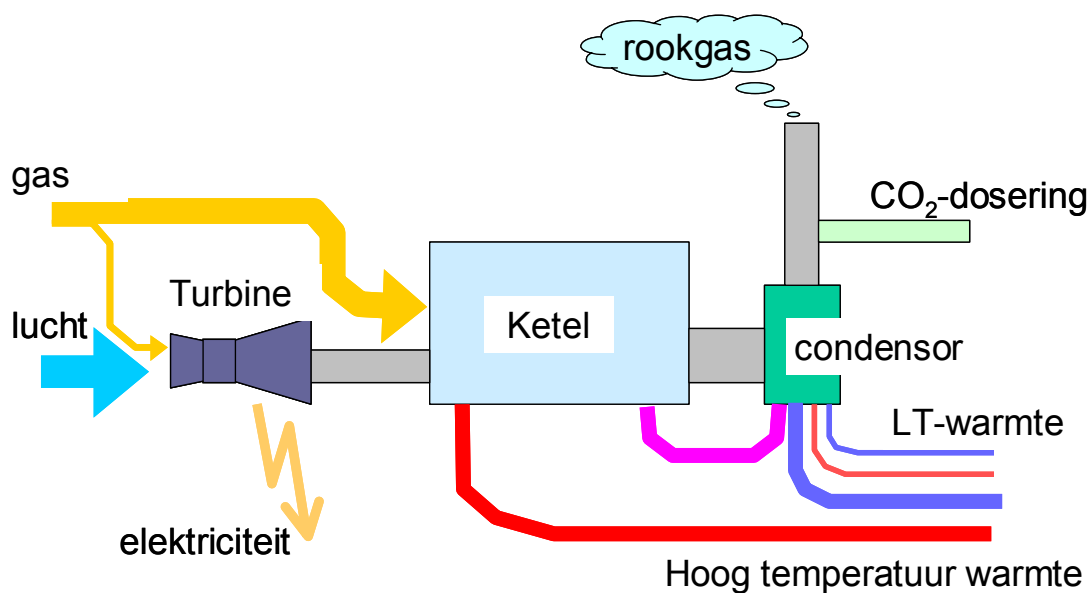


## De Microturbine als branderventilator



H.F. de Zwart  
G.L.A.M. Swinkels

Rapport: 078

Gefinancierd door:

Uitgevoerd door:

Productschap  Tuinbouw  
Projectnr: 11199



---

# De Microturbine als branderventilator

H.F. de Zwart  
G.L.A.M. Swinkels

februari 2004

Rapport: 078

Projectnummer PT: 11199

# Colophon

Title	De Microturbine als branderventilator
Author(s)	G.L.A.M. Swinkels; H.F. de Zwart
A&F number	rapport 078
ISBN-number	90-6754-752-2
Date of publication	Februari 2004
Confidentiality	N/A
Project code.	N/A
Price	□

Agrotechnology and Food Innovations B.V.  
P.O. Box 17  
NL-6700 AA Wageningen  
Tel: +31 317 475 024  
E-mail: [info.agrotechnologyandfood@wur.nl](mailto:info.agrotechnologyandfood@wur.nl)  
Internet: [www.agrotechnologyandfood.wur.nl](http://www.agrotechnologyandfood.wur.nl)

© 2004 Agrotechnology & Food Innovations B.V

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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

*All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher.  
The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.*

## Voorwoord

De komende decennia zal de nationale en mondiale energievoorziening langzaam van een systeem dat op fossiele energie is gebaseerd toegroeien naar een duurzame energie infrastructuur. In de overgangperiode is het echter zaak om de conversie van fossiele energie naar de uiteindelijk gewenste energievormen (warmte en kracht) zo efficiënt mogelijk te doen plaatsvinden.

Naast de koppeling van warmte- en koudestromen is de Warmte/Kracht koppeling een belangrijke pijler van een efficiënte energie infrastructuur.

In de negentiger jaren is deze techniek dan ook sterk in opkomst gekomen. Op tuinbouwbedrijven is de groei de laatste jaren echter gestopt door een verminderd bedrijfseconomisch rendement, wat met name veroorzaakt wordt door de liberalisatie van de elektriciteits- en gasmarkt.

Indien er echter WKK systemen zouden zijn die lagere overall kosten met zich meebrengen dan de tot nu toe gebruikte grote gasmotor systemen kan ook bij lagere elektriciteitsprijzen een rendabel WKK-systeem worden geëxploiteerd.

In dit onderzoek is nagegaan of de slimme integratie van een microturbine met de op alle tuinbouwbedrijven aanwezige verwarmingsketel dit perspectief kan bieden.

Het onderzoek is mogelijk gemaakt met middelen van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit en is daarnaast financieel en inhoudelijk ondersteund door E.on-Benelux

# Inhoud

VOORWOORD.....	4
INHOUD .....	5
SAMENVATTING .....	6
1 INLEIDING .....	7
2 SYSTEEMBESCHRIJVING .....	8
2.1 Inleiding .....	8
2.2 Beschikbare microturbines .....	8
2.3 Installatie .....	11
2.4 Systeemeigenschappen .....	12
3 INPASSING IN DE TUINBOUWPRAKTIJK.....	15
3.1 Algemene inleiding .....	15
3.2 Groentegewassen (tomaat).....	15
3.3 Snijbloem (roos) .....	18
3.4 Koude sierteelt (fresia) .....	20
3.5 Energiebesparing .....	22
4 BEDRIJFSECONOMISCHE PERSPECTIEVEN .....	24
Inleiding .....	24
4.1 Investering .....	24
4.2 Onderhoud.....	24
4.3 Tarieven voor gas en elektriciteit.....	25
4.4 Extra gewasproductie .....	25
4.5 Terugverdientijd .....	25
4.6 Resultaten .....	26
5 CONCLUSIES .....	28
6 NAWOORD .....	30
7 LITERATUUR.....	31

## Samenvatting

In dit onderzoek is een systeem beschreven waarin een microturbine als branderventilator wordt gebruikt. Dit is mogelijk omdat de rookgassen van een turbine nog zeer veel zuurstof bevatten en dus, net als gewone buitenlucht, de ketel kunnen worden ingeblazen om als zuurstoftoevoer voor de gas- of olieverbranding in de ketel te kunnen worden gebruikt. Het voordeel hiervan is voornamelijk het feit dat de microturbine op deze wijze geen extra warmtewisselaar nodig heeft. De warmte in de verbrandingsgassen kan in dit geval namelijk via hetzelfde systeem (ketel en condensor) op het verwarmingswater en de buffer worden overgedragen als in een gangbaar ketelhuis. Bovendien heeft de ketel geen aparte branderventilator meer nodig waardoor één van de elektriciteitsverbruikende componenten uit het ketelhuis kan worden geëlimineerd.

Een microturbine is een onderhoudsarme installatie en produceert (net als een ketel) schone rookgassen die zonder reiniging toegepast kunnen worden voor CO<sub>2</sub>-dosering in de glastuinbouw.

Het belangrijkste verschil in de verbrandingsinstallatie bij gebruik van de microturbine in de plaats van de gebruikelijke branderventilator is de toename van de gemiddelde luchtfactor in het verbrandingsproces. Alleen bij volle verwarmingscapaciteit van de turbine/ketel combinatie wordt een luchtfactor behaald die vergelijkbaar is met een standaard ketel. De hogere gemiddelde luchtfactor verlaagt het overall omzettingsrendement van hete rookgassen naar bruikbare warmte en verlaagt de CO<sub>2</sub>-concentratie van de rookgassen. Dit laatste heeft een duidelijke impact op de benodigde luchtverplaatsingscapaciteit van het CO<sub>2</sub> doseersysteem. Met name op kleinere bedrijven (kleiner dan 1.5 ha) zal de toepassing van de microturbine tot een aanmerkelijk ruimer bemeten CO<sub>2</sub>-doseringssysteem leiden.

Uitgangspunt in de beschrijving en de simulaties die in deze studie worden gepresenteerd is de inzet van een specifieke turbine (de Turbec T100 recuperated gasturbine) die met de verwarmingsketel geïntegreerd geplaatst is op een denkbeeldig tuinbouwbedrijf. Deze turbine heeft een elektrisch vermogen van 100 kW en een elektrisch rendement van 30%. Door het teeltoppervlak van het tuinbouwbedrijf te variëren wordt een beeld verkregen van het energiebesparingsperspectief van deze installatie op een willekeurig bedrijf. Voor een bedrijf van 2 ha ligt de energiebesparing ruim 3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> per jaar. Aangezien de absolute energiebesparing over een breed traject nauwelijks afhangt van het bedrijfsoppervlak is de besparing per m<sup>2</sup> vrijwel omgekeerd evenredig met het oppervlak.

Met representatieve waarden voor aanschafprijs, onderhoudskosten, gas- en elektriciteitsstarieven kan de microturbine onder de in dit rapport gestelde aannames op energie-intensieve groentebedrijven en warm telende sierteeltbedrijven bedrijfseconomisch rendabel worden ingezet op bedrijven vanaf 4 tot 5 ha. Het bedrijfseconomisch voordeel komt vooral voort uit de vermeden inkoop van elektriciteit en veel minder door de verkoop van elektriciteit.

# 1 Inleiding

Warmte-kracht koppeling (WKK) is een zeer geschikte techniek om de energieconversie van aardgas in elektriciteit, warmte en CO<sub>2</sub> te verbeteren en daarmee zo zuinig mogelijk met fossiele brandstoffen om te kunnen gaan. De laatste 2 jaar is door de liberalisatie van de elektriciteitsmarkt het bedrijfseconomisch perspectief voor het gebruik van WKK in de tuinbouw echter fors verslechterd, waardoor de groei tot stilstand is gekomen, het aantal draaiuren per installatie is afgenomen en een aantal bestaande installaties zelfs uit bedrijf is genomen.

De ontwikkeling van de microturbine lijkt echter een perspectiefvolle techniek op te leveren met mogelijk betere bedrijfseconomische perspectieven, waardoor de energetische voordelen weer benut kunnen worden. Immers, een microturbine is een onderhoudsarme installatie en produceert veel schonere rookgassen dan warmtekracht installaties op basis van een zuigermotor. NO<sub>x</sub>-gehalten en het aandeel onverbrande koolwaterstoffen zijn zo laag dat de rookgassen niet gezuiverd hoeven te worden en direct als CO<sub>2</sub>-bron voor de tuinbouw kunnen worden gebruikt.

De afnemende prijs van kleine gasturbines en de verwachte aanscherping van emissienormen zullen naar verwachting de komende tien jaar de inzet van microturbines vergroten.

De CO<sub>2</sub>-concentratie van de rookgassen uit een turbine is echter veel lager (een factor 4 tot 5) dan die uit een gasmotor WK-installatie of een ketel, zodat ofwel de capaciteit van het CO<sub>2</sub>-verdeelsysteem moet worden verhoogd, ofwel de rookgassen van de microturbine zouden moeten worden verrijkt.

Voor deze laatste optie biedt de combinatie van de functies van een microturbine met die van de branderventilator een technisch perspectiefvolle invulling.

In dit rapport worden de technische en economische aspecten van zo'n toepassing van de microturbine op glastuinbouwbedrijven beschreven. De informatie over de installatie is deels ontleend aan de microturbine/ketel combinatie die door E.on in samenwerking met branderfabrikant Eclipse is ontwikkeld.

De opbouw van dit rapport is als volgt:

In hoofdstuk 2 wordt het principeschema van de voorgestelde combinatie uiteengezet en worden de technische specificaties uitgewerkt. In hoofdstuk 3 wordt onderzocht hoe de voorgestelde techniek uitpakt in de groenteteelt, de warme sierteelt en voor een koud geteeld gewas (fresia). In hoofdstuk 4 wordt een beknopte bedrijfseconomische evaluatie gepresenteerd.

## 2 Systeembeschrijving

### 2.1 Inleiding

Het hart van het energievoorzieningssysteem op tuinbouwbedrijven wordt gevormd door de ketel. In de ketel wordt een mengsel van gas en zuurstofrijke lucht tot ontbranding gebracht, waarna de hete rookgassen hun warmte via een groot warmtewisselend oppervlak afstaan aan het water in de ketel.

In gebruikelijke systemen zorgt de branderventilator voor de aanvoer van verse buitenlucht. Deze lucht heeft een zuurstof concentratie van zo'n 21% en door de keus van een goede verhouding tussen het gas- en luchtdebiet en een goed verbrandingsproces worden schone rookgassen verkregen (zonder giftige of verzurende verbindingen). Deze rookgassen zijn vrijwel zuurstofloos en bevatten zo'n 20% CO<sub>2</sub>.

Wanneer elektriciteit wordt opgewekt met een (micro)turbine ontstaan eveneens schone rookgassen, maar vanwege de eigenschappen van een turbine hebben deze nog hoge zuurstof concentraties (zo'n 16%). Door deze turbinerookgassen door de ketel te leiden kan het warmtewisselend oppervlak van de ketel worden gebruikt om de turbinerookgassen af te koelen. De relatief hoge zuurstofconcentratie van de turbinerookgassen maakt het echter ook mogelijk om door middel van naverbranding de rookgassen heter en CO<sub>2</sub>-rijker te kunnen maken.

Middels de mate van naverbranding kan dus het verwarmingsvermogen worden geregeld en kunnen schone CO<sub>2</sub>-rijke rookgassen voor CO<sub>2</sub>-dosering worden gerealiseerd.

In § 2.3. wordt de beschrijving van zo'n installatie uiteengezet en in § 2.4 worden enkele belangrijke eigenschappen met betrekking tot conversierendement, warmte-kracht verhouding en rookgassenstelling gegeven.

### 2.2 Beschikbare microturbines

Er zijn een aantal fabrikanten die een microturbine in de commerciële markt gezet hebben. De bekendste zijn Capstone (USA) en Turbec (Zweden), Bowman (UK), Ingersoll-Rand (USA), Cummins Northwest Inc (USA) en Elliot (USA).

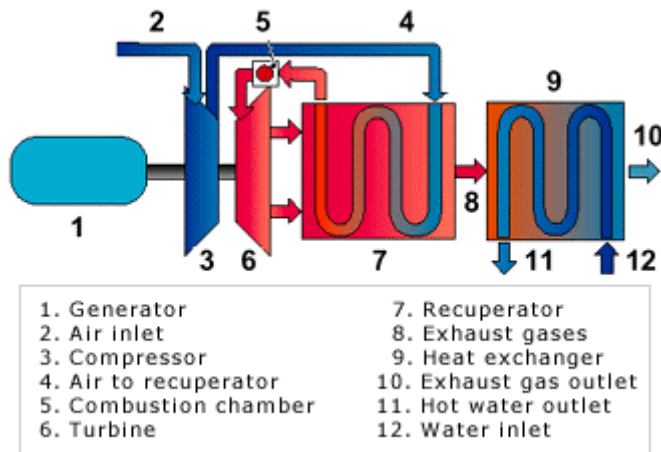
Hiervan heeft Capstone in 1998 als eerste de microturbine techniek op de commerciële markt geïntroduceerd. Dit als resultaat van meer dan tien jaar onderzoek.

In Figuur 1 is het principeschema van een microturbine getekend. Deze bestaat in het algemeen bestaat uit 3 onderdelen: de compressor (3), de verbrandingskamer (5) en de turbine (6). De inlaatlucht wordt door de compressor die aan dezelfde as zit als de turbine, tot hoge druk samengeperst. Bij een simple-cycle turbine wordt deze lucht direct naar de verbrandingskamer gevoerd. Bij "recuperated turbines" wordt de lucht eerst door de recuperator geleid om te worden opgewarmd met uitlaatgassen.

In de verbrandingskamer wordt de brandstof bijgemengd (aardgas) en het mengsel verbrand waarna de gassen met hoge snelheid en onder hoge druk naar de turbine geleid worden. De turbine zet de energie uit deze rookgassen om in asvermogen dat in de generator (1) in elektriciteit omgezet wordt. Restwarmte in de rookgassen wordt met een warmtewisselaar (9) aan de rookgassen onttrokken, waardoor het thermisch vermogen als warm water beschikbaar is.

Indien de turbine wordt geïntegreerd met een ketel, zoals in dit project voor ogen staat, is de warmtewisselaar overbodig en worden de rookgassen (8) direct naar de ketelbrander geleid.





*Figuur 1 Schematisch overzicht van de Turbec T100 gasturbine met recuperator en warmtewisselaar. (bron: www.turbec.com)*

Capstone biedt de keuze uit 2 vermogens: 30 en 60 kWe bij een elektrische rendement van respectievelijk 26 en 28 % en een overall rendemente van 83 en 85%.

Belangrijkste product van Turbec is de T100 CHP microturbine. Deze turbine produceert 100 kWe bij een elektrisch rendement van 30% en een overall rendement van 78%.

Tabel 1 geeft een overzicht van de beschikbare turbines en hun prestaties.

*Tabel 1 Overzicht van de beschikbare microturbines en hun prestaties*

Fabrikant	Type	vermogen. [kW]		rendement [%]		
		Elektr.	Therm.	Elekt.	Therm.	Overall
Capstone www.microturbine.com	C30 Low	28	64	25	57*	82
	C30 High	30	66	26	57*	83
	C60 High	60	123	28	57*	85
Turbec www.turbec.com	T100 CHP	100	167	30	48	78
Bowman	TG80 CG	80	150	27	51	78
	TG80 BG	80	150	27	51	78
			219	24	66	90
	recuperated		288	21	76	97
	TG80 SG	80	385	16	74	90
Ingersoll	70 LM	70	130	28	52*	80
	70 SM	70	135	27	52*	79
Cummins	GTAA hp	28	31	23	25	48
	GTTA lp	30	32	25	26	51
	GTAB hp	60	67	25	28	53
Elliot	TA 80	80	264	28	64	92

\*Op basis van uitkoeling van de rookgassen tot 60 °C

Alle turbines uit bovenstaande tabel zijn geschikt voor aardgas als brandstof en produceren rookgassen die zonder reiniging voor CO<sub>2</sub>-dosering gebruikt kunnen worden.

Aangezien energiebesparing bij de inzet van microturbines op tuinbouwbedrijven voorop staat, en deze bereikt moet worden met elektriciteitsproductie, is het elektrisch rendement voorsnog het allerbelangrijkste selectie criterium. Het in tabel 1 genoemd overall thermisch rendement speelt geen rol omdat deze vooral afhangt van de toegepaste warmtewisselaar (nummer 9 in figuur 1). Deze warmtewisselaar wordt in de uitvoeringsvorm waarover in dit project wordt gesproken vervangen door de ketel en zijn condensor, welke een relatief zeer groot warmtewisselend oppervlak hebben en het dus altijd beter zullen doen dan de compacte warmtewisselaar die in de commerciële uitvoeringsvorm van de microturbine wordt meegeleverd.

Vanuit die optiek komt de Turbec T100 met 30% rendement als meest geschikte machine naar voren. Dit is een recuperated turbine. In de onderstaande tabel zijn de technische specificaties van deze machine weergegeven. In het tweede deel van de tabel staan enkele specificaties die aan de hand van de opgegeven specificaties kunnen worden afgeleid. De specificaties gelden voor de turbine mét warmtewisselaar zoals Turbec de T100 standaard levert.

*Tabel 2 Opgegeven en afgeleide specificaties van de Turbec T100 microturbine met warmtewisselaar.*

<i>Opgegeven</i>	
Elektrisch vermogen	100 kW
Elektrisch rendement	30 %
Thermisch vermogen <sup>1)</sup>	167 kW
Thermisch rendement <sup>1)</sup>	48 %
Rookgastemperatuur <sup>2)</sup>	85 °C
Rookgasdebiet	0.8 kg/s
<i>Afgeleid</i>	
Gasverbruik	38 m <sup>3</sup> /h
Rookgastemperatuur <sup>3)</sup>	275 °C
Rookgas CO <sub>2</sub> massadebiet	0.0187 kg/s
Rookgas H <sub>2</sub> O massadebiet	0.0200 kg/s
Soortelijke warmte rookgas	1051 J/(kg.K)
Luchtfactor	6.8

<sup>1)</sup> Niet relevant in dit project

<sup>2)</sup> Bij het verlaten van de warmtewisselaar, niet relevant in dit project.

<sup>3)</sup> Direct uit de turbine (nr. 8 in Figuur 1). Berekend volgens:

$$P_{\text{therm}} = P_{\text{elek}} / 0.30 \times 0.48 = C_{p_{\text{rookg}}} \times \dot{m}_{\text{rookg}} \times (T - 85)$$

E.on is er in samenwerking met branderfabrikant Eclipse in geslaagd om deze microturbine met de ketel en brander te integreren op een zodanige wijze dat dat een goede verbranding gecombineerd kan worden met een goede regelbaarheid.

De prestaties van de installatie konden evenwel om praktische redenen nog niet experimenteel worden gemeten. Daarom wordt in dit rapport uitgegaan van de productspecificaties die door de fabrikant zijn opgegeven.

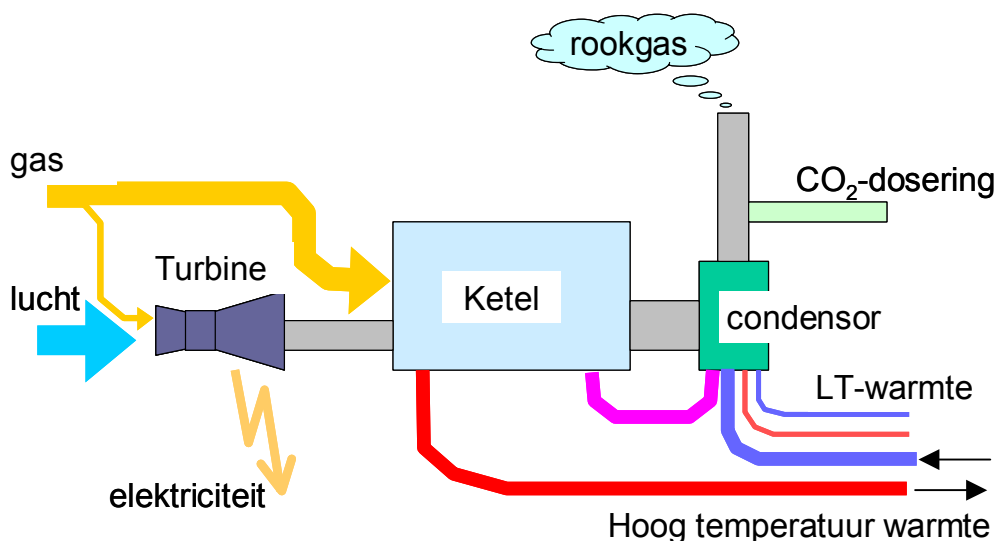
## 2.3 Installatie

De brander van een moderne tuinbouwketel is een complex geheel. De aanvoer en samenstelling van verse lucht moet zodanig zijn dat de verbranding optimaal verloopt. Normaal gesproken wordt deze aanvoer door de branderventilator verzorgd waarvan het luchtdebiet via een smoorklep geregeld kan worden. De microturbine wordt evenwel aan/uit geregeld zodat de branderfabrikant een constructie heeft gemaakt waarmee het aan/uit gedrag gecombineerd kan worden met een modulerend gedrag voor de luchttoevoer. De warmtewisselaar ((9) in figuur 1) is in deze installatie achterwege gelaten. De functie van dit onderdeel is immers overgenomen door de ketel en zijn condensor.

Door het weghalen van de warmtewisselaar geeft de turbine 230 kW aan hete rookgassen, in plaats van de in de tabel genoemde 167 kW warm water. In onderstaande figuur is het principeschema van de voorgestelde installatie geschetst. De turbine wordt uitsluitend als aan/uit installatie gebruikt, zodat het minimale gasverbruik van de installatie 0 of 38 m<sup>3</sup>/uur is, het gasverbruik van de turbine.

De turbine converteert aardgas naar 100 kW elektriciteit en 230 kW warmte. Deze warme rookgassen kunnen in de ketel en de condensor met een goed rendement (zie figuur 6) worden omgezet in warmte voor het laag- en hoog temperatuur verwarmingssysteem. De warmte die in de eerste trap van de condensor en in de ketel aan de rookgassen wordt onttrokken kan zelfs worden gebufferd.

Wanneer de turbinerookgassen in de ketel verder worden naverbrand zal het omzettingsrendement oplopen. Hierop wordt in de volgende paragraaf verder ingegaan.



*Figuur 2 Schematisch overzicht van de microturbine geïntegreerd met de ketel.*

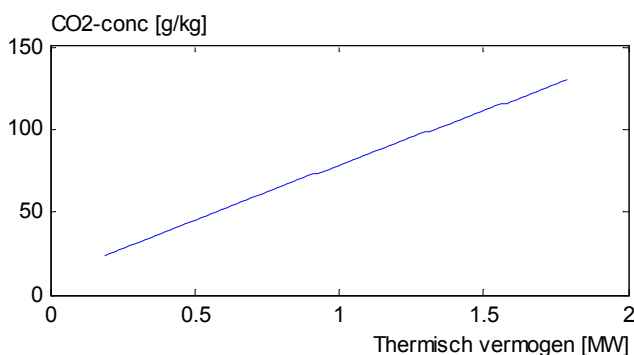
Op momenten dat de warmtevraag groter is dan de warmteproductie van de turbine of wanneer de CO<sub>2</sub>-vraag groter is dan 67 kg/uur (de CO<sub>2</sub>-productie bij verbranding van 38 m<sup>3</sup> aardgas) kan in de ketel gas worden bijgestookt.

Op deze manier kan zonder rookgasreiniger en zonder extra waterzijdig leidingwerk een onderhoudsarme WKK in het ketelhuis worden opgenomen waarmee elektriciteit, warmte en CO<sub>2</sub> kan worden geproduceerd.

## 2.4 Systeemeigenschappen

Vanwege het feit dat de in het vorige hoofdstuk beschreven installatie geen variabel rookgasdebiet heeft veranderen de concentraties van CO<sub>2</sub> en waterdamp in de rookgassen aanzienlijk met de mate van naverbranding. In dit hoofdstuk worden deze relaties in grafiekvorm weergegeven en besproken.

De CO<sub>2</sub>-concentratie in de rookgassen van gebruikelijke tuinbouwketels kan berekend worden door het CO<sub>2</sub>-massadebiet te delen door het rookgasdebiet volgens  $1.78 / (0.83 + 11 \times \text{luchtfactor})$  (De Zwart, 1996), en ligt in de orde van 130 g CO<sub>2</sub> per kg rookgas. In de onderstaande figuur is de CO<sub>2</sub>-concentratie in de rookgassen als functie van het gasverbruik van de microturbine/brander combinatie weergegeven.

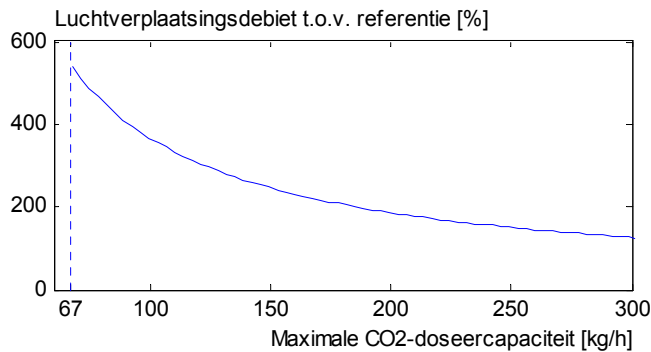


*Figuur 3 CO<sub>2</sub>-concentratie in de rookgassen als functie van het thermisch vermogen van de microturbine/brander combinatie. Uitgangspunt is een turbine die 38 m<sup>3</sup> aardgas per uur verbrandt en een ketel die een variabele verbrandingscapaciteit heeft van 0 tot 170 m<sup>3</sup> per uur. Bij het eindpunt van de lijn wordt het maximale gasverbruik van de combinatie verstoekt en de CO<sub>2</sub>-concentratie gelijk aan de 127 g/kg van de standaard ketel.*

Doordat de Turbec T100 op een luchtfactor draait die 5.7 keer groter is dan die van een ketel is de CO<sub>2</sub>-concentratie 5.7 keer lager. Figuur 3 laat dan ook lage CO<sub>2</sub>-concentraties zien in geval de turbine/ketel combinatie met een lage branderstand CO<sub>2</sub> levert. Dit betekent dat het rookgasdebiet dat nodig is om CO<sub>2</sub> met de gebruikelijke doseercapaciteiten te realiseren in geval een microturbine/ketel combinatie wordt gebruikt vaak hoger zal zijn dan wanneer de standaard tuinbouwketel wordt gebruikt voor de CO<sub>2</sub>-dosering. Bij gebruik van de microturbine/ketel combinatie zal de luchtverplaatsing in het CO<sub>2</sub>-verdeelsysteem dus groter zijn dan bij gebruik van een gangbare tuinbouwketel.

Uiteraard speelt dit effect sterker naarmate het aandeel van de turbine in de CO<sub>2</sub>-dosering groter is. Dit blijkt uit de onderstaande grafiek (figuur 4).

Wanneer als referentie een doseersysteem wordt genomen dat 67 kg CO<sub>2</sub> per uur over de kas verdeelt (de doseersnelheid die de microturbine kan realiseren) zal de veel grotere luchtvermaat die de turbine hierbij gebruikt geheel doorwerken in het doseersysteem. Dit moet dan bijna 6 keer zoveel rookgassen de kas in blazen dan wanneer deze zelfde dosering met ketelrookgassen zou worden gerealiseerd.

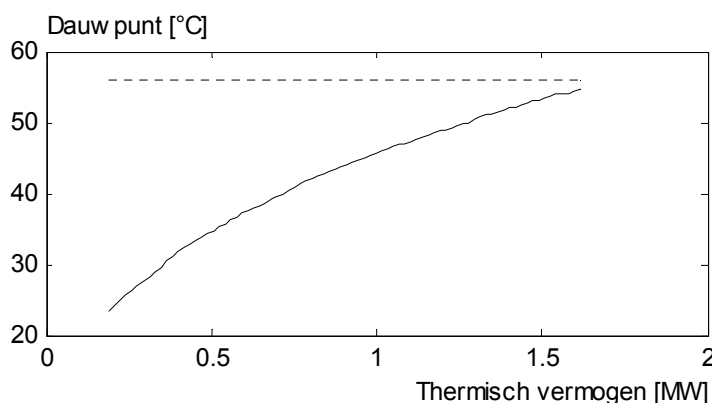


*Figuur 4* Procentuele toename van het luchtverplaatsingsdebiet bij CO<sub>2</sub>-dosering met de in dit rapport besproken microturbine/brander combinatie ten opzichte van de luchtverplaatsing bij CO<sub>2</sub>-dosering met een standaard tuinbouwketel als functie van de gewenste maximale CO<sub>2</sub>-doseercapaciteit.

Het beginpunt van de grafiek laat zien dat, indien de rookgassen uitsluitend uit de turbine worden betrokken (en er dus 67 kg/uur wordt gedoseerd) het te verdelen rookgasdebiet 5.6 maal zo groot is. Dit komt doordat de luchtvermaat van de turbine 5.6 maal zo groot is als die van een standaard-ketel (6.8 in plaats van 1.2)

Gaan we echter uit van een modern groenteteelt bedrijf van 2 ha, dan zal het referentie doseersysteem 300 kg/uur (of meer) doseren en hoeft de capaciteit van het doseersysteem slechts 40% groter te zijn (3300 m<sup>3</sup> per uur in plaats van 2400 m<sup>3</sup> per uur).

Een ander effect van de hogere gemiddelde luchtvermaat van de microturbine/brander combinatie is een verlaging van het dauwpunt van de rookgassen. In onderstaande grafiek wordt het verband tussen dauwpunt en gasverbruik van de combinatie getoond

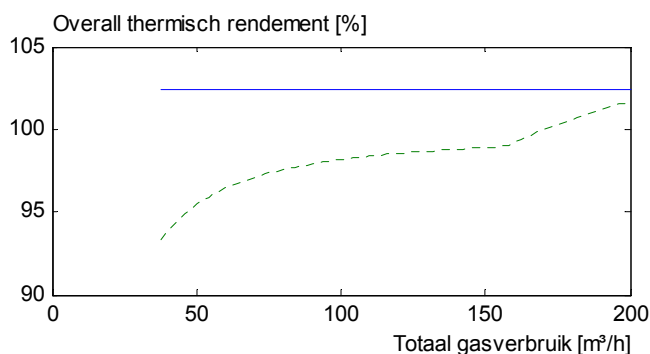


*Figuur 5* Dauwpunt van de rookgassen als functie van het thermisch vermogen van de microturbine/brander combinatie. Uitgangspunt is een turbine die 38 m<sup>3</sup> aardgas per uur verbrandt en een ketel die een variabele verbrandingscapaciteit heeft van 0 tot 140 m<sup>3</sup> per uur. De rechte lijn is het dauwpunt van de rookgassen van een standaard ketel.

De consequentie van het gemiddeld lagere dauwpunt en de grotere luchtdoorvoer door de schoorsteen is dat het overall thermisch rendement van de installatie lager is dan van een referentie ketel. Dit geldt vooral bij lage thermische vermogens.

In onderstaande figuur is het overall rendement van de afkoeling van de rookgassen in de ketel en condensor tot een rookgastemperatuur van 50 °C getoond.

Voor de microturbine/ketel combinatie is dit rendement afhankelijk van het thermisch vermogen dat aan ketel en condensor wordt onttrokken. Voor de referentie-situatie is dit overall rendement onder de gestelde uitgangspunten constant<sup>1</sup>.



*Figuur 6 Overall thermisch rendement van de turbine/ketel combinatie als functie van het totale gasverbruik (gestreepte lijn). Een vergelijkbare ketel heeft een constant rendement van 103% (getrokken lijn).*

*Uitgangspunt is dat de uittredende rookgastemperatuur na de condensor in alle gevallen 50 °C is.*

De knik die figuur 6 naar voren komt ontstaat door de extra warme uit condensatie. Deze komt pas bij hoger totale gasverbruiken naar voren omdat bij lagere vermogens het dauwpunt te laag ligt (zie figuur 5).

Het bepalen van de effecten van het toepassen van het turbine-brandersysteem op het energieverbruik, het kasklimaat en de gewasproductie kan naast een praktijkproef alleen met een simulatiemodel. Ten behoeve van dit onderzoek is de het turbine-brandersysteem, zoals dat in de praktijk door E.on wordt toegepast, gemodelleerd en in KASPRO<sup>2</sup> geïmplementeerd. Hierbij is zo veel mogelijk het schema van Figuur 2 aangehouden.

<sup>1</sup> In een praktijksituatie zal de uitgaande rookgastemperatuur van de condensor oplopen naarmate het gevraagde thermisch vermogen van de kas oploopt omdat de gemiddelde buistemperatuur in dat geval oploopt. Dit leidt in de praktijk tot een beperkte afname van het overall rendement bij oplopend vermogen.

<sup>2</sup> Het simulatiemodel KASPRO simuleert klimaat en energieverbruik van een moderne tuinbouwkas. Het heeft een bedrijfsuitrusting die dicht bij de praktijk staat, een ingebouwde klimaatregelaar die overeenkomstig is met de huidige generatie klimaatcomputers en maakt gebruik van representatieve klimaatgegevens. Het simulatiemodel wordt continu up to date gehouden op basis van wetenschappelijk onderzoek, gewasonderzoek en ervaringen uit de praktijk en vormt in feite een 'virtuele kas'.

## 3 Inpassing in de tuinbouwpraktijk

### 3.1 Algemene inleiding

Met het simulatiemodel zijn simulatieberekeningen gedaan voor de situatie zonder turbine (referentie) en de situatie met het turbine-brandersysteem waarbij alle overige parameters (bedrijfsuitrusting, setpoints) gelijk gehouden zijn. Hierna is van beide situaties het netto-elektriciteitsverbruik bepaald alsmede de hoeveelheid gedoseerde CO<sub>2</sub> en de geschatte gewasproductie. De berekeningen zijn gedaan voor drie groentegewassen (tomaat, paprika, komkommer), een onbelichte rozengewas en een koud geteeld sierteeltgewas (fresia met grondkoeling). Bij de groentegewassen is alleen voor de tomaten een wat uitgebreidere analyse gepresenteerd. De perspectieven voor paprika en komkommer bleken namelijk vrijwel gelijk aan die van tomaten.

Algemeen kan gesteld worden dat door het gebruiken van WKK het gasverbruik van de tuinder toeneemt ondanks het feit dat de warmtevraag gelijk blijft. Er wordt immers elektriciteit geproduceerd die in de situatie zonder WKK bij de elektriciteitscentrale geproduceerd zou zijn. Dit gebeurt bij microturbines met een elektrisch rendement van 20 tot 30 procent.

Met het extra gasverbruik komt extra CO<sub>2</sub> ter beschikking die in principe voor CO<sub>2</sub>-dosering gebruikt kan worden. Uit Figuur 4 blijkt echter dat bij hoge doseringen de capaciteit van het doseersysteem onvoldoende kan zijn zodat in de praktijk niet alle extra CO<sub>2</sub> kan worden benut voor CO<sub>2</sub>-dosering. In de berekeningen is daarom per gewas rekening gehouden met een maximale doseercapaciteit.

Als gevolg van extra CO<sub>2</sub>-dosering zal de CO<sub>2</sub>-concentratie in de kas vaak iets hoger liggen dan in de situatie zonder microturbine. Dit is vooral het geval in de zomer, wanneer door hoge ventilatiedebieten de gewenste concentratie (bij lange na) niet bereikt wordt. Deze hogere concentratie zal een iets hogere gewasproductie tot gevolg hebben. Deze extra productie zal in de bedrijfseconomische berekeningen meegenomen worden.

### 3.2 Groentegewassen (tomaat)

Als representatief gewas voor de groenteteelt is een tomaten genomen die geteeld wordt in een moderne enkelglas tuinbouwkas van 2 ha. Onder de bedrijfsuitrusting vallen o.a. een rookgascondensator en een warmtebuffer van 100 m<sup>3</sup>/ha. Er wordt niet belicht en er is geen scherm aanwezig.

De kasluchttemperatuur overdag is tot januari ingesteld op 19 °C, vanaf januari tot april op 18 °C en vanaf april tot november op 19 °C. De ingestelde nachttemperatuur bedraagt 18, 17 en 18 °C respectievelijk. Er wordt gedurende het gehele jaar (behalve tijdens de teeltwisseling) een minimum buis aangehouden van 45 °C overdag en 40 °C 's nachts. In het zonnestralingstraject 100 tot 300 W/m<sup>2</sup> wordt de minimumbuis temperatuur afgebouwd naar de actuele kasluchttemperatuur.

CO<sub>2</sub>-dosering vindt plaats van zonopkomst tot een uur voor zonsondergang en zolang de buffer nog niet geheel gevuld is. Er wordt geen warmte vernietigd.

De resultaten van de berekeningen voor tomaten zijn weergegeven in tabel 3.

Tabel 3 Enkele relevante berekeningsresultaten van een standaard 2 ha tomatenbedrijf bij het toepassen van de microturbine als branderventilator

Electriciteit	kWh/(m <sup>2</sup> jr) piek	kWh/(m <sup>2</sup> jr) dal	kWh/(m <sup>2</sup> jr) totaal
Uitgespaard	3.0	2.6	5.6
Teruggeleverd	16.1	14.5	30.6
<hr/>			
Gemiddelde extra CO <sub>2</sub> -dosering	7.1 %		
Gemiddelde extra productie	1.0 %		
Extra gasverbruik	6.5 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> jr)		

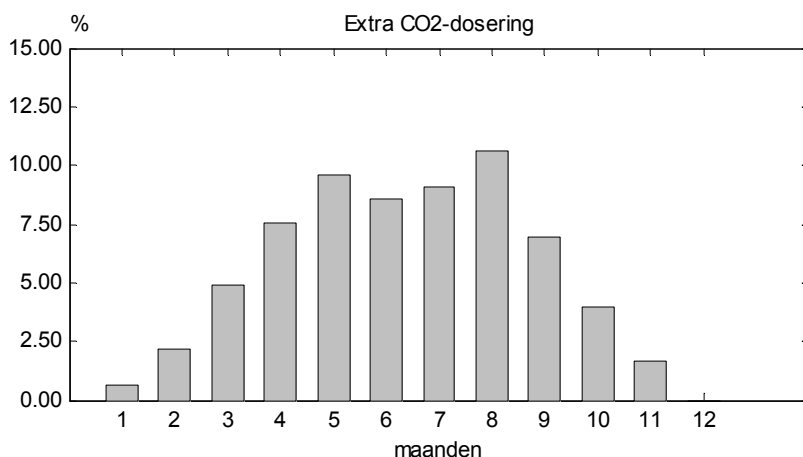
Tabel 3 laat zien dat de microturbine op een tomatenbedrijf van 2 ha 38 kWh per m<sup>2</sup> per jaar produceert. Hiervan wordt het merendeel via het openbare elektriciteitsnet afgezet. Er wordt iets meer in de hoogtariefperiode geleverd dan in de laagtarief periode.

Het elektriciteitsverbruik in de referentie is berekend op 3.0 kWh/(m<sup>2</sup> jr) in de hoogtarief periode en 2.6 kWh/(m<sup>2</sup> jr) in de daltarief periode (5.6 kWh/(m<sup>2</sup> jr) totaal.

De T100 microturbine op een bedrijf van 2 ha levert op jaarbasis dus meer dan 6 maal het eigen verbruik. Het bedrijf neemt nauwelijks nog stroom van het openbare net in piek-uren af en erg weinig tijdens de dal-uren.

De CO<sub>2</sub> dosering is door de microturbine aanmerkelijk toegenomen en hieruit volgt een productietoename van 1%.

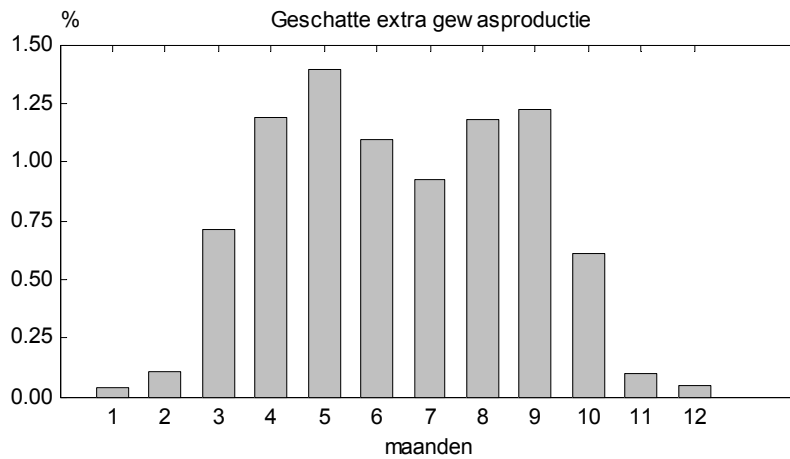
In onderstaande grafieken blijkt dat de extra dosering en productie vooral in de warme periode van het jaar naar voren komt. Het lagere effect in de koude periode komt niet doordat de microturbine minder draaiuren maakt, maar doordat de toename van de beschikbaarheid aan CO<sub>2</sub> niet in de kas aangewend kan worden. In koude, donkerder perioden is de CO<sub>2</sub> vraag namelijk beperkt.



Figuur 7 Extra CO<sub>2</sub>-dosering door het toepassen van het turbine-brandersysteem als percentage ten opzichte van de referentie 2 ha tomatenteelt.

Wanneer de extra productie grafisch wordt weergegeven zien we een figuur met een vergelijkbare vorm, zij het dat in voor en najaar het effect relatief wat sterker is dan in de zomer. Dit komt doordat in de zomer de concentratieverhoging in de kas per kg extra gedoseerde CO<sub>2</sub> in de regel wat lager is dan in voor- en najaar.



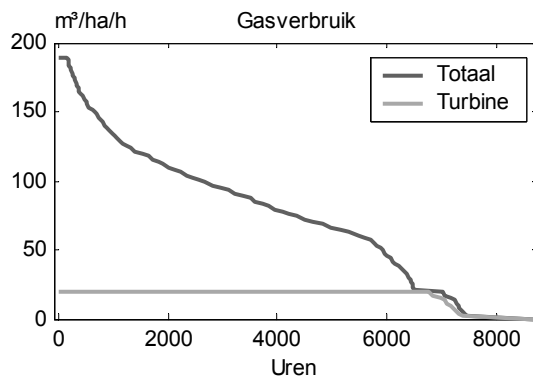


*Figuur 8* Berekende extra gewasproductie door het toepassen van het turbine-brandersysteem als percentage ten opzichte van de referentie 2 ha tomatenteelt.

Tot slot wordt in figuur 9 de jaarbelastingduurkromme getoond van het gasverbruik van de turbine en het totale gasverbruik.

Uit de figuur blijkt dat de turbine jaarlijks ruim 7000 draaiuren maakt. Het aandeel van het gasverbruik van de turbine in het totale gasverbruik is echter gering. Uiteraard heeft dit te maken met het bedrijfsoppervlak waarop deze turbine wordt toegepast.

De maximale gasafname van dit bedrijf is op 190 m<sup>3</sup>/ha/uur afgesteld.



*Figuur 9* Jaarbelastingduurkromme van het gasverbruik van de brander en van de turbine voor de tomatenteelt. De afronding van de turbine-curve betekend niet dat deze in deellast draait maar wordt veroorzaakt door draaitijden kleiner dan één uur.

### 3.3 Snijbloem (roos)

Als typisch warm geteeld snijbloemgewas is de onbelichte roos genomen (hoewel het rozenareaal dat niet belicht wordt elk jaar kleiner wordt). Onder de bedrijfsuitrusting vallen o.a. een rookgascondensor en een warmtebuffer van 100 m<sup>3</sup>/ha. Ook hier is geen scherm aanwezig.

De kasluchttemperatuur overdag is van maart tot september ingesteld op 19.5 °C en de rest van het jaar op 18 °C. De ingestelde nachttemperatuur bedraagt 18.5 en 17 °C respectievelijk. Er wordt gedurende het gehele jaar een minimum buis aangehouden van 45 °C overdag en 30 °C 's nachts. In het zonnestralingstraject 100 tot 300 W/m<sup>2</sup> wordt de minimumbuis temperatuur afgebouwd naar de actuele kasluchttemperatuur.

CO<sub>2</sub>-dosering vindt plaats van zonopkomst tot een uur voor zonsondergang en zolang de buffer nog niet geheel gevuld is.

Bovenbeschreven set van klimaatinstellingen leidt tot een iets lager totaal energieverbruik dan bij de tomatenteelt.

Analoog aan de tabellen en figuren in de vorige paragraaf zijn ook voor de onbelichte roos de effecten van de inzet van een microturbine op een bedrijf van 2 ha in kaart gebracht

*Tabel 4 Enkele relevante berekeningsresultaten van een standaard 2 ha rozenbedrijf bij het toepassen van de microturbine als branderventilator*

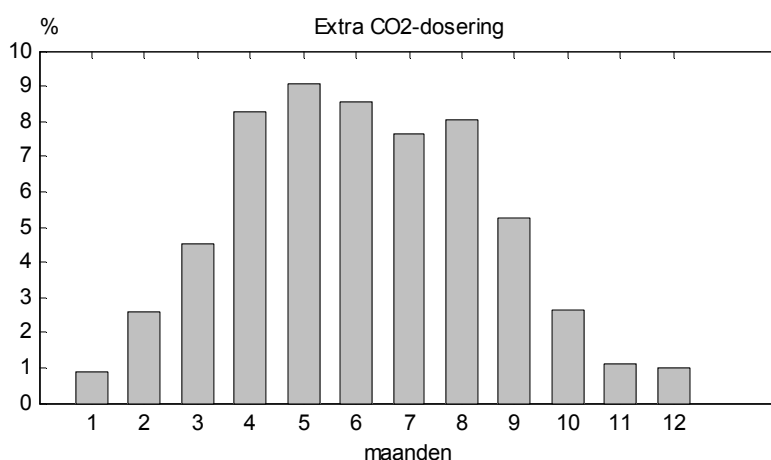
Electriciteit	kWh/(m <sup>2</sup> jr) piek	kWh/(m <sup>2</sup> jr) dal	kWh/(m <sup>2</sup> jr) totaal
Uitgespaard	3.5	2.6	6.1
Teruggeleverd	15.5	13.9	29.4

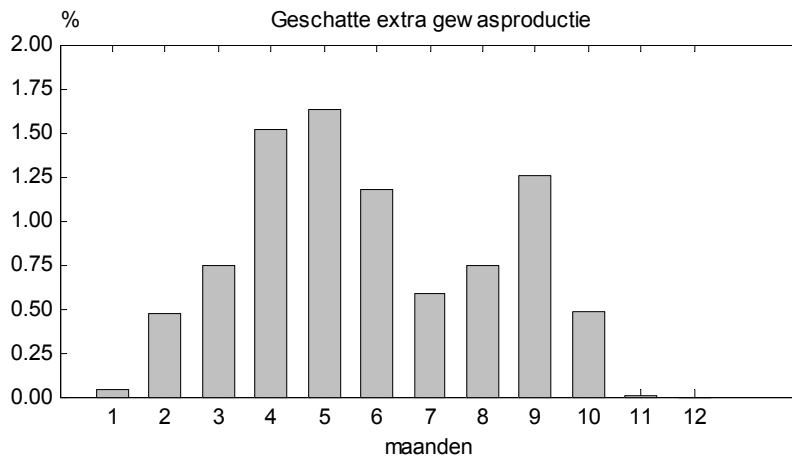
Gemiddelde extra CO <sub>2</sub> -dosering	5.9 %
Gemiddelde extra productie	1.0 %
Extra gasverbruik	6.2 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> jr)

De wat kleinere warmtevraag van de roos vertaalt zich in wat minder turbine draaiuren, waardoor elektriciteitsproductie, extra dosering en toename van het gasverbruik wat minder zijn dan bij de tomaat.

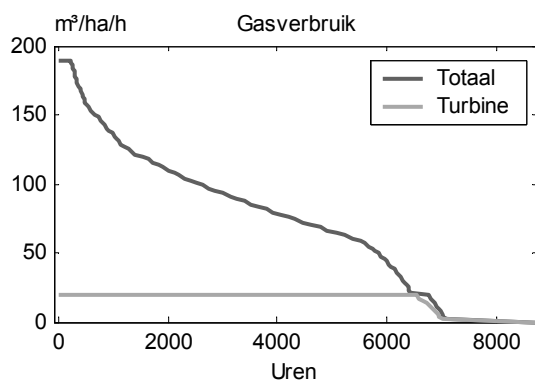
De vorm van de grafieken en de teneur van de effecten is echter zeer goed vergelijkbaar.



*Figuur 10 Extra CO<sub>2</sub>-dosering door het toepassen van het turbine-brandersysteem als percentage t.o.v. de referentie 2 ha rozenteelt.*



*Figuur 11 Geschatte extra gewasproductie door het toepassen van het turbine-brandersysteem als percentage t.o.v. de referentie 2 ha rozenteelt.*



*Figuur 12 Jaarbelastingduurkromme van het gasverbruik van de brander en van de turbine voor de rozenteelt*

Voor de belichte (rozen)teelt biedt de microturbine geen soelaas. Het lagere elektrisch rendement van de microturbine ten opzichte van een zuigermotor WKK zorgt namelijk voor een nog groter warmteoverschot. Ter oriëntatie: een gemiddelde belichtende tuinder heeft ongeveer  $45 \text{ W/m}^2$  geïnstalleerd vermogen in de kas en zo'n 3700 belichtingsuren. Voeding van deze lampen met een zuigermotor WKK betekent dat de WKK  $3700 * 45 * 3600 / .35 / 31e6 = 55 \text{ m}^3$  aardgas per  $\text{m}^2$  per jaar verbruikt. Dezelfde elektriciteitsproductie met een Turbec microturbine leidt tot een verbruik van  $64 \text{ m}^3$  per  $\text{m}^2$  per jaar. Aangezien zelfs de zuigermotor reeds tot warmte-overschotten leidt zullen de warmteoverschotten van de microturbine tenminste met het meerdere verbruik ( $9 \text{ m}^3/\text{m}^2$  per jaar) toenemen.

### 3.4 Koude sierteelt (fresia)

Als representatief koud geteeld sierteeltgewas is de fresia gekozen. Dit is een teelt met een lage warmtebehoefte ( $25 \text{ m}^3/\text{m}^2$  per jaar) maar door het toepassen van grondkoeling een hoge elektriciteitsbehoefte ( $28 \text{ kWh}/\text{m}^2$  per jaar) die in de referentiesituatie uit het openbare net betrokken wordt. Vanwege het belang van een zo continu mogelijk gebruik van de turbine is er bij de berekeningen van uitgegaan dat ook het fresiabedrijf met een warmte-opslagtank is uitgerust. Tevens is uitgegaan van de beschikbaarheid van een rookgascondensator. Er wordt niet belicht en er is geen scherm aanwezig.

Gedurende de periode maart t/m september wordt een kasluchttemperatuur van 8 (dag) en 6 (nacht) °C aangehouden, de rest van het jaar respectievelijk 14 en 12 °C. Gedurende juni t/m september wordt tevens de grondtemperatuur geregeld. Is deze warmer dan 14.5 °C, dan wordt de grond gekoeld. Er wordt geen minimumbuis aangehouden. Het setpoint voor de CO<sub>2</sub>-concentratie ligt op 600 ppm, maar omdat er gedurende een groot deel van het jaar geen warmtevraag is wordt er in de referentiesituatie vrijwel geen CO<sub>2</sub> gedoseerd. Doordat er in de zomer (vrijwel) geen warmtevraag is zullen ketel en turbine een groot deel van het jaar stilstaan. In de winter, waarbij de turbine wel draait is het belang van de extra CO<sub>2</sub> die de turbine/ketel combinatie levert nihil.

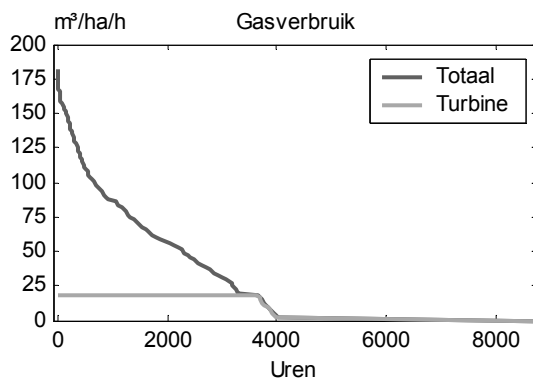
In tabel 5 zijn de gegevens over gasverbruik en elektriciteitsproductie beschreven en in figuur 13 is de jaarbelastingduurkromme van het gasverbruik afgebeeld.

Tabel 5 Enkele relevante berekeningsresultaten van een standaard 2 ha fresiabedrijf bij het toepassen van de microturbine als branderventilator

Electriciteit	kWh/(m <sup>2</sup> jr) piek	kWh/(m <sup>2</sup> jr) dal	kWh/(m <sup>2</sup> jr) totaal
Uitgespaard	2.0	1.5	3.5
Teruggeleverd	8.7	8.1	16.8

Gemiddelde extra CO <sub>2</sub> -dosering	–
Gemiddelde extra productie	–
Extra gasverbruik	3.9 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> jr)



Figuur 13 Jaarbelastingduurkromme van het gasverbruik van de brander en van de turbine voor de fresiateelt

Tabel 5 en figuur 13 laten zien dat het aantal draaiuren van de microturbine ongeveer gehalveerd is in vergelijking met de warmere teelten.

De turbine levert in totaal ongeveer 20 kWh/(m<sup>2</sup> jr), maar doordat deze elektriciteit vooral in de winter geproduceerd wordt en het overgrote deel van de elektriciteit in de zomer gebruikt wordt (grondkoeling) draagt de turbine nauwelijks bij aan de vermindering van de inkoop van elektriciteit.

Het gebruik van de turbine in de zomer, waarbij de overtollige warmte vernietigd zal moeten worden is een denkbare optie omdat de kosten van deze zelfgemaakte elektriciteit aanmerkelijk lager liggen dan de inkoop van stroom (7 á 8 ct per kWh voor zelf gemaakte elektriciteit versus 11 tot 16 ct/kWh voor ingekochte elektriciteit). Dit zal echter averechts werken op de energiebesparing aangezien in geval de warmte niet gebruikt wordt het totaalrendement van het openbare elektriciteitsnet aanmerkelijk hoger is dan dat van een microturbine (42% versus 30%). Deze optie is daarom in het kader van dit glami-onderzoek niet verder uitgewerkt.

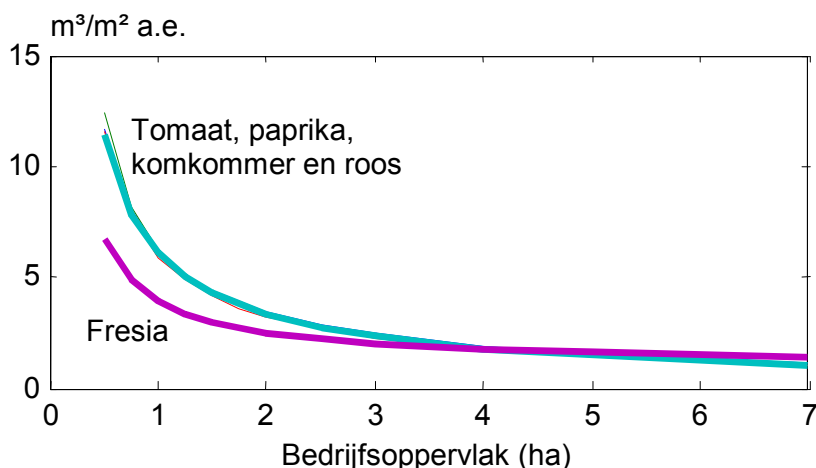
### 3.5 Energiebesparing

Uitgaande van de veronderstelling dat de lokale elektriciteitsproductie door middel van de microturbine het gasverbruik ten behoeve van de productie van elektriciteit elders vermindert kan een effectieve energiebesparing worden berekend.

Bij gebruik van de in dit rapport centraal staande Turbec T100 microturbine op een tomatenbedrijf van 2 ha is uit de simulaties gebleken dat het gasverbruik van het bedrijf hierdoor met  $6.4 \text{ m}^3/\text{m}^2$  per jaar toeneemt. De microturbine produceert daarbij jaarlijks ongeveer  $38 \text{ kWh}/\text{m}^2$ .

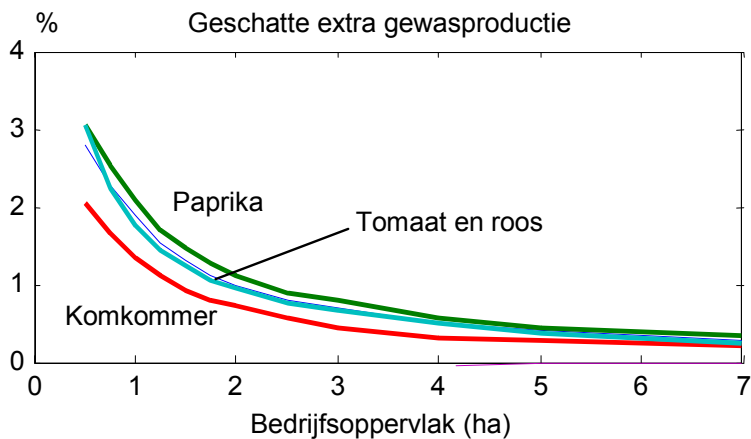
Uitgaande van het actuele gemiddelde centrale rendement van 42.1% en een transportverlies van 4.8% bij afname van elektriciteit via het hoogspanningsnet (wat in feite gebeurt als grote centrales elektriciteit voor het tuinbouwbedrijf leveren, maar welke vermeden worden als een microturbine elektriciteit in het middenspanningsgebied afzet) betekent dit een gasbesparing van ruim  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ . Het netto effect is dus een besparing in de orde van  $3.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ . Wordt dezelfde installatie op een kleiner bedrijf geplaatst dan blijft de energiebesparing in absolute zin vrijwel gelijk, maar neemt (daardoor) relatief per oppervlakteenheid toe.

Een soortgelijke berekening is voor een serie oppervlakken en voor verschillende gewassen uitgevoerd. Dit blijkt duidelijk uit figuur 14.



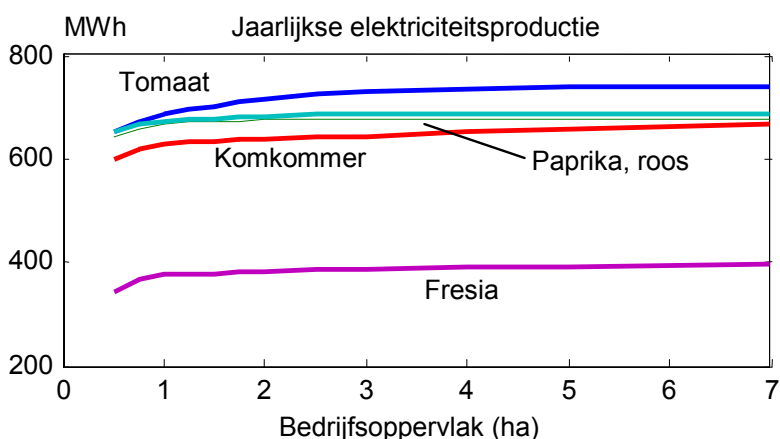
*Figuur 14 Netto besparing van het primaire brandstofgebruik (gasbesparing in landelijk elektriciteitsnet minus gasverbruikstoename op het tuinbouwbedrijf) bij gebruik van een Turbec T100 gasturbine. De curven voor de 4 warm geteelde gewassen liggen vrijwel op elkaar. Alleen de curve voor de fresiateelt ligt een stuk lager, met name bij kleinere oppervlakken. Het referentierendement voor elektriciteitsproductie is op 42.1% gesteld.*

Het effect op de gewasproductie wordt eveneens groter bij afname van het bedrijfsoppervlak per microturbine. Dit komt doordat de extra  $\text{CO}_2$  die door de turbine wordt geleverd op een steeds kleiner bedrijfsoppervlak wordt gedoseerd.



*Figuur 15* Procentuele toename van de gewasproductie bij gebruik van een Turbec T100 gasturbine voor 4 van de 5 gewassen als functie van het bedrijfsoppervlak. De onderlinge verschillen zijn zeer klein. De productietoename bij de fresiateelt is 0.

De hyperbolische vorm van de curven komt doordat de elektriciteitsproductie (en het aantal draaiuren) pas bij bedrijven kleiner dan 1 ha gaan afnemen. Voor grotere bedrijven (uitgezonderd bedrijven met een lage warmtevraag) maakt de turbine zo'n 7000 draaiuren en produceert deze de daarbij behorende 700 MWh. Bij de tomatenteelt is het aantal draaiuren het grootst (7250 uur bij 4 ha). Van de warme teelten is deze bij de komkommerteelt het laagst (6800 uur bij 4 ha). Dit blijkt uit onderstaande figuur.



*Figuur 16* Totale elektriciteitsproductie van de Turbec T100 gasturbine voor de vijf gewassen. De resultaten voor de 4 warm geteelde gewassen liggen dicht op elkaar. Die voor de fresiateelt ligt ver achter

## 4 Bedrijfseconomische perspectieven

### Inleiding

De economische haalbaarheid van de toepassing van de microturbine als brandventilator heeft voor een groot deel te maken met de investeringskosten van de installatie en verder vooral met de waarde van de geproduceerde elektriciteit.

Gezien het grote verschil tussen de inkoop- en verkoopwaarde van elektriciteit zal het financieel rendement gunstiger worden wanneer de kosten vooral door uitgespaarde inkoop worden goedge maakt.

Teneinde de gevoeligheid van het bedrijfseconomisch resultaat van deze belangrijkste parameters te kunnen bestuderen is een bedrijfseconomische evaluatie voor een tweetal typen microturbinen opgesteld. Dit zijn de tot nu toe besproken Turbec T100 en daarnaast de Capstone C60, met een elektrisch vermogen van 60 kW. Deze laatste heeft een kleiner elektrisch vermogen en zal dus minder elektriciteit aan het openbare net leveren.

### 4.1 Investering

De investeringen voor het turbine-brandersysteem zijn de aanschafprijs van de turbine, het aanpassen/vervangen van de bestaande brander en de installatiekosten. Microturbinen zijn in de beoogde toepassing nog niet algemeen in de markt verkrijgbaar. Voor de aanschaf- en onderhoudskosten kunnen dan ook alleen richtbedragen worden gehanteerd. In een recent uitgevoerd studie van Cogen projects (2003) staan zulke richtbedragen genoemd. De 100 kWe Turbec kost volgens dit document € 650,- per kW en de 60 kWe Capstone zou € 800,- per kW kosten (prijspijs 2000). Na inflatiecorrectie van 3% per jaar zou dit in 2004 uitkomen op respectievelijk € 730,- en € 900,- per kWe.

Ten behoeve van de installatie op locatie adviseert Cogen uit te gaan van 40 tot 60% van de aanschafwaarde. Wanneer hiervan het gemiddelde wordt genomen komt de investering voor de Turbec T100 op € 102420,- en de investering voor de Capstone C60 op € 75630,-.

De hieruit voortvloeiende rentelasten worden berekend middels een rentepercentage van 6.5%.

### 4.2 Onderhoud

In de studie die Cogen heeft uitgevoerd worden ook bedragen voor het onderhoud aan de microturbine genoemd. Ook hier wordt een range gehanteerd, namelijk 0.4 tot 0.5 €ct per kWh. Bij een elektriciteitsproductie van 700 MWh, zoals de Turbec T100 volgens figuur 16 jaarlijks realiseert (uitgezonderd de fresia) komt dit op een bedrag van ruim € 3000 per jaar. De Capstone turbine, met zijn lagere elektriciteitsproductie, komt uit op zo'n € 2000 per jaar. Bij de berekening van de onderhoudskosten verderop in dit hoofdstuk, waar de beide machines op bedrijven met een verschillend oppervlak worden ingezet, worden de onderhoudskosten voor de in die case geproduceerde hoeveelheid elektriciteit berekend, uitgaande van 0.45 €ct per kWh.



### 4.3 Tarieven voor gas en elektriciteit

De economische voordelen van het turbine-branderstysteem zijn naast het kunnen doseren van meer CO<sub>2</sub> (meer productie) een elektriciteitsproductie in plaats van -inkoop. Een groot deel van de geproduceerde elektriciteit zal echter het eigen gebruik overtreffen en zal aan het net teruggeleverd moeten worden (zie tabel 3 t/m 5). Sinds de markt voor elektriciteit een vrije markt is zijn alle bedrijven vrij om een leverancier te kiezen en hiermee over de elektriciteitstarieven te onderhandelen. Hierdoor is het lastig om ten behoeve van bedrijfseconomische berekeningen representatieve tarieven te bepalen. In dit rapport is uitgegaan van een gemiddeld inkooptarief van 16 ct/kWh tijdens plateau-uren en 11 ct/kWh tijdens daluren. Het teruglevertarief is vastgesteld op 1.2 en 4.2 ct/kWh voor plateau- en daluren respectievelijk (COGEN warmtekracht bijeenkomst, 2003).

De aardgasmarkt wordt vanaf 2004 vrijgegeven voor de gehele Nederlandse markt. Dit houdt in dat het CDS systeem (of een daarvan afgeleid systeem) gehanteerd zal worden waarbij de gaskosten worden opgesplitst naar een commodity deel en een diensten deel.

Aangezien bij de toepassing van een microturbine als branderventilator het gas-afnamepatroon verandert zijn per case de gaskosten volgens de cds-systematiek bepaald. Omdat bij kleine bedrijven het gebruik van de turbine het afnamepatroon gunstiger wordt, daalt de gemiddelde gasprijs op die bedrijven. Wanneer de gunstiger gasprijs wordt toegerekend aan het extra gasverbruik van de turbine dan kost dit extra gas nauwelijks meer dan de commodity prijs (ongeveer 13 ct/m<sup>3</sup>). Bij grote bedrijven is de bijdrage van de turbine in het totale gasverbruik nauwelijks merkbaar en kan het extra gas worden berekend met de gemiddelde gasprijs (ruim 18 ct/m<sup>3</sup>).

De gaskosten voor het CDS-systeem zijn bepaald met een contractcapaciteit van 160 m<sup>3</sup>/ha/uur voor de ketel, vermeerderd met het gasverbruik van de turbine (38 m<sup>3</sup>/uur bij de T100 en 25 m<sup>3</sup>/uur bij de C60). Voor de afstand tot het entry-point is 75 km gehanteerd (geldend voor het Westland). Er is een ruwe stookolieprijs van 168 €/ton gebruikt (prijspijs begin 2004) en een toeslag op de stookolieprijs van 21 €/ton.

### 4.4 Extra gewasproductie

De inkomsten uit *extra* gewasproductie worden berekend door de relatieve productietoename te vermenigvuldigen met de jaargemiddelde productiewaarde. Bij de groentegewassen ligt deze op € 40,- per m<sup>2</sup>/jaar. Voor onbelichte rozen is met € 35,- per m<sup>2</sup> per jaar gerekend en voor de fresiateelt € 18,- per m<sup>2</sup> per jaar. Hierop wordt voor alle gewassen nog een factor 0.72 toegepast om rekening te houden met het feit dat extra productie ook extra arbeids- en veilingkosten met zich meebrengt.

### 4.5 Terugverdientijd

In de presentatie van de resultaten wordt gebruik gemaakt van de terugverdientijd. Hiermee wordt de simpele terugverdientijd bedoeld en wordt berekend door de investering te delen door het jaarlijkse netto resultaat.

## 4.6 Resultaten

Om een gedetailleerd beeld van de opbouw van de kosten- en opbrengstenstructuur te geven wordt in onderstaande tabellen een overzicht van de relevante posten gegeven voor een tomatenbedrijf met een oplopend bedrijfsoppervlak. Tabel 6 geldt voor de Turbec T100 en tabel 7 voor de Capstone C60.

*Tabel 6 Economische kentallen van het gebruik van de Turbec T100 microturbine als branderventilator op een tomatenbedrijf in afhankelijkheid van het bedrijfsoppervlak. Alle getallen zijn uitgedrukt euro per m<sup>2</sup> kasoppervlak.*

Bedrijfsoppervlak [ha]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4
<b>Investering</b>	<b>20.48</b>	<b>10.24</b>	<b>6.83</b>	<b>5.12</b>	<b>4.10</b>	<b>3.41</b>	<b>2.56</b>
rente	1.33	0.67	0.44	0.33	0.27	0.22	0.17
onderhoud	0.59	0.31	0.24	0.16	0.13	0.11	0.08
extra gas	3.07	1.77	1.39	1.00	0.84	0.73	0.60
<b>Totaal Kosten</b>	<b>4.99</b>	<b>2.75</b>	<b>2.07</b>	<b>1.49</b>	<b>1.24</b>	<b>1.06</b>	<b>0.85</b>
uitgespaard elektra	1.01	0.86	0.80	0.77	0.75	0.73	0.71
verkoop elektra	3.43	1.77	1.32	0.85	0.66	0.52	0.37
extra gewasproductie	0.81	0.57	0.45	0.32	0.23	0.20	0.14
<b>Totaal Opbrengsten</b>	<b>5.26</b>	<b>3.20</b>	<b>2.57</b>	<b>1.94</b>	<b>1.64</b>	<b>1.45</b>	<b>1.22</b>
<b>Netto Opbrengsten</b>	<b>0.27</b>	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>	<b>0.44</b>	<b>0.40</b>	<b>0.39</b>	<b>0.37</b>
<b>Simpele terugverdientijd</b>	<b>76 jr</b>	<b>23 jr</b>	<b>14 jr</b>	<b>12 jr</b>	<b>10 jr</b>	<b>9 jr</b>	<b>7 jr</b>

*Tabel 7 Economische kentallen van het gebruik van de Capstone C60 microturbine als branderventilator op een tomatenbedrijf in afhankelijkheid van het bedrijfsoppervlak.. Tenzij anders vermeld zijn alle getallen uitgedrukt in euro per m<sup>2</sup> kasoppervlak.*

Bedrijfsoppervlak [ha]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4
<b>Investering</b>	<b>15.13</b>	<b>7.56</b>	<b>5.04</b>	<b>3.78</b>	<b>3.03</b>	<b>2.52</b>	<b>1.89</b>
rente	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12
onderhoud	0.37	0.19	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05
extra gas	1.91	1.04	0.75	0.60	0.51	0.45	0.37
<b>Totaal Kosten</b>	<b>3.27</b>	<b>1.73</b>	<b>1.21</b>	<b>0.95</b>	<b>0.78</b>	<b>0.68</b>	<b>0.54</b>
uitgespaard elektra	1.03	0.87	0.81	0.77	0.75	0.73	0.71
verkoop elektra	2.07	1.01	0.64	0.45	0.34	0.26	0.16
extra gewasproductie	0.54	0.32	0.22	0.17	0.09	0.08	0.04
<b>Totaal Opbrengsten</b>	<b>3.64</b>	<b>2.19</b>	<b>1.66</b>	<b>1.39</b>	<b>1.18</b>	<b>1.07</b>	<b>0.92</b>
<b>Netto Opbrengsten</b>	<b>0.37</b>	<b>0.47</b>	<b>0.46</b>	<b>0.45</b>	<b>0.40</b>	<b>0.40</b>	<b>0.38</b>
<b>Simpele terugverdientijd</b>	<b>41 jr</b>	<b>16 jr</b>	<b>11 jr</b>	<b>8 jr</b>	<b>7 jr</b>	<b>6 jr</b>	<b>5 jr</b>

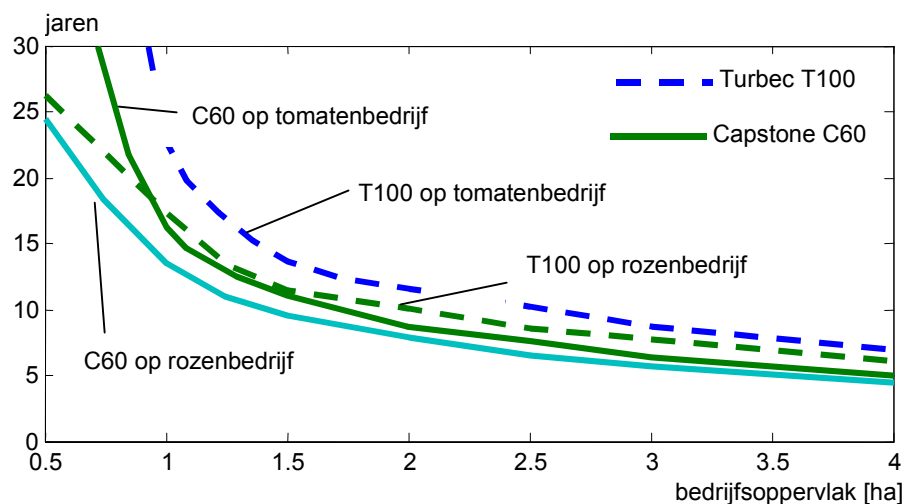
De tabellen laten zien dat overal de kosten voor het extra gasverbruik overheersen in de de kosten. Het onderhoud vormt de minst belangrijke kostenpost, maar is toch altijd nog in de orde van zo'n 10% van de totale jaarkosten.

Aan de opbrengstenkant speelt het effect van de grotere beschikbaarheid van CO<sub>2</sub>, en daarmee de toename van de gewasproductie een duidelijk kleinere rol dan de voordelen in de elektriciteitsfeer. Bij kleinere bedrijven is het eigen gebruik van elektriciteit klein en wordt het merendeel van de inkomsten verkregen via de verkoop van elektriciteit. Bij grotere bedrijven worden de inkomsten vooral verkregen uit de vermeden inkoop van elektriciteit. De waarde van de vermeden inkoop van elektriciteit varieert tussen de € 1,- per m<sup>2</sup> per jaar op een klein bedrijf en € 0.70 per m<sup>2</sup> per jaar op een groot bedrijf.

Het feit dat de waarde van de uitgespaarde inkoop van elektriciteit weinig afneemt, maar de investeringskosten sterk afnemen met het bedrijfsoppervlak maakt dat de toepassing van de microturbine tot kortere terugverdientijden leidt naarmate het bedrijfsoppervlak groter wordt. Een 60 kW microturbine als branderventilator op (één van de ketels) op een bedrijf van 4 ha leidt onder de hier gestelde economische randvoorwaarden tot een terugverdientijd van 5 jaar. De Turbec T100 blijkt nog te groot om bij een bedrijf van 4 ha tot zo'n terugverdientijd te komen. Deze machine is teveel afhankelijk van de waarde van de te verkopen elektriciteit. De terugverdientijd voor de beide typen microturbinen is op dezelfde manier als in tabel 6 en 7 ook berekende voor de roos, de komkommer, de paprika en de fnesia. De resultaten voor de fnesia waren, zoals verwacht kan worden op grond van tabel 5 en figuur 13 (§ 3.4) zeer negatief. Bij een bedrijf van 4 ha werd er net een positief netto kosteneffect gerealiseerd maar bleef de terugverdientijd groter dan 30 jaar.

De resultaten voor de komkommer en de paprika waren vergelijkbaar met die van de tomaat. Om een gemakkelijk interpreteerbaar overzicht te tonen zijn de terugverdientijden van de beide type microturbinen voor zowel de tomaat als de roos in een grafiek geplaatst.

*Figuur 17* Terugverdientijd van het turbine-brandersysteem als functie van het bedrijfsoppervlak voor een onbelichte rozen- en een tomatenteelt.



De figuur laat zien dat in alle gevallen de CapstoneC60 in economische zin beter scoort dan de Turbec T100 (de energiebesparing is altijd 2/3 van de besparing die met de Turbec wordt gerealiseerd). Opvallend is dat de perspectieven voor de roos bij kleine bedrijven wat beter zijn dan die voor de tomaat. Dit komt doordat de roos een wat hoger eigen verbruik heeft en in tegenstelling tot de tomaat een continu-teelt is (geen teeltwisseling).

## 5 Conclusies

Een uitgebreide scan met betrekking tot de beschikbare microturbines leidt tot de conclusie dat qua energiebesparingprestatie de Turbec T100 CHP voor de hier beoogde toepassing als zeer goed naar voren komt. Deze machine heeft een erg hoog elektrisch rendement. Het wat lagere thermisch rendement is bij gebruik van de turbine in combinatie met een ketel als naverbrander niet zo'n probleem omdat de rookgassen in die configuratie in de ketel en condensor goed kunnen worden uitgeoeld.

Op een gedeelde tweede plaats staan in dit opzicht de Capstone C60, Ingersoll 70LM, en Elliot TA 80. Deze turbines hebben een elektrisch vermogen van 60, 70 en 80 kW.

Bij de onderlinge beoordeling van de verschillende turbines is geen kostenoverweging meegenomen.

CO<sub>2</sub> dosering met rookgassen van een microturbine in plaats van een ketel leidt in principe tot een vergroting van het te distribueren rookgasdebiet. Dit effect is echter alleen merkbaar op bedrijven met een distributiesysteem dat minder dan 3300 m<sup>3</sup>/uur verplaatst. Bij grote bedrijven, bijvoorbeeld een tomatenbedrijf van 3 ha, hebben de bestaande rookgasverdeelsystemen een capaciteit die hier aanmerkelijk boven ligt zodat de turbinerookgassen hier zonder meer mee kunnen worden verdeeld.

Het gebruik van de Turbec T100 microturbine op een bedrijf van 2 ha leidt tot een toename van de CO<sub>2</sub> dosering van 7 tot 10% en geeft ongeveer 1% productiestijging. Bij grotere bedrijven, of bij gebruik van een kleinere turbine (zoals de Capstone C60) zijn deze effecten uiteraard kleiner.

Het gebruik van een microturbine als branderventilator op een ketel geeft bij kleine thermische vermogens een duidelijke verlaging van het thermisch rendement. Dit wordt veroorzaakt door de grote luchtvermaat van de turbine.

Wanneer de turbinerookgassen worden naverbrand in de ketel, en daarmee het thermisch vermogen van de installatie wordt opgevoerd, dan daalt de luchtvermaat en stijgt het rendement. Pas bij vol ketelvermogen heeft de microturbine/ketel combinatie hetzelfde thermisch rendement als de referentieketel.

Wanneer de microturbine als branderventilator wordt gebruikt zal het dauwpunt van de rookgassen sterk verlaagd worden, waardoor bij kleine thermische vermogens geen condensatie in de condensor zal optreden. Bij gebruik van een Turbec T100 zal het dauwpunt pas bij verbranding van meer dan 150 m<sup>3</sup>/uur condensatie in de condensor gaan optreden.

De toepassing van een Turbec T100 microturbine op groentebedrijven en andere warm geteelde gewassen leidt tot ongeveer 7000 draaiuren per jaar en daarmee tot een elektriciteitsproductie in de orde van 700 MWh. Het gasverbruik van het bedrijf stijgt hierbij met zo'n 129.000 m<sup>3</sup>, maar bij gebruik van het actuele gemiddelde parkrendement in Nederland bespaart de geleverde elektriciteit elders 199.000 m<sup>3</sup>. De in dit rapport centraal staande Turbec T100 microturbine levert dus een netto energiebesparing van ongeveer 70.000 m<sup>3</sup>. Bij een bedrijf van 2 ha betekent dit een energiebesparing van 3.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> jaar).

Uit de bedrijfseconomische analyse komt naar voren dat het voordeel dat met de installatie behaald kan worden sterk wordt gedomineerd door de vermeden inkoop van elektriciteit uit

het openbare net. Ingekochte elektriciteit is namelijk veel duurder dan de verkoopwaarde van de elektriciteit die door de turbine wordt opgewekt.

Omdat bij toenemend bedrijfsoppervlak het eigen gebruik in absolute zin toeneemt wordt het aandeel van de elektriciteit uit de microturbine dat voor eigen gebruik wordt ingezet steeds verder toe. Daarmee neemt ook de waarde van de geproduceerde elektriciteit steeds verder toe. Aangezien de vaste- en variabele kosten in absolute zin niet afhankelijk zijn van het bedrijfsoppervlak neemt het bedrijfseconomisch perspectief gestaag groter bij toenemend bedrijfsoppervlak.

Onder de in dit rapport gehanteerde economische randvoorwaarden leidt bovenbeschreven mechanisme bij gebruik van een Capstone C60 op een tomatenbedrijf van 4 ha tot een terugverdientijd van 5 jaar. De in dit rapport centraal staande Turbec T100 microturbine heeft op een bedrijf van 4 hectare een terugverdientijd van 7 jaar.

De netto energiebesparing die de Capstone C60 op een tomatenbedrijf van 4 ha realiseert is 1.24 (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> jaar), wat bijna 3% van het jaarverbruik van een standaard tomatenteelt is. De Turbec T100 realiseert op een bedrijf van 4 ha een netto energiebesparing van 1.85 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> per jaar. Dit is iets meer dan 4% van het gemiddeld jaarverbruik.

Vanuit bedrijfseconomisch opzicht is onder de gestelde aannamen het perspectief van de Capstone C60 beter dan dat van de Turbec T100. Het energiebesparingpotentieel van de Capstone C60 is echter wat kleiner.

Voor bedrijven met een koude teelt, die in de zomer daardoor geen warmte nodig hebben is de microturbine geen relevante optie. Op die bedrijven kan de installatie eenvoudigweg niet genoeg draaiuren maken om de investeringen te rechtvaardigen.

## 6 Nawoord

In de oorspronkelijke opzet van bovenbeschreven project zouden meetresultaten van een in de praktijk werkende pilot-opstelling in het rapport worden betrokken.

Door allerlei technische en organisatorische perikelen is het E.on-Benelux niet gelukt binnen de looptijd van dit project dergelijke meetresultaten te verzamelen.

Vanaf half januari 2004 is de beoogde installatie in principe klaar voor gebruik maar werkt zeker nog niet probleemloos. In plaats van een bijna continu gebruik, wat gezien de afmeting van het bedrijf waarop de installatie is geplaatst gemakkelijk zou moeten kunnen, staat de turbine veel stil en moet er veel aan de besturing worden aangepast.

De verwachting is echter dat al deze kinderziektes in de loop van het voorjaar van 2004 zullen worden verholpen en dat er in het najaar middels een naschrift over de prestaties kan worden gerapporteerd.

## 7 Literatuur

Cogen Projects, 2003, Nieuwe ontwikkelingen voor W/K-systemen in de glastuinbouw,  
Cogen Projects, Driebergen-Rijsenburg.