begin van de avond vanaf 18:00 tot 9:00 uur de volgende morgen draaide de motor alleen voor levering van elektriciteit voor de belichting en teruglevering aan het net. Er werd geen CO₂ gedoseerd vanuit de WKK-installatie. De rookgasreiniger stond daarom uit en de rookgassen werden naar de buitenlucht geëmitteerd. Rond middernacht werd overgeschakeld naar eilandbedrijf. Dat wil zeggen dat de geproduceerde elektriciteit alleen op het eigen bedrijf wordt gebruikt, er is op dat moment geen koppeling meer met het openbare net om elektriciteit terug te leveren. Als gevolg hiervan wordt het vermogen van de motor ca. 9% teruggebracht. Door de terugname van vermogen liggen de etheenconcentraties in de rookgassen tussen middernacht en ca. 9:00 uur morgens iets lager. Dit patroon is ook terug te vinden in de gasafname van de WKK installatie (Figuur 2 –wkk2–).

¹ In dit rapport worden concentraties uitgedrukt in volume-eenheden ppm (parts per million) of ppb (parts per billion).
1ppm = 1000 ppb

3.1.3 Methaan

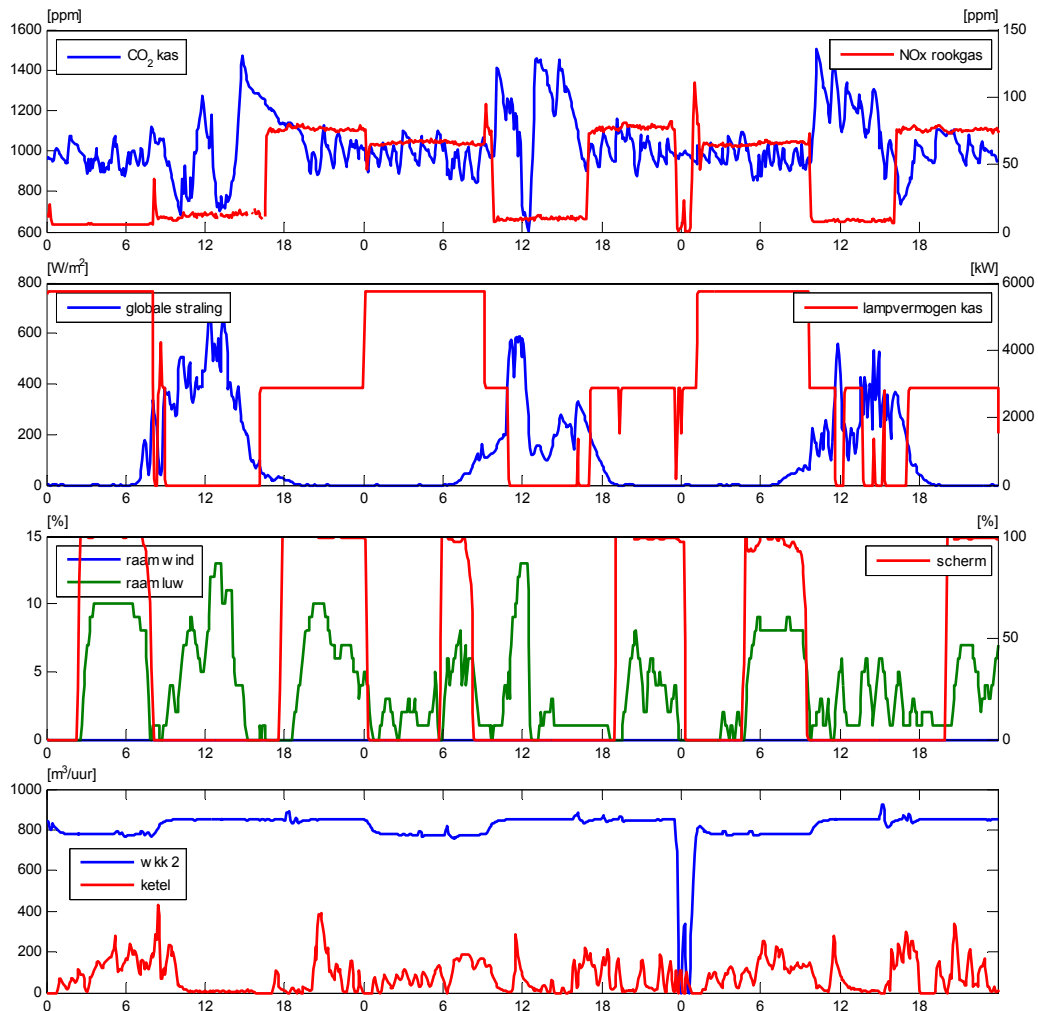
De rookgasreiniger heeft geen invloed op de methaanconcentratie in de rookgassen. De concentratie bedroeg ca. 2730 ppm in zowel gereinigde als ongereinigde rookgassen (Figuur 1 –methaan rookgas–). De variatie in de concentratie is vrij gering alleen als de motor naar eilandbedrijf gaat stijgt de concentratie enigszins naar een niveau van ca. 2890 ppm. De methaan concentratie in de kas werd continue gemeten en vertoont meer variatie (Figuur 1 –methaan kas–). Zodra er CO₂ wordt gedoseerd met rookgassen afkomstig van de WKK stijgt de methaanconcentratie in de kas tot ca. 50 ppm. In de tussenliggende perioden, als er niet wordt gedoseerd, neemt de methaanconcentratie af tot een niveau van ca 10 ppm en op sommige momenten zelfs tot beneden de detectiegrens (gegevens zijn dan niet meer zichtbaar in Figuur 1). De methaanconcentratie in de kas is niet alleen afhankelijk van het wel of niet doseren maar ook van de mate van ventileren en schermen. Zo wordt op dag1 aan het einde van ochtend en begin van de middag continu CO₂ gedoseerd (Figuur 1 –CO₂ levering aan kas –). De CO₂concentratie (Figuur 1 –gemeten CO₂–) neemt tijdens deze periode toe van ca. 700 ppm tot ruim 1400 ppm. Gelijktijdig neemt de methaanconcentratie in de kas toe van ca. 20 ppm naar 60 ppm. In deze periode wordt er ook gelucht (Figuur 2 –raam wind– en –raam luw–) (Figuur 2). Nadat de CO₂-dosering rond 15:00 uur is gestopt, neemt de CO₂- en de methaanconcentratie geleidelijk weer af. De daling naar het lage niveau van ca. 10 ppm gaat langzaam omdat er nadat de CO₂-dosering is gestopt, niet of slechts weinig wordt geventileerd. In de avond wordt er, nadat het scherm is gesloten is (Figuur 2 –scherm–),boven het scherm fors geventileerd. Dan gaat de methaanconcentratie duidelijk dalen ondanks het feit dat er opnieuw CO₂-gedoseerd wordt, echter deze is afkomstig van de ketel.



Figuur1. Concentratieniveaus van etheen, methaan en NO_x in de rookgassen van de WKK installatie, gemeten direct achter de reiniger en in de kas op plantniveau in de periode van 21 tot en met 23 maart 2007. Tevens zijn de momenten van CO₂levering aan de kas en de gerealiseerde CO₂ concentratie weergegeven.

3.1.4 Stikstofoxiden

De rookgasreiniger heeft uiteraard invloed op de NO_x -concentratie in de rookgassen (Figuur 1– NO_x rookgas–). Indien de rookgasreiniger niet in werking is, ligt de NO_x -concentratie in de rookgassen op ca. 80 ppm. Indien de motor op eilandbedrijf draait (minder vermogen), daalt de NO_x -concentratie tot ca. 65 ppm. Wordt de rookgasreiniger ingeschakeld, dan daalt de NO_x -concentratie tot ca. 10 ppm (in eilandbedrijf bij ingeschakelde rookgasreiniger ca. 6 ppm). De concentratie in de kas (Figuur 1– NO_x kas–) is minder afhankelijk van de CO_2 -bron dan verwacht. Indien er in de avond en nacht ketel- CO_2 wordt gedoseerd om het CO_2 -setpoint van 1000 ppm te handhaven, varieert de NO_x -concentratie in de kas tussen de 80 en 140 ppb. De variatie hierin is duidelijk afhankelijk van de mate van ventilatie (Figuur 2 –raam wind- en –raam luw–). In de perioden dat CO_2 wordt gedoseerd met rookgassen van de WKK neemt de NO_x concentratie in de kas toe waarbij concentraties van 300 ppb worden bereikt (23 maart rond 11:00 uur). Op dag 2, rond het middaguur wordt er CO_2 gedoseerd met rookgassen van de WKK. Toch nemen zowel de CO_2 , NO_x en methaanconcentraties in de kas vrij plotseling af als gevolg van het snel open gaan van de ramen. Zodra de ramen weer dicht zijn nemen de concentraties weer toe.



Figuur 2. Weergave van de CO_2 -concentratie in de kas en de NO_x -concentratie in de rookgassen, de globale straling en het lampvermogen (belichting aan/uit), de raam- en schermstanden en het gasverbruik van de ketel en de WKK voor de periode van 21 tot en met 23 maart 2007.

3.1.5 CO₂

In deze paragraaf wordt nog iets nader ingegaan op het CO₂ verloop in de betreffende periode. Op 21 maart (dag 1) loopt de CO₂-concentratie (Figuur 1 –gemeten CO₂–) in het begin van de middag snel op omdat de ramen op dat moment dichtlopen. Het CO₂-setpoint van ca. 1400 ppm wordt bereikt en de dosering stopt. Ook op dag 2 is er een sterke relatie tussen de CO₂-concentratie en de raamstand. Rond 12:00 uur neemt het licht (Figuur 2 – globale straling–) af van ca. 600 W/m² naar ca. 150 W/m². Gelijktijdig lopen de ramen – raam luw – dicht (13 naar 0%) met als gevolg dat de CO₂-concentratie toeneemt van 600 naar 1400 ppm, waarna de CO₂-dosering wordt gestopt. Op de derde dag neemt vanaf 11:00 uur de CO₂-concentratie in de kas toe van ca. 1000 tot 1500 ppm. Om dit niveau te bereiken, wordt er vrijwel continue gedoseerd terwijl de ramen maar net open zijn (1 tot 5%). Deze rookgassen zijn afkomstig van de WKK. In de namiddag wordt de CO₂-dosering overgenomen door de ketel. De WKK blijft wel draaien maar de rookgasreiniger wordt om ca. 16:00 uitgeschakeld. De NO_x-concentratie daalt langzaam tot ca. 80 ppb tot het moment dat het scherm wordt gesloten. Het scherm vormt een barrière om gassen via de luchtramen af te voeren naar de buitenlucht. Als gevolg hiervan stijgt de NO_x-concentratie weer tot ca. 160 ppb. Ook bij dosering van ketelrookgassen komt een behoorlijke hoeveelheid NO_x in de kas. Globaal is de CO₂-concentratie 5000 tot 8000 keer zo hoog als de NO_x-concentratie. Alleen als het scherm gesloten wordt, loopt it verder op (tot ca. 11000). Op deze momenten is er wel CO₂-opname door het gewas (de lampen zijn aan) maar nemen de lekverliezen van de kas drastisch af. De CO₂ moet regelmatig worden aangevuld waarbij ook NO_x meekomt.

3.1.6 Samenvatting bedrijf nr. 1

Gedurende de meetperiode van 72 uur heeft de motor 71 uur en 30 minuten gedraaid. Van deze periode dat de motor draaide, werd gedurende 29 uur en 20 minuten rookgas van de WKK-installatie gereinigd. Voor de periode dat de motor heeft gelopen zijn de gemiddelde NO_x, methaan en etheen concentraties in het rookgaskanaal berekend, uitgesplitst voor de tijd met en zonder rookgasreiniging (Tabel 2). In tegenstelling tot de overige bedrijven, wordt op dit bedrijf de rookgasreiniger niet alleen in werking gezet indien er CO₂-vraag uit de kas ontstaat. Indien de rookgasreiniger aan staat wil dat dus niet zeggen dat er ook altijd CO₂ werd gedoseerd. Daarnaast wordt op dit bedrijf in principe de CO₂ vraag tijdens de nacht met behulp van de ketel ingevuld. Voor het kascompartiment zijn de gemiddelde etheen, methaan, NO_x en CO₂ concentraties berekend over de gehele meetperiode van 72 uur. Om een indicatie te krijgen van de range waarbinnen concentraties kunnen voorkomen zijn ook het minimum en maximum concentraties in de kas voor de betreffende periode weergegeven. De etheen concentratie in de kas is de gehele periode onder de detectiegrens van 5 ppb gebleven (Tabel 2)

Tabel 2. Gemiddelde concentraties van de verschillende componenten in het rookgaskanaal als de motor loopt met de rookgasreiniger aan of uit en in het kascompartiment op plantniveau. NB afhankelijk van het niveau worden de concentraties uitgedrukt in ppm of ppb.

Component	Rookgaskanaal			Kascompartiment	
	Reiniger aan	Reiniger uit	Gemiddeld	Minimum	Maximum
Etheen	193 ppb	307 ppb	<5 ppb	<5 ppb	<5 ppb
Methaan	2762 ppm	2777 ppm	18 ppm	5 ppm	58 ppm
NO _x	9 ppm	70 ppm	145 ppb	43 ppb	299 ppb
CO ₂	-	-	1030 ppm	605 ppm	1507 ppm

3.2 Bedrijf Nr. 2

3.2.1 Algemeen

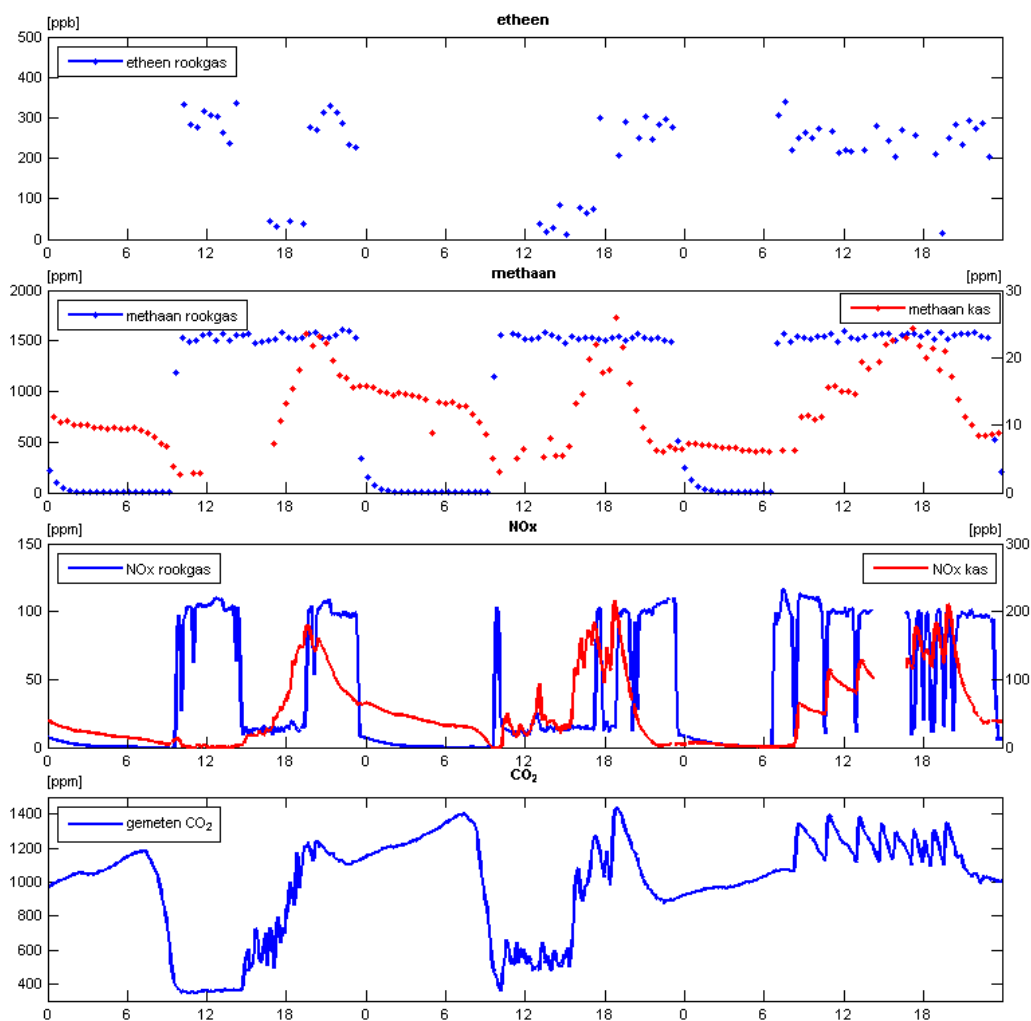
Bedrijf nr. 2 betreft een paprikabedrijf van ca. 6,2 ha met (gedeeltelijke) belichting. De metingen zijn verricht achter een gasmotor van 2 MWe met een ureum-rookgasreiniger in mei 2007. In dit rapport worden de meetresultaten over drie opeenvolgende dagen gepresenteerd, van 5 tot en met 7 mei. De rookgasreiniger was niet continu in bedrijf maar werd pas ingeschakeld als er CO₂ vraag was (besparing van ureum). De continue concentratiemetingen geven daardoor inzicht in de concentraties in zowel gereinigde als ongereinigde rookgassen.

3.2.2 Etheen

Het patroon van in- en uitschakelen van de gasmotor, is duidelijk terug te vinden in het etheen concentratiepatroon in het rookgaskanaal (Figuur 3 –etheen rookgas–). Bij uitgeschakelde motor daalt de etheen concentratie al snel tot onder de detectiegrens. De rookgasreiniger reduceert de etheenconcentratie van 200 à 300 ppb tot een niveau van 50 tot 100 ppb. Op sommige momenten is de concentratie zelfs lager dan de detectiegrens. De concentraties in de kas, op plantniveau, lagen bij alle metingen beneden de detectiegrens van 5 ppb (niet weergegeven in de figuur). In de meetperiode van 5 tot en met 7 mei valt een weekend. Dit heeft gevolgen voor het gebruik van de WKK-installatie. Op zaterdag 5 en zondag 6 mei werd de motor pas om 10 uur gestart, op andere dagen gebeurt dit al om 7 uur is. Dit is te herkennen aan de gasafname van de voor de rookgasmetingen gebruikte wkk (Figuur 4 –wkk 1–).

3.2.3 Methaan

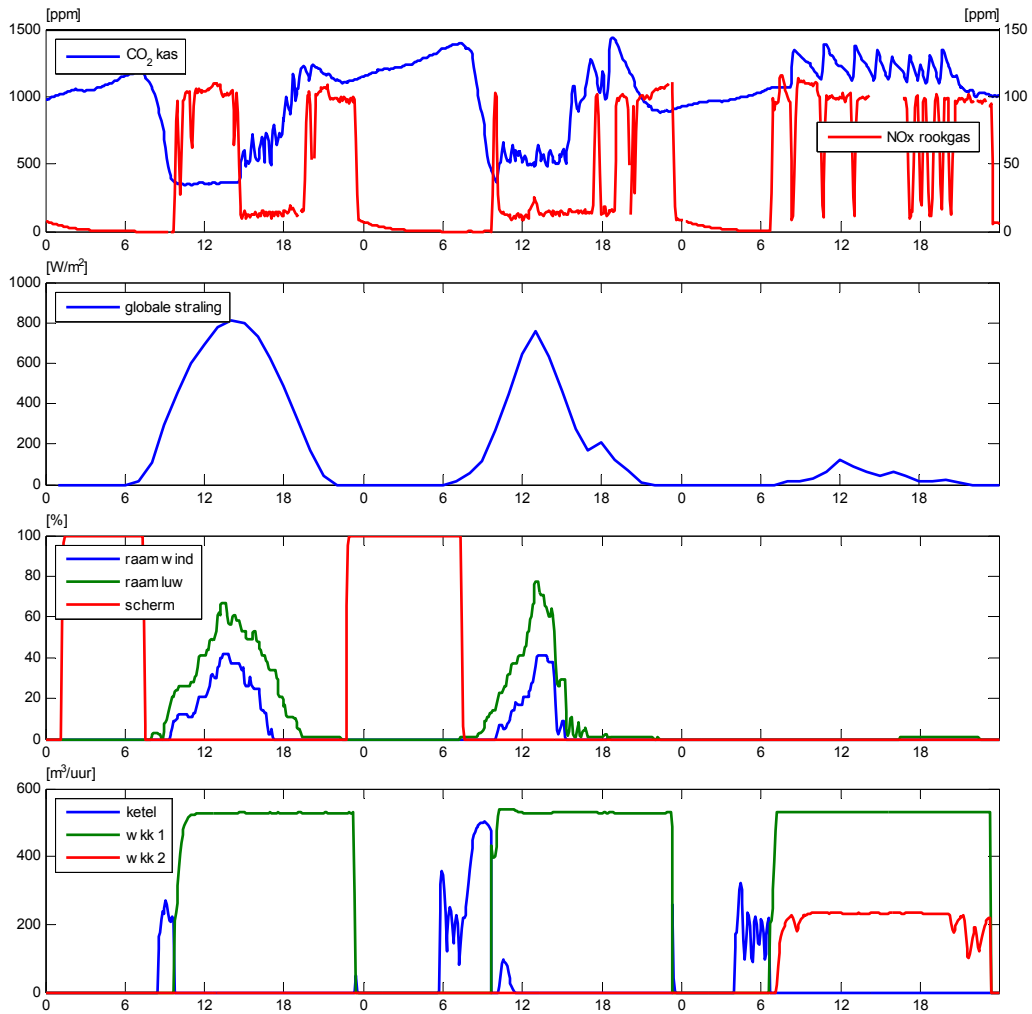
De methaanconcentratie bedroeg in zowel gereinigde als ongereinigde rookgassen ca. 1540 ppm (Figuur 3 –methaan rookgas–). De variatie in de concentratie is vrij gering (1460 – 1600 ppm). De methaan concentratie in de kas vertoonde meer variatie (Figuur 3 –methaan kas–). Zodra er CO₂ werd gedoseerd met rookgassen afkomstig van de WKK steeg de methaanconcentratie in de kas tot maximaal ca. 28 ppm. In de tussenliggende perioden, als er niet werd gedoseerd, daalde de methaanconcentratie tot relatief lage niveaus of tot beneden de detectiegrens (gegevens zijn dan niet meer zichtbaar of 0 in de figuur). Gedurende de nacht werd er niet geventileerd en gedurende de eerste twee nachten van de meetperiode was zelfs het scherm nog gesloten geweest. (Figuur 4 – raam wind–, –raam luw–, –scherm–). De methaanconcentratie nam onder die omstandigheden slechts langzaam af. Echter, zodra het scherm of de ramen werden geopend, daalde de methaanconcentratie snel naar lage niveaus van rond de detectiewaarde. Pas als er weinig geventileerd wordt, zoals in de namiddag en op de 3^e dag van de meetperiode, neemt de concentratie weer toe. Op Dag 1 is er door een storing in de installatie tussen 10 en 14:00 uur geen CO₂ gedoseerd. Dit is ook te herkennen aan het lage CO₂-niveau in de kas van rond de 350 ppm (Figuur 3 – gemeten CO₂–). Door de hoge mate van ventilatie kwam de methaanconcentratie in de kas niet boven de detectiegrens. Op Dag 3 werd in de ochtend tussen 7 en 12 uur slechts driemaal kort CO₂ gedoseerd. De methaanconcentratie nam daardoor stapsgewijs toe tot ca. 25 ppm (Figuur 3 –methaan kas–).



Figuur 3. Concentratieniveaus van etheen, methaan en NO_x in de rookgassen van de WKK installatie, gemeten direct achter de reiniger en in de kas op plantniveau in de periode van 5 tot en met 7 mei 2007. Tevens is de gerealiseerde CO₂ concentratie weergegeven.

3.2.4 Stikstofoxiden

De rookgasreiniger heeft uiteraard invloed op de NO_x-concentratie in de rookgassen (Figuur 3 –NO_x rookgas–). Indien de rookgasreiniger niet in werking is, ligt de NO_x-concentratie in de rookgassen tussen de ca. 90 en 115 ppm. De variatie in concentratie is bij deze motor duidelijk groter dan van de motor van Bedrijf nr. 1 (paragraaf 3.1). Er is echter geen duidelijk aanwijsbare reden voor deze variatie. Bij CO₂ dosering naar de kas wordt de reiniger ingeschakeld, de NO_x-concentratie daalt tot een niveau van 8 tot 20 ppm. De concentratie in de kas (–NO_x kas–) varieert tussen 0 (niet detecteerbaar) en 210 ppb. De variatie hierin is duidelijk afhankelijk van de mate van ventilatie (Figuur 3 –raam wind– en –raam luw–). Op de derde dag is er in de ochtend duidelijk een relatie in de toename van de NO_x concentratie in de kas en het (pulserend) CO₂-dosereren. De reiniger wordt slechts kortstondig aangezet op het moment dat er CO₂-vraag is (Figuur 4 –CO₂ kas– en NO_x rookgas–). De NO_x concentratie in de rookgassen daalt dan kortstondig, terwijl de CO₂-concentratie in de kas snel toeneemt. Tussen twee doseermomenten daalt de NO_x-concentratie in de kas. Bij grote raamstanden kan de CO₂-concentratie in de kas op ruim 500 ppm worden gehouden. Op Dag 2 wordt door de veranderende weersomstandigheden (Figuur 4 –globale straling–) rond 16:00 uur de ramen snel dichtgetrokken. De CO₂ concentratie neemt dan toe tot ca. 1300 ppm.



Figuur 4. Weergave van de CO₂-concentratie in de kas en de NO_x-concentratie in de rookgassen, de globale straling, de raam- en schermstanden en het gasverbruik van de ketel en de WKK's voor de periode van 5 tot en met 7 mei 2007.

3.2.5 Samenvatting bedrijf nr. 2

Gedurende de meetperiode van 72 uur heeft de motor 44 uur gedraaid. Van deze periode werd gedurende 16 uur en 10 minuten rookgas van de WKK-installatie gereinigd en gebruikt voor CO₂ dosering. Voor de periode dat de motor heeft gelopen zijn de gemiddelde NO_x, methaan en etheen concentraties in het rookgaskanaal berekend, uitgesplitst voor de tijd met en zonder rookgasreiniging (Tabel 3).

Voor het kascompartiment zijn de gemiddelde etheen, methaan, NO_x en CO₂ concentraties berekend over de gehele meetperiode van 72 uur. Om een indicatie te krijgen van de range waarbinnen concentraties kunnen voorkomen zijn ook de minimum en maximum concentraties in de kas voor de betreffende periode weergegeven. De NO_x concentratie in de kas daalde incidenteel tot beneden de detectielimiet van 2 ppb en de etheenconcentratie is de gehele periode onder de detectiegrens van 5 ppb gebleven (Tabel 3)

Tabel 3. Gemiddelde gasconcentraties van de verschillende componenten in het rookgaskanaal als de motor loopt met de rookgasreiniger aan of uit en in het kascompartiment op plantniveau. NB afhankelijk van het niveau worden de concentraties uitgedrukt in ppm of ppb.

Component	Rookgaskanaal		Kascompartiment		
	Reiniger aan	Reiniger uit	Gemiddeld	Minimum	Maximum
Etheen	63 ppb	310 ppb	<5 ppb	<5 ppb	<5 ppb
Methaan	1535 ppm	1527 ppm	12 ppm	3 ppm	26 ppm
NO _x	14 ppm	96 ppm	50 ppb	<2 ppb	226 ppb
CO ₂	-	-	989 ppm	345 ppm	1437 ppm

3.3 Bedrijf Nr. 3

3.3.1 Algemeen

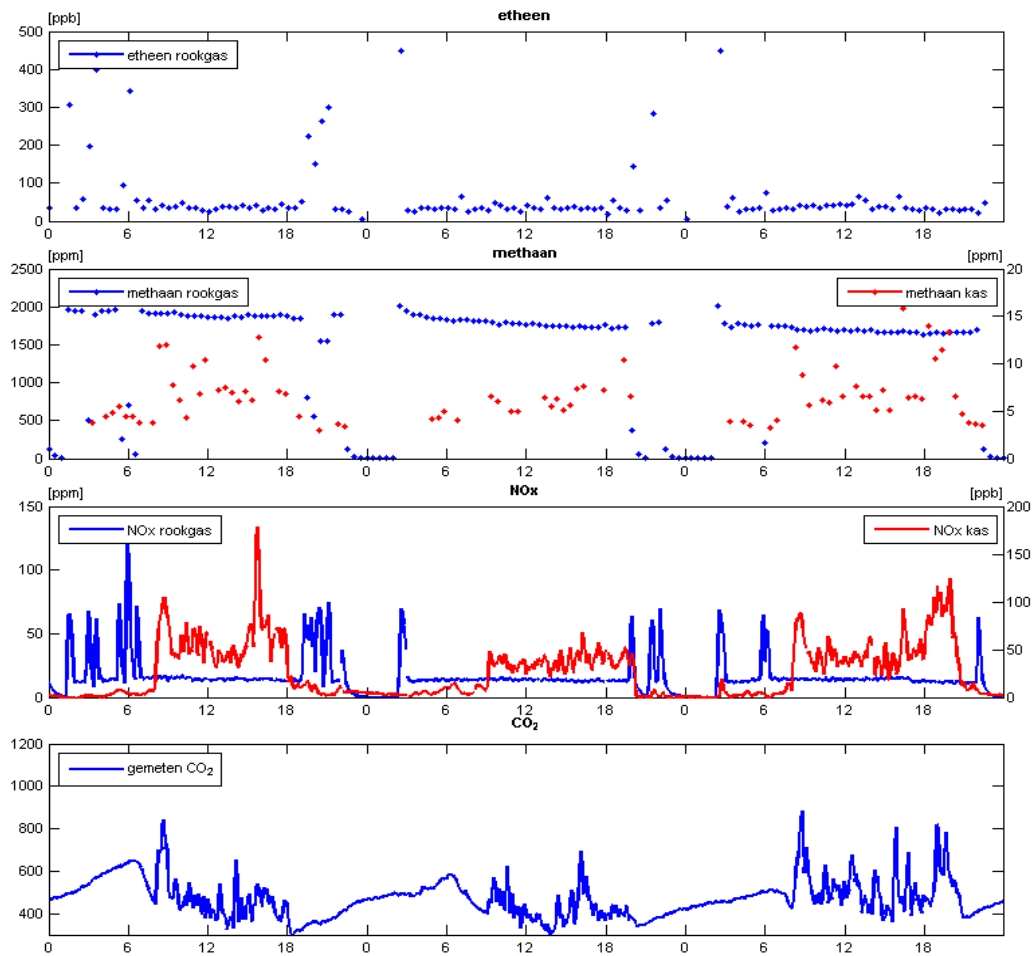
Bedrijf nr. 3 betreft een tomaten bedrijf van ca. 4.1 ha. met (gedeeltelijke) belichting. De energievoorziening loopt via een energiecluster met 3 WKK-installaties en een 'stand-by' ketel. De cluster levert energie voor meerdere bedrijven, waaronder ook een belichtende rozenteler. Hierdoor is er veelvuldig vraag naar CO₂. De metingen zijn verricht achter een gasmotor van 1.95 MWe met een ureum-rookgasreiniger en in de kas van 1 tot en met 3 juni.

3.3.2 Etheen

Op dit bedrijf is de rookgasreiniger vrijwel continu in bedrijf waardoor er alleen gedurende enkele vrij korte perioden en waarschijnlijk onder instabiele omstandigheden gemeten kon worden met de rookgasreiniger uitgeschakeld. Ook de tijdsduur van een meetcyclus heeft invloed op het getoonde patroon bij veelvuldig in en uitschakelen van de reiniger omdat tijdens één meetcyclus van 15 minuten, de rookgasreiniger zowel in als uitgeschakeld geweest kan zijn. Ondanks de variatie is het patroon van in- en uitschakelen van de rookgasreiniger wel terug te vinden in het etheen concentratiepatroon (0–etheen rookgas–). In ongereinigde rookgassen ligt de etheen-concentratie tussen de 200 en 500 ppb. Als de rookgasreiniger is ingeschakeld, daalt de etheen concentratie in de rookgassen tot een stabiel niveau van ca. 30 á 40 ppb. De concentraties in de kas, op plantniveau, lagen beneden de detectiewaarde van 5 ppb (niet weergegeven in de figuur)

3.3.3 Methaan

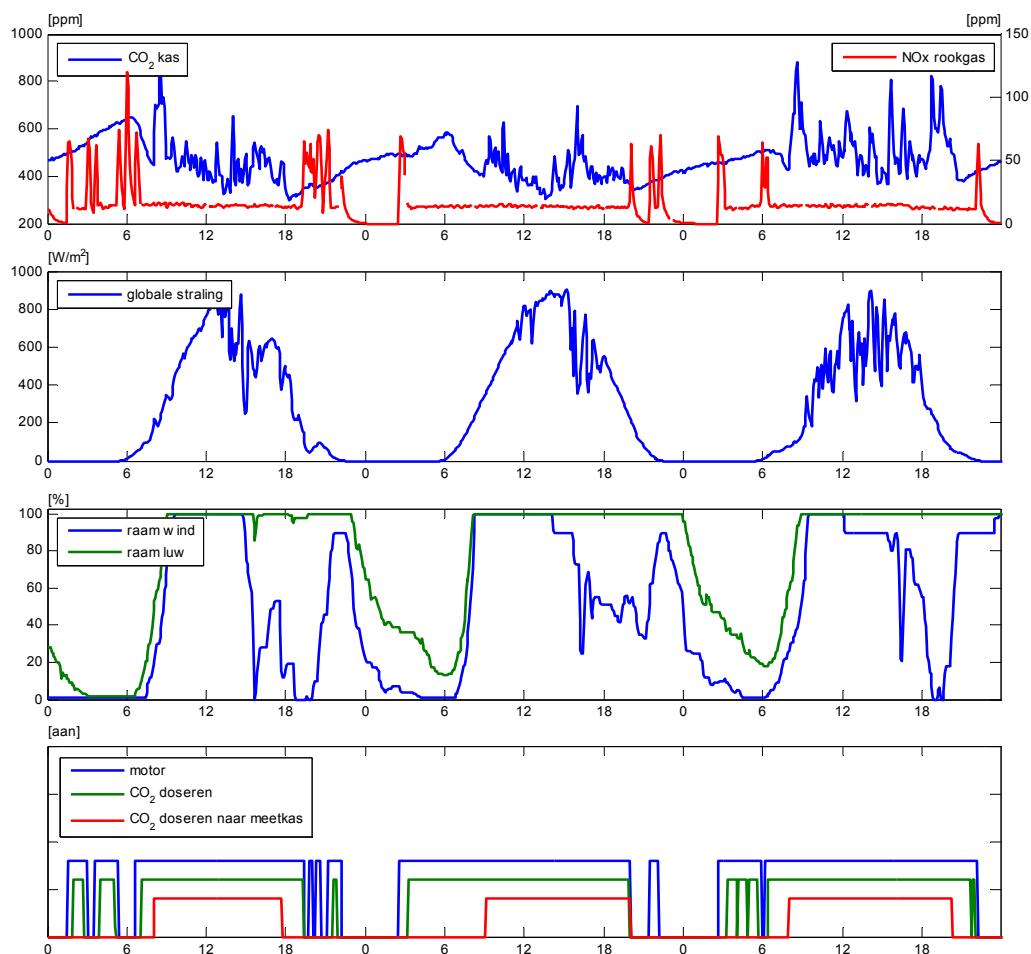
De methaanconcentratie bedroeg ca. 1800 ppm in zowel gereinigde als ongereinigde rookgassen (Figuur 5 – methaan rookgas–). Er is enige variatie in de concentratie (1650 – 1950 ppm). Over de periode van drie dagen tekent zich een langzaam dalende trend van de methaanconcentratie in de rookgassen af. Tegelijkertijd werd er een lichte stijging van het zuurstofgehalte in de rookgassen geconstateerd. Dit kan op verdunning met buitenlucht duiden maar een eenduidige oorzaak is niet gevonden. Bij het opstarten van de motor werd soms kortdurend een hoge methaanconcentraties tot 5500 ppm gemeten (niet weergegeven in grafiek). Of dit altijd optreedt bij het starten van de motor kon niet uit de meetgegevens worden afgeleid. Dit heeft te maken met de 'traagheid' van het meetstelsel, één meetcyclus van de koolwaterstof metingen met behulp van de gaschromatograaf duurt 15 minuten. Het startmoment van de motor valt niet altijd samen met de monsternamen waardoor een piek bij het opstarten soms wordt 'gemist'. De methaanconcentratie in de kas werd continue gemeten en vertoonde ook enige variatie (Figuur 5 –methaan kas–). Zodra er CO₂ wordt gedoseerd met rookgassen afkomstig van de WKK stijgt de methaanconcentratie in de kas tot maximaal ca. 17 ppm. In de tussentijdse perioden, als er niet wordt gedoseerd, daalt de methaanconcentratie tot lage niveaus of zelfs beneden de detectiegrens (gegevens zijn dan niet meer zichtbaar of 0 in de figuur). In deze periode van het jaar wordt ook erg veel geventileerd, zelfs in de nacht (Figuur 6 –raam wind–, –raam luw–). De concentratie daalt na het stoppen van de CO₂ dosering weer snel tot onder de detectiegrens.



Figuur 5. Concentratieniveaus van etheen, methaan en NO_x in de rookgassen van de WKK installatie, gemeten direct achter de reiniger en in de kas op plantniveau in de periode van 1 tot en met 3 juni 2007. Tevens is de gerealiseerde CO₂ concentratie weergegeven.

3.3.4 Stikstofoxiden

De rookgasreiniger heeft uiteraard invloed op de NO_x-concentratie in de rookgassen (Figuur 5 –NO_x rookgas–). Indien de rookgasreiniger niet in werking is, ligt de NO_x-concentratie in de rookgassen tussen de ca. 90 en 115 ppm. Bij dosering van CO₂ in de kas wordt de reiniger ingeschakeld. Dan daalt de NO_x-concentratie tot een niveau van 10 tot 17 ppm. De concentratie in de kas (Figuur 5 –NO_x kas–) varieert tussen niet detecteerbaar en 180 ppb. De variatie hierin is duidelijk afhankelijk van de mate van ventilatie (Figuur 6 –raam wind– en –raam luw–). Door de opzet van dit energiecluster met levering aan meerdere bedrijven, is er geen directe relatie tussen het aanzetten van de rookgasreiniger en het CO₂ doseren in de kas waarin de metingen zijn uitgevoerd. Zo werd er gedurende de nacht met deze motor elektriciteit en CO₂ geproduceerd voor een belichtende rozenteler die lid is van de energiecombinatie. Op het bedrijf waar de metingen zijn verricht werd in de nacht slechts kortstondig CO₂ gedoseerd waarvoor de rookgasreiniger ook slechts kortstondig in werking is geweest. Dit wordt duidelijk gemaakt in de onderste subfiguur van 0. De blauwe lijn ‘motor’ geeft aan of de motor aan (hoog) of uit (laag) is. De groene lijn ‘CO₂ doseren’ geeft aan of de rookgasreiniger van deze motor is ingeschakeld. De rode lijn ‘CO₂ doseren naar meetkas’ geeft tenslotte aan of er ook daadwerkelijk CO₂ in de meetkas is gedoseerd. Bij grote raamstanden kan de CO₂-concentratie in de kas op ruim 400 ppm worden gehouden. In de perioden dat er CO₂ gedoseerd wordt, is de CO₂ concentratie gemiddeld 470 ppm. Tijdens deze drie dagen zijn er opvallende verschillen in de tijdsduur en het tijdstip dat er CO₂ gedoseerd wordt. Respectievelijk van 08:00 – 17:45, 09:00 – 20:00 en van 08:00 – 20:15.



Figuur 6. Weergave van de CO₂-concentratie in de kas en de NO_x-concentratie in de rookgassen, de globale, de raamstanden en de status van de motor, CO₂-dosering vanuit de motor en CO₂-dosering naar de meetkas voor de periode van 1 tot en met 3 juni 2007.

3.3.5 Samenvatting bedrijf nr. 3

Gedurende de meetperiode van 72 uur heeft de motor 55 uur en 25 minuten gedraaid. Van deze periode werd gedurende 48 uur en 45 minuten rookgas van de WKK-installatie gereinigd en gebruikt voor CO₂ dosering. Voor de periode dat de motor heeft gelopen zijn de gemiddelde NO_x, methaan en etheen concentraties in het rookgaskanaal berekend, uitgesplitst voor de tijd met en zonder rookgasreiniging (Tabel 4). Door het veelvuldig in en uitschakelen van de rookgasreiniger is het niet uitgesloten dat de meetwaarden deels betrekking hebben op een niet gestabiliseerde bedrijfssituatie.

Voor het kascompartiment zijn de gemiddelde etheen, methaan, NO_x en CO₂ concentraties berekend over de gehele meetperiode van 72 uur. Om een indicatie te krijgen van de range waarbinnen concentraties kunnen voorkomen zijn ook de minimum en maximum concentraties in de kas voor de betreffende periode weergegeven. De NO_x concentratie in de kas daalde incidenteel tot beneden de detectielimiet van 2 ppb en de etheenconcentratie is de gehele periode onder de detectiegrens van 5 ppb gebleven (Tabel 4).

Tabel 4. Gemiddelde gasconcentraties van de verschillende componenten in het rookgaskanaal als de motor loopt met de rookgasreiniger aan of uit en in het kascompartiment op plantniveau. NB afhankelijk van het niveau worden de concentraties uitgedrukt in ppm of ppb.

Component	Rookgaskanaal			Kascompartiment	
	Reiniger aan	Reiniger uit	Gemiddeld	Minimum	Maximum
Etheen	37 ppb	171 ppb	<5 ppb	<5 ppb	<5 ppb
Methaan	1785 ppm	1826 ppm	7 ppm	3 ppm	16 ppm
NO _x	14 ppm	38 ppm	26 ppb	<2 ppb	190 ppb
CO ₂	-	-	468 ppm	295 ppm	938 ppm

3.4 Bedrijf Nr. 4

3.4.1 Algemeen

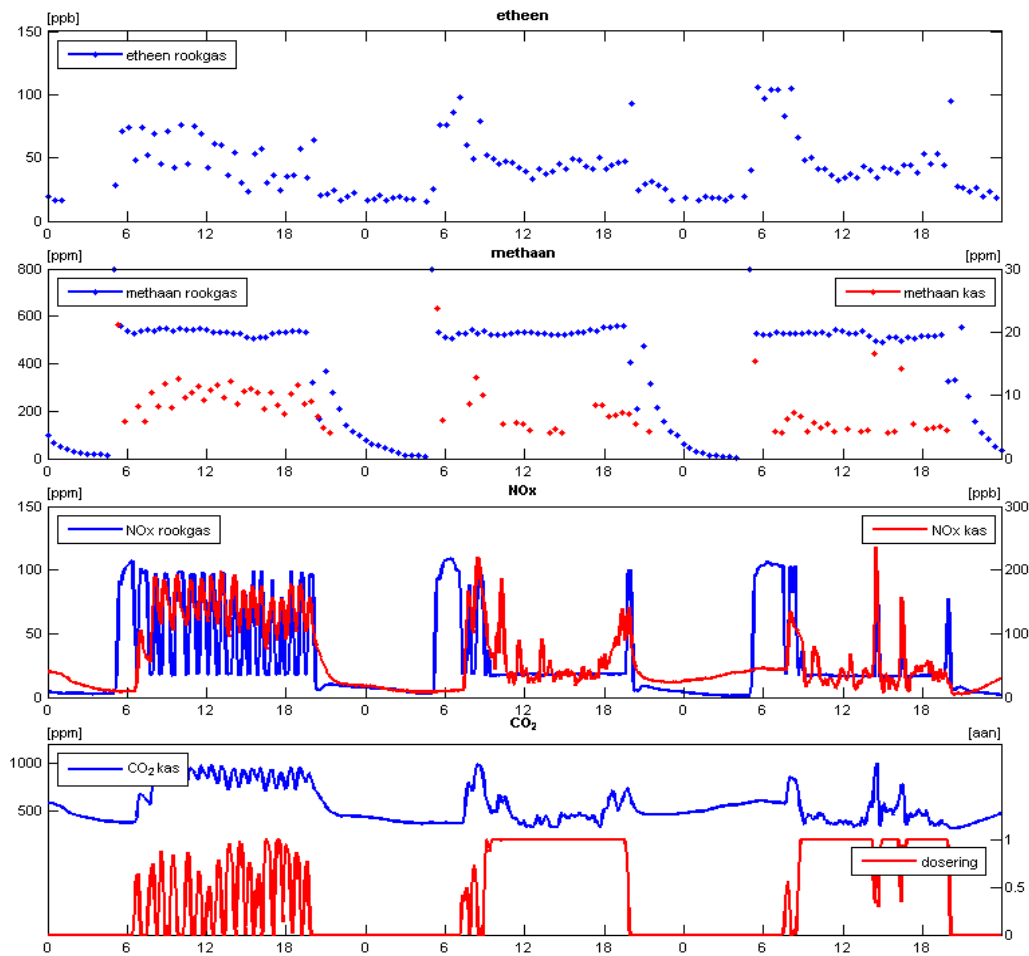
Bedrijf nr. 4 betreft een potplantenbedrijf van ca. 2.1 ha met (gedeeltelijke) belichting. De energievoorziening loopt via een energiecluster met 3 WKK-installaties en een 'stand-by' ketel. De cluster levert energie voor het potplantenbedrijf en een belichtende rozenteelt. Hierdoor is er veelvuldig vraag naar CO₂. De metingen zijn verricht achter een gasmotor van 0,69 MWe met een ureum-rookgasreiniger en in de kas van 9 tot en met 11 augustus.

3.4.2 Etheen

Het patroon van in- en uitschakelen van de rookgasreiniger is duidelijk terug te vinden in het etheen concentratiepatroon (0–etheen rookgas–). In ongereinigde rookgassen ligt de etheenconcentratie rond de 100 ppb. Dit was door het veelvuldige in en uitschakelen van de rookgasreiniger lastig te bepalen, echter op de derde dag tussen 6 en 8 in de morgen is er een periode dat de motor constant loopt zonder dat de reiniger is ingeschakeld. Als de rookgasreiniger is ingeschakeld, daalt de etheenconcentratie in de rookgassen tot een stabiel niveau van ca. 40 à 50 ppb. De concentraties in de kas, op plantniveau, lagen beneden de detectiewaarde van 5 ppb (niet weergegeven in de figuur). Dat de concentratie na het uitschakelen van de motor slechts langzaam afneemt, is het gevolg van de plaats van het monstername punt dat ver van de uitstroomopening van de schoorsteen was verwijderd waardoor de concentratie slechts langzaam afneemt.

3.4.3 Methaan

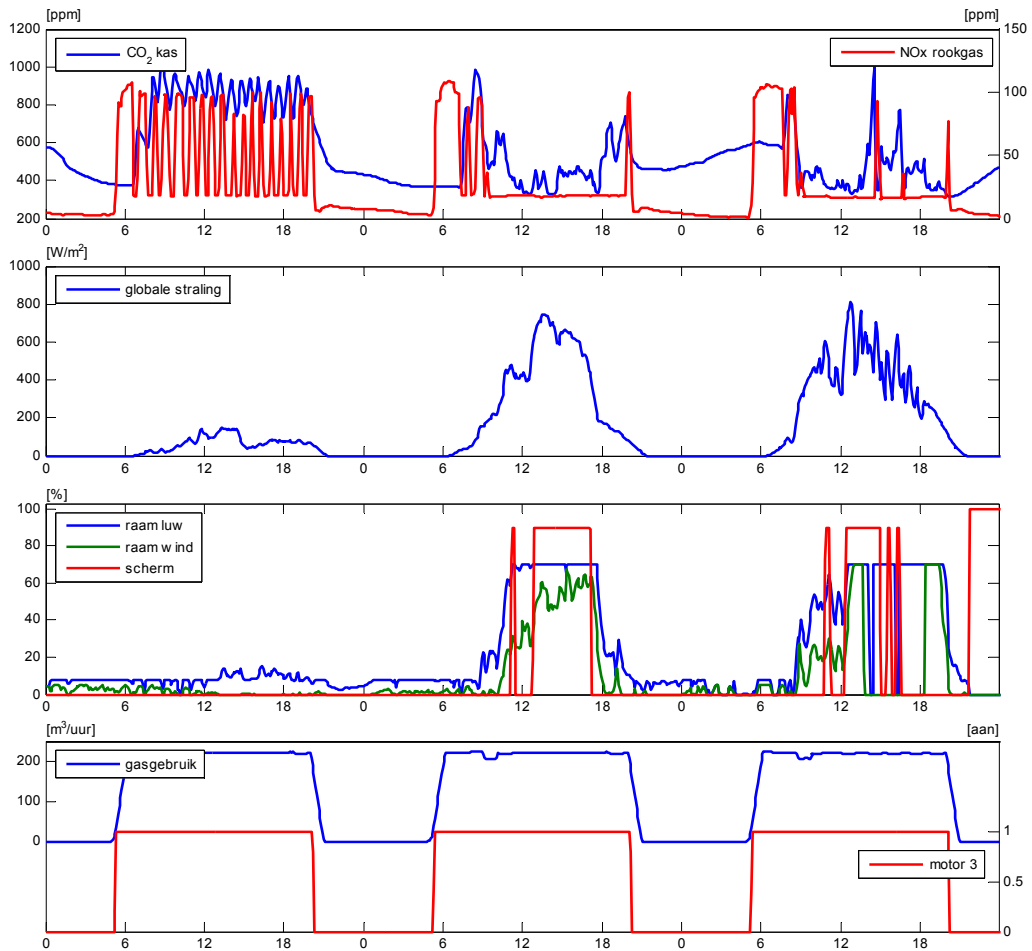
De rookgasreiniger heeft geen invloed op de methaan concentratie in de rookgassen. De concentratie bedroeg ca. 520 ppm in zowel gereinigde als ongereinigde rookgassen (Figuur 7 –methaan rookgas–). Bij het starten van de motor zijn er uitschieters naar boven tot 3000 ppm (niet weergegeven in grafiek). Indien de gehele meetreeks in ogenschouw wordt genomen, blijkt dit vaker voor te komen bij het opstarten van de motor. De methaan concentratie in de kas werd continue gemeten en vertoonde ook enige variatie (Figuur 7 –methaan kas–). Zodra er CO₂ wordt gedoseerd met rookgassen afkomstig van de WKK stijgt de methaanconcentratie in de kas tot maximaal ca. 17 ppm. In de tussenliggende perioden, als er niet wordt gedoseerd, daalt de methaanconcentratie tot lage niveaus of zelfs beneden de detectiegrens (gegevens zijn dan niet meer zichtbaar of 0 in de figuur). In de betreffende periode is er als gevolg van de weersomstandigheden op dag 1 weinig, maar constant geventileerd. Op dag 2 en 3 is er veel geventileerd (Figuur 8 –raam wind–, –raam luw–). Op de eerste dag lag het methaangehalte dan ook wat hoger dan op de overige dagen. De methaanconcentratie daalde na het stoppen van de CO₂ dosering weer snel tot onder de detectiegrens.



Figuur 7. Concentratieniveaus van etheen, methaan en NO_x in de rookgassen van de WKK installatie, gemeten direct achter de reiniger en in de kas op plantniveau in de periode van 9 tot en met 11 augustus 2007. Tevens is de gerealiseerde CO_2 concentratie en de CO_2 doseerstatus weergegeven.

3.4.4 Stikstofoxiden

Indien de rookgasreiniger niet in werking is, ligt de NO_x -concentratie in de rookgassen tussen de ca. 95 en 105 ppm (Figuur 7 – NO_x rookgas–). Bij dosering van CO_2 in de kas wordt de reiniger ingeschakeld. Dan daalt de NO_x -concentratie tot een niveau van ca. 20 ppm. Door de beperkte ventilatie werd op de eerste dag de reiniger ca. 20 keer in en uitgeschakeld. Nadat het gewenste CO_2 -setpoint was bereikt werd de CO_2 -dosering tijdelijk gestaakt. De concentratie in de kas (Figuur 8 – NO_x kas–) varieerde tussen 0 (niet detecteerbaar) en 230 ppb. De variatie hierin is duidelijk afhankelijk van de mate van ventilatie (Figuur 8 –raam wind–, –raam luw– en –scherm–). De NO_x in de kas stijgt enkele malen zeer snel. Op de derde dag valt dit samen met het sluiten van het scherm met daarbij ook nog voor een korte periode het sluiten van de ramen (ca. 14:00 uur) waardoor niet alleen de CO_2 -concentratie, maar ook de NO_x -concentratie sterk oploopt. Om ca. 16:30 gebeurt dit nogmaals. Zodra het raam weer opengaat, neemt zowel de CO_2 als de NO_x -concentratie weer snel af. Mogelijk dat hier het schakelmoment van CO_2 -dosering en in werking zijn van de rookgasreiniger niet helemaal goed loopt. Op de 2^e dag wordt er continue gedoseerd en neemt de concentratie NO_x pas na 18:00 duidelijk doch geleidelijk toe als de ramen langzaam dichtlopen.



Figuur 8. Weergave van de CO₂-concentratie in de kas en de NO_x-concentratie in de rookgassen, de globale straling, de raam- en schermstanden en het gasverbruik van de WKK met de motor-indicatie voor de periode van 9 tot en met 11 augustus 2007.

3.4.5 Samenvatting bedrijf nr. 4

Gedurende de meetperiode van 72 uur heeft de motor 45 uur gedraaid. Van deze periode werd gedurende 11 uur en 20 minuten rookgas van de WKK-installatie gereinigd en gebruikt voor CO₂ dosering. Voor de periode dat de motor heeft gelopen zijn de gemiddelde NO_x, methaan en etheen concentraties in het rookgaskanaal berekend, uitgesplitst voor de tijd met en zonder rookgasreiniging (Tabel 5).

Voor het kascompartiment zijn de gemiddelde etheen, methaan, NO_x en CO₂ concentraties berekend over de gehele meetperiode van 72 uur. Om een indicatie te krijgen van de range waarbinnen concentraties kunnen voorkomen zijn ook de minimum en maximum concentraties in de kas voor de betreffende periode weergegeven. De etheen concentratie is de gehele periode onder de detectiegrens van 5 ppb gebleven (Tabel 5).

Tabel 5. Gemiddelde gasconcentraties van de verschillende componenten in het rookgaskanaal als de motor loopt met de rookgasreiniger aan of uit en in het kascompartiment op plantniveau. NB afhankelijk van het niveau worden de concentraties uitgedrukt in ppm of ppb.

Component	Rookgaskanaal			Kascompartiment	
	Reiniger aan	Reiniger uit	Gemiddeld	Minimum	Maximum
Etheen	43 ppb	81 ppb	<5 ppb	<5 ppb	<5 ppb
Methaan	529 ppm	508 ppm	8 ppm	4 ppm	24 ppm
NO _x	22 ppm	90 ppm	55 ppb	4 ppb	242 ppb
CO ₂	-	-	539 ppm	314 ppm	1036 ppm

3.5 Bedrijf Nr. 5

3.5.1 Algemeen

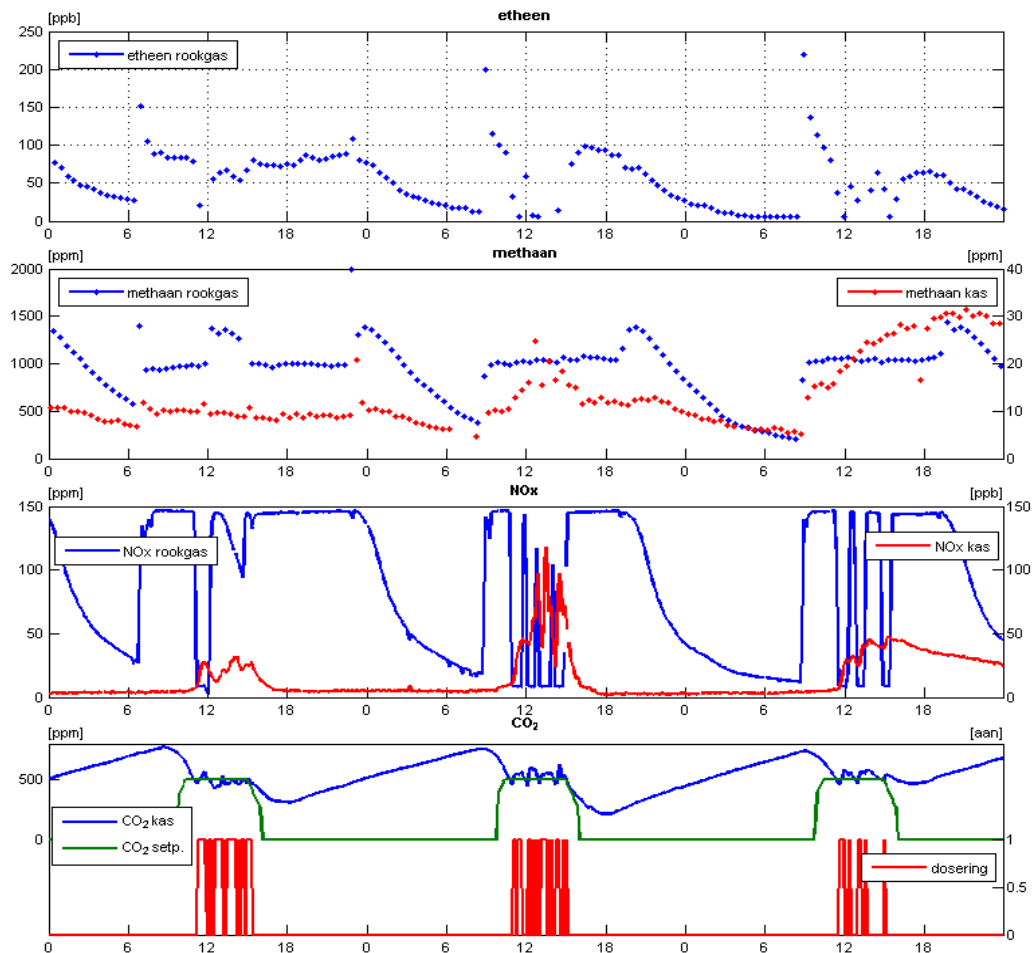
Bedrijf nr. 5 betreft een paprikabedrijf van ca. 4,5 ha. De metingen zijn verricht achter een gasmotor van 1.56 MWe met een ureum-rookgasreiniger en in de kas van 19 tot en met 21 oktober.

3.5.2 Etheen

Het patroon van in- en uitschakelen van de rookgasreiniger is in de puntenwolk van Figuur 9 (–etheen rookgas–) wat lastig terug te vinden. In Figuur 9 verloopt de afname van de etheenconcentratie na het moment dat de motor is uitgeschakeld, (Figuur 10 –motor) slechts langzaam. Dit is het gevolg van de plaats van het monsternamepunt ver van de uitstroomopening van de schoorsteen waardoor de lucht in het rookgaskanaal slechts langzaam met buitenlucht wordt vermengd. In ongereinigde rookgassen ligt de etheenconcentratie rond de 100 ppb. Als de rookgasreiniger is ingeschakeld, daalt de etheen concentratie in de rookgassen tot een stabiel niveau van ca. 10 ppb. De concentraties in de kas, op plantniveau, lagen beneden de detectiewaarde van 5 ppb (niet weergegeven in de figuur).

3.5.3 Methaan

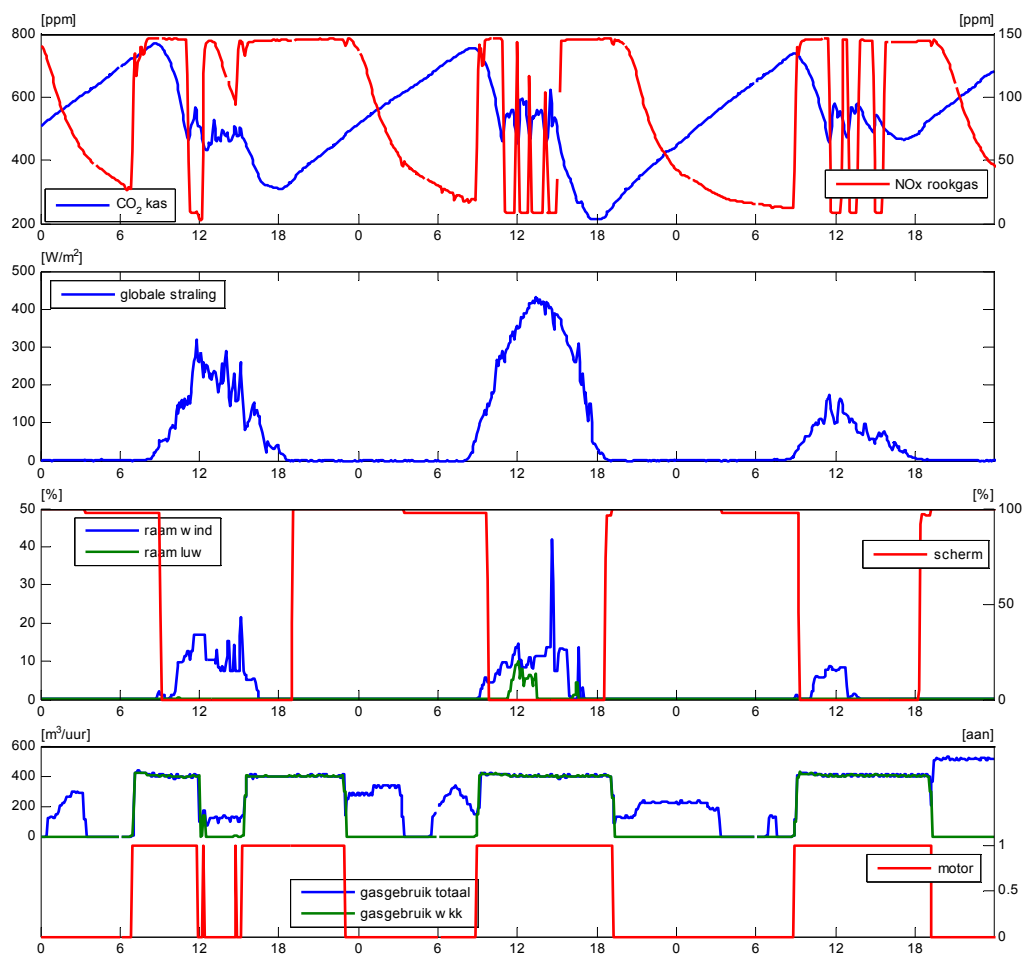
De methaanconcentratie bedroeg ca. 1000 ppm in zowel gereinigde als ongereinigde rookgassen (Figuur 9 –methaan rookgas–). Bij het starten van de motor zijn er uitschieters naar boven tot 3000 ppm (niet weergegeven in Figuur 9). Zoals ook bij etheen werd geconstateerd nam de methaanconcentratie na het uitschakelen van de motor slecht langzaam af. Doordat bij het afzetten van de motor een methaanpiek ontstaat, begint de daling op een hoger niveau dan als de motor gewoon draait. Tijdens de ‘piek’ na 12 uur van de eerste dag, is de motor uitgeschakeld, (Figuur 10 –motor–). De methaanconcentratie in de kas werd continue gemeten en vertoonde de eerste 2 dagen weinig variatie (Figuur 9 –methaan kas–). Zodra er CO₂ wordt gedoseerd met rookgassen afkomstig van de WKK steeg de methaanconcentratie in de kas vrijwel niet (Figuur 10). Op deze momenten werd namelijk ook geventileerd (Figuur 10 –raam wind–, –raam luw–). Als op de derde dag na de middag de ramen dichtgaan, neemt de methaanconcentratie in de kas geleidelijk toe tot een niveau van ca. 30 ppm. Dat de methaanconcentratie ‘s avonds en ‘s nachts slechts weinig tot niet daalt, heeft te maken met het gesloten houden van de ramen en het scherm gedurende de nacht in deze periode. (Figuur 10 –scherm–).



Figuur 9. Concentratieniveaus van etheen, methaan en NO_x in de rookgassen van de WKK installatie, gemeten direct achter de reiniger en in de kas op plantniveau in de periode van 19 tot en met 21 oktober 2007. Tevens is de gerealiseerde CO_2 concentratie, het setpoint CO_2 en de status van de CO_2 -dosering weergegeven.

3.5.4 Stikstofoxiden

Indien de rookgasreiniger niet in werking is, ligt de NO_x -concentratie in de rookgassen tussen de ca. 140 en 150 ppm (Figuur 9 – NO_x rookgas–). Bij dosering van CO_2 in de kas wordt de reiniger ingeschakeld. Dan daalt de NO_x -concentratie tot een niveau van ca. 15 ppm. De langzame afname van de NO_x -concentratie na uitschakelen van de motor heeft te maken met de plaats van het monsternamepunt in het rookgaskanaal. De concentratie in de kas (Figuur 9 – NO_x kas–) varieerde tussen 10 en 130 ppb. De variatie hierin was duidelijk afhankelijk van de mate van CO_2 -dosering. (Figuur 9 –dosering–). De eerste dag werd er wel regelmatig CO_2 gedoseerd, echter om 12:00 en 14:30 is de motor uitgeschakeld (storing) waarna de ketel de CO_2 -dosering heeft overgenomen (Figuur 10 – gasgebruik totaal– en –gasgebruik wkk–). In deze periode stijgt de NO_x -concentratie in de kas niet of nauwelijks. Op dag 2 en dag 3 is tijdens de doseermomenten een duidelijke stijging van de NO_x -concentratie in de kas terug te vinden. Op de derde dag stijgt het niveau duidelijk minder ver, maar op deze dag werd ook minder gedoseerd omdat er minder geventileerd werd.



Figuur 10. Weergave van de CO_2 -concentratie in de kas en de NO_x -concentratie in de rookgassen, de globale straling, de raam- en schermstanden en het gasverbruik van de ketel en de WKK voor de periode van 19 tot en met 21 oktober 2007..

3.5.5 Samenvatting bedrijf nr.5

Gedurende de meetperiode van 72 uur heeft de motor 33 uur en 40 minuten gedraaid. Van deze periode werd gedurende 3 uur en 45 minuten rookgas van de WKK-installatie gereinigd en gebruikt voor CO_2 dosering. Voor de periode dat de motor heeft gelopen zijn de gemiddelde NO_x , methaan en etheen concentraties in het rookgaskanaal berekend, uitgesplitst voor de tijd met en zonder rookgasreiniging (Tabel 6).

Voor het kascompartiment zijn de gemiddelde etheen, methaan, NO_x en CO_2 concentraties berekend over de gehele meetperiode van 72 uur. Om een indicatie te krijgen van de range waarbinnen concentraties kunnen voorkomen zijn ook de minimum en maximum concentraties in de kas voor de betreffende periode weergegeven. De NO_x concentratie in de kas daalde incidenteel tot beneden de detectielimiet van 2 ppb en de etheenconcentratie is de gehele periode onder de detectiegrens van 5 ppb gebleven (Tabel 6).

Tabel 6. Gemiddelde gasconcentraties van de verschillende componenten in het rookgaskanaal als de motor loopt met de rookgasreiniger aan of uit en in het kascompartiment op plantniveau. NB afhankelijk van het niveau worden de concentraties uitgedrukt in ppm of ppb.

Component	Rookgaskanaal			Kascompartiment	
	Reiniger aan	Reiniger uit	Gemiddeld	Minimum	Maximum
Etheen	12 ppb	80 ppb	<5 ppb	<5 ppb	<5 ppb
Methaan	1019 ppm	1032 ppm	13 ppm	5 ppm	31 ppm
NO _x	13 ppm	128 ppm	14 ppb	<2 ppb	121 ppb
CO ₂	-	-	535 ppm	212 ppm	769 ppm

4. Methaanslip

Aardgasgestookte zuigermotoren hebben als nadeel dat een deel van de brandstof, waaronder methaan onverbrand als rookgas naar de lucht wordt geëmitteerd. Aardgas bestaat voor meer dan 83% uit methaan. Methaan is een sterk broeikasgas en als zodanig belastend voor het milieu. In het kader van het Kyoto-protocol is Nederland verplicht de emissie van niet CO₂-broeikasgassen zoals methaan terug te dringen. Het GLK certificatieschema, dat tuinders stimuleert milieu bewuste investering te doen, stelt eisen met betrekking tot de emissie van methaan uit WKK-installaties. Momenteel ontbreekt het aan betrouwbare meetwaarden die inzicht geven in de emissie van methaan uit WKK-installaties.

De methaan emissie is o.a. afhankelijk van de verbrandingstemperatuur. Om te kunnen voldoen aan de NO_x emissie eisen wordt over het algemeen met een beperkte luchtvermaat gewerkt (lean-burn) waardoor de verbrandingstemperatuur lager is en vorming van NO_x wordt voorkomen. In de motor komen ook koude zones voor waar de temperatuur feitelijk te laag is voor een volledige verbranding. Deze zones bevinden zich o.a. tussen de zuiger en cilinder en bij de inlaat- en uitlaatkleppen van de motor. Als neveneffect van het ontwerp en de afstelling van de motor neemt de emissie van onverbrande brandstof toe.

Voor elk van de vijf motoren is conform de geldende rekenregels op basis van de methaanconcentratie in het rookgaskanaal het percentage methaanslip berekend (Tabel 7). Aangezien de methaanconcentratie in het rookgaskanaal enige variatie vertoont is ook voor de laagste en hoogste voorkomende methaanconcentratie het percentage slip berekend. Bij het starten van de motoren komen incidenteel zeer hoge methaanconcentraties voor met overeenkomstige hoge slippercentages. Deze concentraties zijn verder buiten beschouwing gelaten.

Afhankelijk van het type, leeftijd, vermogen en de afstelling van de installatie varieerde de methaanslip van gemiddeld 554 tot 3311 mg/m₀³ (respectievelijk 0,7- 4,5%) en bevestigt eerdere vermoedens dat grotere motoren meer onverbrande brandstof emitteren.

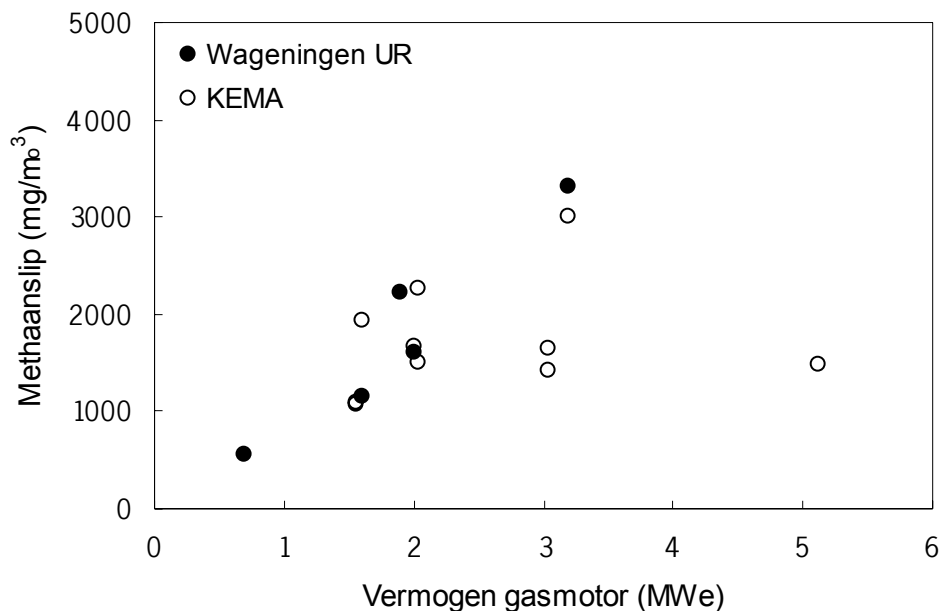
Tabel 7 Methaanslip (in mg/m₀³ en %) van verschillende gasmotoren. De slip berekening is uitgevoerd op basis van de gemiddelde, de laagste en de hoogste voorgekomen methaanconcentratie in het rookgaskanaal bij draaiende motor (in de tabel weergegeven als 'gemiddeld', 'ondergrens' en 'bovengrens')

Bedrijf nr.	Vermogen (MWe)	O ₂ (%)	CH ₄ (ppm)	Methaanslip					
				Gemiddeld		Ondergrens		Bovengrens	
				(mg/m ₀ ³)	(%)	(mg/m ₀ ³)	(%)	(mg/m ₀ ³)	(%)
1	3,4	10,3	2746	3311	4,5	3017	4,1	3973	5,4
2	2	8,7	1539	1612	2,3	1542	2,2	1682	2,4
3	1,9	10,6	1790	2217	3,2	2078	3,0	2286	3,3
4	0,69	8,9	521	554	0,7	396	0,5	633	0,8
5	1,6	9,2	1047	1147	1,5	1071	1,4	1223	1,6

Naast de metingen die in het kader van dit project zijn uitgevoerd door Wageningen UR (WUR) is in de zelfde periode van het jaar een vergelijkbare meetcampagne uitgevoerd door KEMA in opdracht van VROM (Olthuis & Engelen, 2007). Voor dit project zijn op 10 verschillende glastuinbouwbedrijven emissiemetingen uitgevoerd in de rookgassen waaruit de methaanslip is bepaald. Het betrof hier kortdurende metingen van tweemaal 30 minuten. Op twee van de 10 bedrijven is zowel door WUR als door KEMA gemeten. Dit betrof een bedrijf met een motor van 2 MWe waar door WUR en KEMA een vergelijkbare mate van methaanslip werd bepaald van respectievelijk 1612 en 1662 mg/m₀³.

Het tweede bedrijf betrof een motor van 1.6 MWe, hier liepen de WUR en KEMA metingen meer uiteen, respectievelijk 1147 en 1934 mg/m_0^3 . Er is geen eenduidige verklaring voor dit verschil in concentratie.

De resultaten van zowel de WUR als KEMA metingen zijn weergegeven in Figuur 11. Er lijkt een lineair verband te bestaan tussen het motorvermogen en de mate van methaanslip. Grotere vermogens leiden tot meer methaanslip. Echter van de motor met het hoogste vermogen (5,1 MWe) was de methaanslip relatief laag, 1480 mg/m_0^3 , mogelijk het gevolg van een aangepast motorontwerp.



Figuur 11. De mate van methaanslip in relatie tot het vermogen van de verschillende gasmotoren

5. Effecten van NO_x en etheen op planten

Rookgassen van gasmotor(en) van WKK-installaties bevatten naast CO₂ ook componenten als koolmonoxide (CO), stikstofdioxiden (NO_x) en koolwaterstoffen (o.a. methaan en etheen). Door het gebruik van aardgas komt vrijwel geen SO₂ vrij. De positieve effecten van het doseren van CO₂ met behulp van rookgassen uit WKK-installaties zijn algemeen bekend: hogere productie en/of betere kwaliteit. Echter, naast CO₂ komen ook andere componenten uit de rookgassen in de kas terecht die soms tot negatieve effecten op groei en productkwaliteit kunnen leiden. Vooral NO_x en etheen zijn potentieel schadelijk voor een teelt. Om dergelijke schade aan gewassen te voorkomen zijn er eisen gesteld aan de maximaal toelaatbare concentraties van enkele toxische componenten in de rookgassen. Door middel van een rookgasreiniginginstallatie moet worden voorkomen dat deze grenswaarden worden overschreden.

In het begin van de tachtiger jaren hebben het toenmalige Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek (IPO) en het Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente voor een aantal luchtverontreinigingscomponenten globale effectgrenswaarden vastgesteld om schade aan kasgewassen te voorkomen. De grenswaarden geven de concentratie op plantniveau weer en zijn gebaseerd op literatuurgegevens en begassingsonderzoek dat is uitgevoerd onder relatief gevoeligmakende omstandigheden (weinig licht, gesloten luchtramen). Op basis van deze grenswaarden zijn luchtkwaliteitseisen voor rookgassen van WKK-installaties vastgesteld.

Deze grenswaarden staan momenteel ter discussie gezien de ontwikkeling die de glastuinbouw heeft doorgemaakt. Dit betreft vooral schaalvergroting, gebruik van nieuwe, meer dichte kassen, complexere installaties zoals WKK's en de grote verscheidenheid aan plantensoorten en rassen die worden geteeld. Belangrijk punt daarbij is ook dat met enige regelmaat gewasschade wordt gemeld waarbij rookgassen mogelijk een rol hebben gespeeld. Hierbij gaat het soms om incidentele schades, meestal het gevolg van een korte blootstelling aan ongereinigde of onvoldoende gereinigde rookgassen door een technische storing aan de installatie. Zorgwekkender zijn de minder eenduidig te verklaren schades zoals achterblijvende groei of minder kwaliteit ed. Dit duidt op een meer chronische blootstelling die niet direct te herleiden is naar een storing in de installatie omdat de betreffende machines technisch gezien probleemloos draaien.

In het licht van bovenstaande problematiek is recent een evaluatie uitgevoerd van alle relevante informatie over effecten van NO_x en etheen op planten (Dieleman *et al.*, 2007). Op basis van deze evaluatie wordt door de auteurs voorgesteld de effectgrenswaarde voor NO_x naar beneden bij te stellen terwijl de grenswaarde voor etheen nagenoeg gelijk kan blijven (Tabel 8).

Tabel 8. Effectgrenswaarden (ppb) ter voorkoming van negatieve effecten op planten als gevolg van blootstelling aan NO_x en etheen (Uit: Dieleman *et al.*, 2007).

Gas	Concentratie (ppb)	Tijdsduur
Stikstofdioxiden (NO _x)	40	24-uur
	16	Jaar
Etheen (C ₂ H ₄)	11	8 uur
	5	4 weken

5.1 Stikstofdioxiden (NO_x)

Planten kunnen NO en NO₂ (NO_x) via de huidmondjes opnemen vanuit de lucht. Eenmaal opgenomen in de plant ontstaan hieruit nitraat en nitriet die vervolgens enzymatisch worden omgezet in aminozuren en proteïnen. De gevoeligheid van een plant voor NO_x wordt dan ook bepaald door de effectiviteit van deze omzettingen

(detoxificatie). Als NO of NO₂ onvoldoende snel worden omgezet kan dat leiden tot schade aan de plant. De omzetting van nitriet tot aminozuren is gekoppeld aan de lichtreactie van de fotosynthese. Dit zou een verklaring kunnen zijn waarom NO_x schadelijker is in het donker (minder detoxificatie) dan in het licht.

De NO_x metingen die in het kader van dit project in de verschillende kassen op plantniveau zijn uitgevoerd zijn getoetst aan de recent bijgestelde effectgrenswaarde voor een kortdurende blootstelling van 40 ppb als 24-uursgemiddelde. De grenswaarde is weergegeven als een 24-uursgemiddelde. Dit impliceert dat enkele uren met verhoogde concentraties en korte episodes van enkele dagen niet direct tot negatieve effecten hoeven te leiden. Daarnaast worden blootstellingen gedurende de dag zowel als de nacht meegenomen in het gemiddelde.

NO_x concentraties Bedrijf 1 - 5

Voor de vijf bedrijven zijn de 24-uursgemiddelde NO_x concentraties berekend voor een periode van 14 dagen of langer, de periode verschilt per bedrijf (Figuur 12).

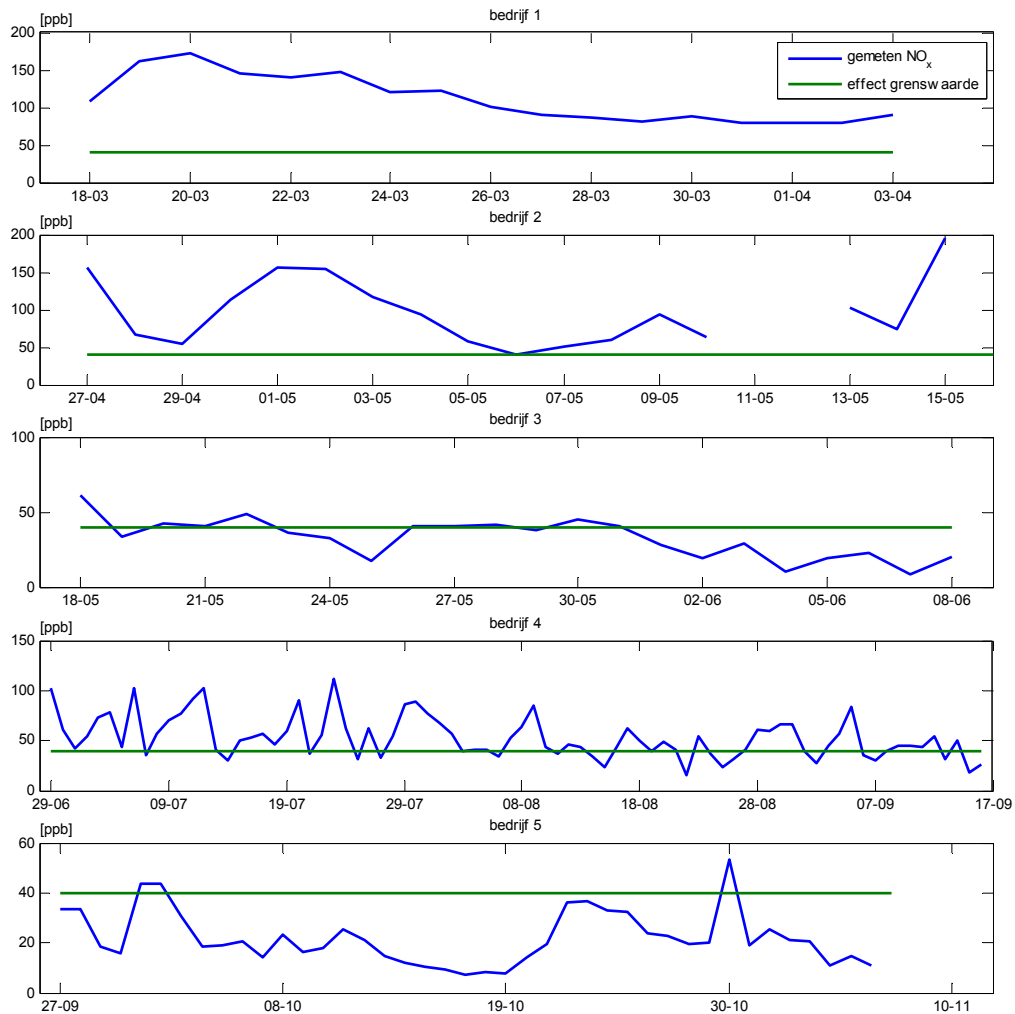
Voor Bedrijf nr.1 geldt dat de effectgrenswaarde voor NO_x in de betreffende periode (18 maart - 3 april) structureel werd overschreden. De hoogste overschrijdingen vonden plaats aan het begin van de meetperiode (eind maart), in die periode werd relatief weinig geventileerd en veel geschermd. De geleidelijke daling van de 24-uursgemiddelde NO_x-concentratie is het gevolg van een toename van het ventileren en minder schermen. Gedurende de laatste 6 dagen van de weergegeven periode is het scherm niet meer gebruikt.

Ook voor Bedrijf nr. 2 geldt dat de effectgrenswaarde voor NO_x in de betreffende periode (27 april - 15 mei) structureel werd overschreden. Echter de mate van overschrijding varieerde sterker dan bij Bedrijf nr.1. De NO_x concentratie in de kas bleek sterk afhankelijk van de ventilatie en de periode van CO₂-dosering. Als de ramen 's nachts gesloten waren daalde het NO_x niveau in de kas slechts langzaam, maar zodra er in de avond of nacht op enig moment werd gelucht, dan daalde het NO_x niveau snel. Deze sterke variatie in concentratieniveaus is ook van invloed op de 24-uursgemiddelden.

Voor Bedrijf nr. 3 werd slechts op enkele dagen in de betreffende periode (18 mei - 8 juni) een overschrijding van de effectgrenswaarde geconstateerd. De NO_x concentraties waren ook hier sterk afhankelijk van de ventilatie en de periode van CO₂-dosering. Globaal gezien werd er in deze periode tussen 8 uur 's morgens en 8 uur 's avonds CO₂ gedoseerd waarbij de NO_x concentratie in de kas opliep tot gemiddeld ca. 60 ppb. In deze periode van het jaar bleven de ramen 's avonds en 's nachts open waardoor de NO_x concentratie in de kas na het stoppen van de CO₂ dosering relatief snel daalde. In de uren dat er niet werd gedoseerd daalde de NO_x concentratie tot onder de 5 ppb. Vanaf 1 juni tot het einde van de meetperiode zijn geen overschrijdingen meer voorgekomen.

Voor Bedrijf nr. 4 geldt dat de 24-uursgemiddelde concentraties een sterke variatie laten zien met gemiddelden net onder de effectgrenswaarde voor NO_x tot ca. 110 ppb, ruim boven de grenswaarde. Globaal gezien was er in de betreffende periode (29 juni – 17 september) sprake van een regelmatige overschrijding van de effectgrenswaarde. De NO_x concentratie in de kas bleek sterk afhankelijk van de ventilatie en het schermen. Sterk oplopende NO_x concentraties in de kas werden vooral waargenomen op dagen dat het sluiten van de ramen samenviel met het dichtgaan van de schermen.

Op Bedrijf nr. 5 zijn de NO_x concentraties gedurende een vrij lange periode gemeten (27 september – 11 november). De 24-uursgemiddelde concentraties liggen structureel beneden de effectgrenswaarde, slechts op een enkele dag wordt de grenswaarde net overschreden. De verklaring hiervoor ligt waarschijnlijk in het feit dat op dit bedrijf, i.t.t. de andere bedrijven, terughoudend CO₂ wordt gedoseerd. De setpoint was ingesteld op 500 ppm, wat beduidend lager is dan de streefwaarden op de andere bedrijven. Door minder CO₂ te doseren komt er ook minder NO_x in de kas wat zich vertaalt in lagere gemiddelde concentraties en weinig tot geen overschrijdingen van de effectgrenswaarde.



Figuur 12. 24-uursgemiddelde NO_x concentraties (ppb) in de kassen van de verschillende bedrijven. De ononderbroken lijn geeft de effectgrenswaarde voor NO_x weer. NB. De lengte van de aaneengesloten periode waarvoor 24-uursgemiddelden zijn berekend en de tijd van het jaar verschilt per bedrijf.

Risico van NO_x voor planten

Uit de concentratiemetingen in de verschillende kassen blijkt dat het gebruik van rookgassen voor CO_2 dosering uit WKK-installaties een risico voor het gewas op kan leveren met betrekking tot de kasluchtkwaliteit. Met name de NO_x concentraties kunnen dermate hoog oplopen dat de effectgrenswaarde ter bescherming van planten wordt overschreden met mogelijk nadelige gevolgen voor het gewas. Overschrijdingen vinden vooral plaats in perioden met weinig ventilatie maar is ook afhankelijk van de mate van CO_2 dosering. Zo werd op Bedrijf nr. 5 terughoudend omgegaan met CO_2 doseren en daarmee werd ook voorkomen dat de NO_x concentraties te hoog opliepen. Overschrijding van de effectgrenswaarde wil overigens niet zeggen dat er per definitie negatieve effecten aan het gewas zullen optreden. Dit hangt namelijk niet alleen af van het concentratieniveau maar ook van factoren zoals de gevoeligheid van het gewas voor de betreffende component, de klimaatsomstandigheden in de kas en eventuele andere stressoren (andere luchtverontreinigingscomponenten, ziekten en plagen).

5.2 Etheen

Etheen wordt continu in kleine hoeveelheden gevormd door alle plantorganen en weefsels, toch blijven de belangrijkste effecten ervan vooral beperkt tot de eindfase van de ontwikkeling zoals het afrijpen van fruit, veroudering en bladval. Weefselbeschadiging kan aanleiding geven tot een versnelde productie van etheen (stress etheen) door planten. Etheen wordt daarom beschouwd als een voor planten 'ongewone' luchtverontreinigingcomponent aangezien het een endogene groeiregulator is en in versterkte mate door planten zelf wordt gevormd onder invloed van een groot scala van stress-factoren waaronder blootstellingen aan etheen zelf.

Etheen is toxisch voor planten bij lage concentraties maar zelden bij relatief hoge concentraties. In deze zin wijkt etheen dus af van andere luchtverontreinigingscomponenten zoals ozon, zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak, die soms positieve effecten kunnen veroorzaken bij lage concentraties maar altijd toxisch zijn bij hogere niveaus.

Etheen metingen van drie aaneengesloten dagen zijn geëvalueerd. Hieruit blijkt dat de concentratie in de kas, op plantniveau, bij alle bedrijven beneden de detectielimiet van 5 ppb lag. Het is dus niet aannemelijk dat de etheen effectgrenswaarde voor kortdurende blootstellingen van 11 ppb als 8-uurs-gemiddelde werd overschreden.

Risico van etheen voor planten

De hoeveelheid etheen die met de rookgassen in de kas wordt gebracht bleek relatief gering te zijn. Door de verdunning met de kaslucht en de mate van ventilatie nemen de concentraties af tot achtergrondniveau (< 5 ppb). Voor de bedrijven waar de metingen zijn verricht kan dan ook worden geconcludeerd dat het risico van etheen voor het gewas tijdens de metingen te verwaarlozen is. Echter, het verschil tussen het achtergrondgehalte en de effectgrenswaarde voor etheen is klein, veranderingen in de samenstelling van de rookgassen kunnen dan al snel leiden tot overschrijding van de grenswaarde. Omdat deze metingen uitgevoerd zijn in goed-geventileerde kassen, is het niet uit te sluiten dat verhoogde concentraties van etheen voor kunnen komen in perioden waarin onvoldoende wordt geventileerd.

6. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Doel van de meetcampagne was het in kaart brengen van de concentraties van de belangrijkste componenten (NO_x , etheen en methaan) in gereinigde rookgassen van verschillende motor/reiniger combinaties. Hiervoor zijn gedurende drie aaneengesloten dagen metingen uitgevoerd in het rookgaskanaal direct achter de reiniger en in de kas op plantniveau. Een overzicht van de gemiddelde concentraties staat vermeld in Tabel 9. Voor planten is niet alleen de gemiddelde concentratie van belang maar ook de range waarbinnen concentraties kunnen voorkomen. Om die reden zijn in Tabel 9 voor wat de metingen in de kaslucht betreft ook de minimum en maximum concentraties weergegeven.

Onderstaand worden de belangrijkste conclusies nog eens samengevat.

- De reinigers op de vijf bedrijven waren van het type ureumkatalysator. Gebleken is dat op vrijwel alle bedrijven het gangbare praktijk is om de ureuminjectie in de reiniger alleen in te schakelen als er rookgassen gedoseerd worden om het gewas van extra CO_2 te voorzien;
- De NO_x , etheen en methaan concentraties in het rookgaskanaal zijn afhankelijk van het type motor en de effectiviteit van de reiniger;
- In de reiniger wordt door ureuminjectie en Selectieve Catalytische Reductie de NO_x concentratie gereduceerd, de reiniger heeft geen invloed op de methaanconcentratie in de rookgassen;
- In de reiniger wordt etheen door middel van de oxidatiekatalysator (Oxicat) deels uit de rookgassen verwijderd en is theoretisch gezien onafhankelijk van de ureuminjectie. Opmerkelijk was dat de etheen concentratie in de rookgassen iets toenam zodra de ureuminjectie werd gestopt. Blijkbaar heeft de aanwezigheid van ureum in de rookgasstroom effect op de etheenconcentratie. Of dit uitsluitend een gevolg is van de verandering in de fysische omstandigheden in de reiniger of dat er ook chemische reacties optreden is niet bekend;
- De mate van methaanslip varieerde van 541 tot 3335 mg/m_0^3 (0,7- 4,5%). Er lijkt een lineair verband te bestaan tussen het motorvermogen van de verschillende typen WKK-installaties en de mate van methaanslip. Dit bevestigt eerdere vermoedens dat grotere motoren meer onverbrande brandstof emitteren;
- De concentraties in de kas zijn sterk afhankelijk van de CO_2 vraag, de mate van ventilatie en het gebruik van schermen. Deze factoren variëren uiteraard over de seizoenen. De vijf bedrijven zijn na elkaar gemeten, dit betekent er op verschillende tijdstippen gedurende het seizoen is gemeten. Dit bemoeilijkt de vergelijking van de concentratiepatronen tussen de verschillende bedrijven. De metingen die gedurende de aaneengesloten periode van 72 uur zijn uitgevoerd geven dan ook alleen een beeld van de heersende concentraties voor dat moment.
- Tijdens het dosering van rookgassen in de kas worden de gassen uiteraard sterk verdund, dat blijkt ook uit het verschil in concentraties direct achter de reiniger en in de kas. De verhouding tussen de concentratie direct achter de reiniger en in de kas verschilt niet alleen per bedrijf maar ook per component. Verondersteld wordt dat methaan niet of nauwelijks door het gewas wordt opgenomen, en de verdunning uitsluitend het gevolg is van lekverliezen en ventilatie. Voor NO_x wijkt de verdunningsfactor echter sterk af van die van methaan, wat naast de lek- en ventilatieverliezen verklaard zou kunnen worden door opname door het gewas.
- Het gebruik van rookgassen uit WKK-installaties voor CO_2 dosering kan een risico vormen voor het gewas. Met name de NO_x concentraties kunnen dermate hoog oplopen dat de effectgrenswaarde ter bescherming van planten wordt overschreden met mogelijk nadelige gevolgen voor het gewas. Overschrijdingen vinden vooral plaats in perioden met weinig ventilatie maar is ook afhankelijk van de mate van CO_2 dosering.
- De hoeveelheid etheen die met de rookgassen in de kas wordt gebracht blijkt relatief gering te zijn en komt overeen met het achtergrondniveau in de buitenlucht (< 5 ppb). Voor de bedrijven waar de metingen zijn verricht kan dan ook worden geconcludeerd dat het risico van etheen voor het gewas te verwaarlozen is. Echter, deze metingen zijn uitgevoerd in goed-geventileerde kassen, en het is niet uit te sluiten dat verhoogde concentraties van etheen voor kunnen komen in perioden waarin onvoldoende wordt geventileerd.

Tabel 9. *Overzicht van de gemiddelde NO_x, etheen, methaanconcentraties en de mate van methaanslip op vijf bedrijven met verschillende motor/reiniger combinaties gemeten direct achter de reiniger (rookgaskanaal) en in de kas op plantniveau (kas).*

Bedrijf	Component	Rookgaskanaal			Kas	
		Reiniger aan	Reiniger uit	Slip (mg/m ₀ ³)	Gemiddeld	Min-Max
1	Etheen	193 ppb	307 ppb		<5 ppb	<5 – <5 ppb
	Methaan	2762 ppm	2777 ppm	3335	18 ppm	5 – 58 ppm
	NO _x	9 ppm	70 ppm		145 ppb	43 – 299 ppb
2	Etheen	63 ppb	310 ppb		<5 ppb	<5 – <5 ppb
	Methaan	1535 ppm	1527 ppm	1612	12 ppm	3 – 26 ppm
	NO _x	14 ppm	96 ppm		50 ppb	<2 – 226 ppb
3	Etheen	37 ppb	171 ppb		<5 ppb	<5 – <5 ppb
	Methaan	1785 ppm	1826 ppm	2230	7 ppm	3 – 16 ppm
	NO _x	14 ppm	38 ppm		26 ppb	<2 – 190 ppb
4	Etheen	43 ppb	81 ppb		<5 ppb	<5 – <5 ppb
	Methaan	529 ppm	508 ppm	541	8 ppm	4 – 24 ppm
	NO _x	22 ppm	90 ppm		55 ppb	4 – 242 ppb
5	Etheen	12 ppb	80 ppb		<5 ppb	<5 – <5 ppb
	Methaan	1019 ppm	1032 ppm	1100	13 ppm	5 – 31 ppm
	NO _x	13 ppm	128 ppm		14 ppb	<2 – 121 ppb

NB. Afhankelijk van het niveau worden de concentraties uitgedrukt in ppm of ppb. 1ppm = 1000 ppb.

Aanbevelingen

CO₂ dosering via rookgassen uit WKK-installaties houdt een risico in voor het milieu en het gewas. De vraag is of en zo ja wat eraan kan worden gedaan om dit risico te minimaliseren dan wel te voorkomen. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen maatregelen die betrekking hebben op de bron of op de teelt.

- Met betrekking tot het milieu spelen vooral NO_x en methaan een belangrijke rol. De concentraties van deze componenten in het rookgaskanaal zijn afhankelijk van het type motor en voor wat de NO_x concentraties betreft van de effectiviteit van de reiniger. Het terugdringen van deze milieubelasting kan alleen door het stellen van generieke kwaliteitseisen aan WKK-reiniger installaties (bron gerichte maatregelen). Dit ligt op het beleidsterrein van VROM en valt buiten de mogelijkheden van de individuele tuinder;
- De ontwikkeling van de semi-gesloten kas zal naast energiebesparing ook invloed hebben op de luchtkwaliteit in de kas indien rookgassen van WKK-installaties gebruikt gaan worden voor CO₂ dosering. De in het kader van dit project gemeten concentraties bij (vrijwel) gesloten ramen (uit Tabel 9) geven een indruk van de concentratieniveau's die in een semi-gesloten kas bereikt kunnen worden. De NO_x concentraties kunnen onder die omstandigheden oplopen tot ca. 300 ppb terwijl de etheen concentraties relatief laag blijven (<5 ppb). Het verdient aanbeveling bij de ontwikkeling van de semi-gesloten kas rekening te houden met CO₂ dosering met rookgassen en de risico's hiervan in kaart te brengen;
- De aanwezigheid van ureum in de rookgasstroom blijkt enig effect te hebben op de etheenconcentratie. Het is niet uitgesloten dat onder die omstandigheden in de reiniger reacties optreden waarbij mogelijk andere componenten ontstaan die van invloed kunnen zijn op het gewas.

Risico's voor het gewas zijn, naast de gevoeligheid van het gewas zelf ook afhankelijk van het seizoen en de teeltstrategie. Als gevolg hiervan zijn er geen algemene richtlijnen te geven of in bepaalde situatie problemen zullen optreden. Het stellen van generieke emissie-eisen aan WKKs alleen is daarom onvoldoende om problemen van

slechte luchtkwaliteit bij CO₂ dosering uit WKKs te beheersen. Om tuinders toch de mogelijkheid te bieden om beter in te kunnen spelen op de risico's die verbonden zijn aan CO₂ dosering met rookgassen uit WKK installaties, doen wij de volgende aanbevelingen:

- De concentraties in de kas zijn sterk afhankelijk van de CO₂ vraag, de mate van ventilatie en het gebruik van schermen. Deze factoren variëren uiteraard over de seizoenen. In perioden met weinig ventilatie en veel schermen kan overstappen op zuiver CO₂ een optie zijn. Ook het aanpassen van de doseringsstrategie (beperking van de maximale CO₂ concentratie in de kas) biedt mogelijkheden om het risico te beperken omdat uit de metingen blijkt dat de concentraties dan minder hoog oplopen;
- In de praktijk wordt de luchtkwaliteit op plantniveau niet gecontroleerd. Er is dus geen informatie op basis waarvan de tuinder kan bijsturen of ingrijpen. Een monitoringsysteem voor continue bewaking van NO_x en etheen op plantniveau bij CO₂ dosering via rookgassen zou die informatie kunnen leveren.

7. Literatuur

Anonymous, 1980.

Basisgegevens aardgassen. N.V. Nederlandse Gasunie.

Anonymous, 1998.

Besluit emissie-eisen stookinstallaties <http://www.infomil.nl/contents/pages/133181/lb01.pdf>

Anonymous, 2003.

Handleiding L40, meten van luchtemissies. Infomil, Den Haag.

Anonymous, 2007.

Criteria voor het Groen Label Kas-certificaat: http://www.smk.nl/Upload/glkschema_nl8.pdf

Dieleman, A., Zwinkels, J., De Gelder, A., Kuiper, I., De Zwart, F., Van Dijk, C. & Dueck, T., 2007.

CO₂ bij paprika: meerwaarde en beperkingen. Nota 494, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. 74 blz.

Van Dijk, C.J., Van der Knaap, J.P., Dijkstra, T.J., Hanemaaijer, J.J. & Tonneijck, A.E.G., 2003.

Rookgasschade in beeld? Risico's van NO_x en etheen bij CO₂ dosering uit WKK-installaties. Nota 255, PRI-DLO, Wageningen. 24 blz + bijlagen.

Olthuis, H.J. & P.A.C. Engelen, 2007.

Overzichtsrapportage emissieonderzoek methaanemissie bij gasmotoren op continu vollast –juli 2007. 50762926-TOS/TCM 07-7080, KEMA Technical & Operational Services.

Bijlage I.

Kengetallen klimaatcomputer

Tabel I-1. *Overzicht van de variabelen die uit de verschillende klimaatcomputers zijn betrokken. Afhankelijk van de bedrijfssituatie kunnen afwijkingen voorkomen*

variabele	afdeling / meetplaats	grootheid
STRALING	METEO STRAL. OPN.	W/m ²
KASTEMPERATUUR 1	AFD 4 MEETBOX 1	°C
KASTEMPERATUUR 2	AFD 4 MEETBOX 2	°C
BUITENTEMPERATUUR	METEO	°C
SCHERMSTAND	AUT.DOEK 2 DOEK 1	%
RAAMSTAND WIND	AFD 4 VENT.REG 1	%
RAAMSTAND LUW	AFD 4 VENT.REG 1	%
WINDRICHTING	METEO	°
WINDSNELHEID	METEO	m/s
VERMOGEN VERWARMING 1	AFD 4 VERW.REG 1	kW
GEMETEN CO ₂	AFD 3+4 MEETBOX	ppm
AARDGASVERBRUIK	WKK 1	eenh/uur
AARDGAS VERBRUIK	WKK 2	eenh/uur
AARDGAS VERBRUIK	KETEL	eenh/uur
BELICHTING VERMOGEN	ELEK.BEHEER	kW
GER CO ₂ -LEVERING (VOOR LOOPTIJD)	CO ₂ -TRANSP. 2	kg CO ₂ /uur
BER VERW. BOVENNET	AFDELING 4	°C
GEM VERW. BOVENNET	AFDELING 4	°C

Bijlage II.

Metten van luchtemissies

Toelichting Koolwaterstofemissies

Aangezien de verbranding van aardgas in gasmotoren niet volledig is, emitteren gasmotoren koolwaterstoffen (C_xH_y). Deze worden aangegeven als 'onverbrand'. Het grootste deel bestaat uit methaan, de zogenaamde methaanslip. In de praktijk werd het begrip methaanslip echter op verschillende wijzen uitgedrukt. Zo wordt methaanslip door onderzoeksinstellingen als percentage van de brandstofinput uitgedrukt en door bedrijven als een percentage van het rookgasvolume. Deze begripsverwarring leidt tot onduidelijkheid.

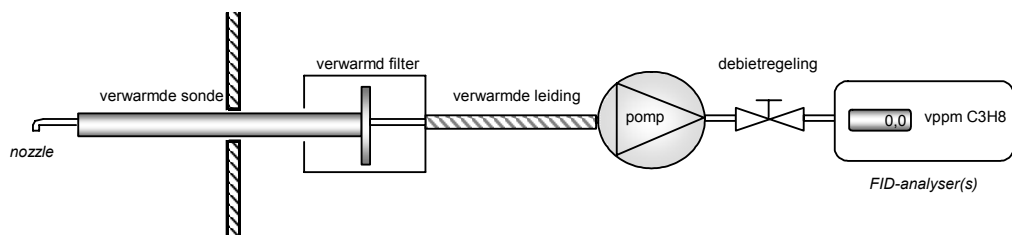
In deze bijlage is beschreven welke meet- en berekeningsmethodes zijn gebruikt. Daarnaast is getracht om een eenduidige methode aan te geven om het GWP (Global Warming Potential) effect van de koolwaterstofemissie van gasmotoren te berekenen.

Normen

Voor de bepaling van koolwaterstofconcentraties in afgassen bestaan twee meetnormen, t.w.:

- NEN-EN 12619: Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of total gaseous organic carbon at low concentrations in flue gases - Continuous flame ionisation detector method.
- NEN-EN 13526: Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of total gaseous organic carbon in flue gases from solvent using processes - Continuous flame ionisation detector method.

NEN-EN 12619 is gericht op de toepassing van een vlamionisatiedetector (*flame ionisation detector*, FID) als continue methode voor het meten van de restemissie van totaal gasvormige koolwaterstoffen in rookgassen (lage concentraties; 0-20 mg C/Nm³). NEN-EN 13526 is gericht op de toepassing van FID voor het meten van de emissie van totaal gasvormige koolwaterstoffen bij hoge concentraties (rond de 20-500 mg C/Nm³), zoals bij oplosmiddelverwerkende processen. In beide gevallen is het meetprincipe gelijk, maar verschillen de toegestane achtergrondconcentraties van koolwaterstoffen in de toegepaste verbrandings- en controlekasten. Alhoewel de gemeten koolwaterstofconcentratie in de rookgassen van gasmotoren hoger is dan de gevalideerde range van 20-500 mg C/Nm³ van de NEN-EN 13526, is er gezien het meetprincipe geen reden om aan te nemen dat de meetmethode ongeschikt is voor metingen aan gasmotoren. De meetonzekerheid zal binnen de in de norm genoemde grenzen blijven. Monsterneming Continue meting met FID vindt altijd plaats in combinatie met extractieve monsterneming. Hierbij wordt met een monsternamesonde uit het rookgaskanaal een representatief monster genomen, dat via een monstertransport- en -conditioneringssysteem naar de *analyser* wordt gevoerd. De meest betrouwbare methode is om het gehele systeem hierbij te verwarmen om condensatie van koolwaterstoffen te voorkomen. Dit betekent dat de concentratiemeting plaatsvindt in nat rookgas. Aangezien emissie-eisen altijd worden opgegeven in droog rookgas zal de gemeten concentratie dan moeten worden omgerekend naar droog rookgas. In de in dit project toegepaste methode is er niet gebruik gemaakt van verwarmde sondes en leidingen en zijn de rookgassen juist door een koeler gehaald voor de analyser zodat in droge rookgassen gemeten is. De omrekening is gegeven in de paragraaf Omrekening.



Schematische weergave van een FID C_xH_y -meetsysteem

Meetprincipe

In een speciaal ontworpen brander wordt een deelstroom van het monstergas in een waterstofvlam gebracht. In de vlam worden de aanwezige koolwaterstofverbindingen verbrand, waardoor een ionisatiestroom ontstaat die elektrisch meetbaar is. De grootte van de ionisatiestroom wordt bepaald door het aantal koolstofatomen dat per tijdseenheid in de vlam wordt gebracht, door het soort koolstofketen (al dan niet vertakt) en door andere atomen die de verbinding bevat naast koolstof. Volgens de eerder genoemde normen moet de responsefactor voor alifatische koolwaterstoffen ten opzichte van propaan tussen de 0,9 en 1,1 liggen. Aangezien de FID wordt ingeregeld met propaan is de responsfactor voor propaan per definitie 1. Primaire meetgegevens worden hierdoor altijd uitgedrukt in vppm C₃H₈ (propaan).

Omrekeningen

Correctie voor het vochtgehalte

Zoals aangegeven worden de emissie-eisen altijd opgegeven in droog rookgas, terwijl koolwaterstofemissies altijd worden gemeten in nat rookgas. Op basis van een gemeten of berekend vochtgehalte van het rookgas wordt als volgt de concentratie in droog rookgas berekend:

$$C_{C_3H_8, d} = C_{C_3H_8, n} \times \frac{100}{100 - C_{H_2O, n}}$$

waarin:

- $C_{C_3H_8, d}$ C_xH_y -concentratie in droog rookgas in vppm C_3H_8
 $C_{C_3H_8, n}$ C_xH_y -concentratie gemeten in het natte rookgas in vppm C_3H_8
 $C_{H_2O, n}$ waterdampgehalte in vol% van het natte rookgas

Herleiding naar standaard zuurstofconcentratie

Om te voorkomen dat bij verbrandingsprocessen de rookgassen met schone buitenlucht worden verdund om aan de emissie-eisen te voldoen, worden eisen aan verbrandingsemisies opgegeven bij een standaard zuurstofgehalte. De gemeten concentratie wordt als volgt herleid naar het standaard zuurstofgehalte:

$$C_{C_3H_8, d, O_2s} = C_{C_3H_8, d} \times \frac{21 - C_{O_2, s}}{21 - C_{O_2, d}}$$

waarin:

- $C_{C_3H_8, d, O_2s}$ C_xH_y -concentratie in vppm C_3H_8 betrokken op een standaard zuurstofconcentratie in droog rookgas
 $C_{C_3H_8, d}$ C_xH_y -concentratie in vppm C_3H_8 bij de actuele zuurstofconcentratie in droog rookgas
 21 de afgerond e zuurstofconcentratie van droge lucht in vol% (de theoretische waarde is 20,94)
 $C_{O_2, d}$ de actuele zuurstofconcentratie in vol% betrokken op droog rookgas
 $C_{O_2, s}$ de zuurstofconcentratie in vol% betrokken op droog rookgas waarnaar herleiding moet plaatsvinden; voor gasgestookte installaties is dit 3 vol%, zodat de herleidingsformule voor aardgasgestookte gasmotoren er als volgt uit ziet:

$$C_{C_3H_8, d, 3 \text{ vol\% } O_2} = C_{C_3H_8, d} \times \frac{18}{21 - C_{O_2, d}}$$

Omrekening van vppm C_3H_8 naar mg C/m_0^3

In het algemeen worden emissie-eisen niet in de eenheid van continue metingen met een analyser (vppm) maar in de eenheid van discontinue metingen te weten mg/ m_0^3 uitgedrukt. Alhoewel koolwaterstofconcentraties altijd met een analyser worden gemeten, geldt dit ook voor de koolwaterstofemissie-eis. De omrekening vindt als volgt plaats:

$$C_{C, d, 3 \text{ vol\% } O_2} = C_{C_3H_8, d, 3 \text{ vol\% } O_2} \times \frac{n \times M}{22,4} = C_{C_3H_8, d, 3 \text{ vol\% } O_2} \times \frac{36}{22,4}$$

waarin:

$C_{C,d,3 \text{ vol\% O}_2}$ C_xH_y -concentratie in $\text{mg C}/\text{m}_0^3$ (bij standaard druk (101,3 kPa) en temperatuur (273 K)) in droog rookgas bij een standaard zuurstofconcentratie van 3 vol%

$C_{C_3H_8, d,3 \text{ vol\% O}_2}$ C_xH_y -concentratie in vppm C_3H_8 in droog rookgas bij een standaard zuurstofconcentratie van 3 vol%
22,4 molair volume [l/mol] van een ideaal gas bij 273 K en 101,3 kPa

n aantal koolstofatomen per molecuul propaan (=3)

M molecuulmassa van koolstof (=12)

Berekening relatieve emissie in gram/GJ

Voor gasturbine(installaties) en zuigermotoren worden emissies ook wel als relatieve emissie in gram per gigajoule opgegeven. Omdat zowel het energieverbruik als het rookgasdebiet afhankelijk zijn van het brandstofverbruik, is de relatieve emissie in gram/GJ rechtevenredig met de emissie uitgedrukt in mg/m^3 . Bij de verbranding van Groningen aardgas komt $0,284 \text{ m}_0^3$ droog rookgas met 3 vol% O_2 per MJ vrij. De relatieve emissie wordt daarom als volgt berekend:

$$E_{rel} = C_{C,d,3 \text{ vol\% O}_2} \times 0,284$$

waarin:

E_{rel} de relatieve koolwaterstofemissie in g C/GJ

$C_{C,d,3 \text{ vol\% O}_2}$ C_xH_y -concentratie in $\text{mg C}/\text{m}_0^3$ (bij standaard druk (101,3 kPa) en temperatuur (273 K)) in droog rookgas bij een standaard zuurstofconcentratie van 3 vol%

$$E_{CH_4\text{-slip}} = \frac{E_{rel} \times \frac{16}{12}}{200} = E_{rel} \times 0,00667$$

N.B. C_{rel} kan eenvoudig worden omgerekend naar de methaanslip gebaseerd op brandstofinput:

waarin:

$E_{CH_4\text{-slip}}$ methaanslip uitgedrukt in % van de brandstofinput

E_{rel} de relatieve emissie in g C/GJ

16 molmassa van methaan

12 molmassa van koolstof

200 methaanemissie in g/GJ die overeenkomt met 1% slip

Gezien de verwarring en onduidelijkheid in het verleden wordt deze eenheid niet meer gebruikt.

