

(VEA/WKK/2008/1)

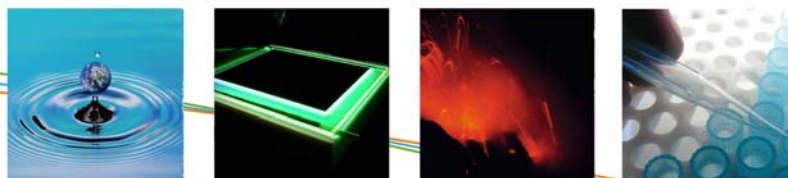
EINDRAPPORT

# ORIËNTERENDE STUDIE MICRO WARMTEKRACHTKOPPELING IN VLAANDEREN

Daan Six, Annick Dexters

VITO KHLim  
Studie uitgevoerd in opdracht van: VEA  
2009/ETE/R/016

April 2009



**VITO NV**

Boeretang 200 – 2400 MOL – BELGIE  
Tel. + 32 14 33 55 11 – Fax + 32 14 33 55 99  
vito@vito.be – www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)  
Bank 435-4508191-02 KBC (Brussel)  
BE32 4354 5081 9102 (IBAN) KREDBEBB (BIC)

Alle rechten, waaronder het auteursrecht, op de informatie vermeld in dit document berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek NV ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. De informatie zoals verstrekt in dit document is vertrouwelijke informatie van VITO. Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO mag dit document niet worden gereproduceerd of verspreid worden noch geheel of gedeeltelijk gebruikt worden voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin aangewend worden

## **VERSPREIDINGSLIJST**

VEA:	5 exemplaren
Secretariaat ETE:	1 exemplaar
Unit ETE:	7 exemplaren

### SAMENVATTING

In dit rapport worden de resultaten voorgesteld van een oriënterende studie naar de technisch-economische haalbaarheid van micro-warmtekrachtkoppeling (micro-WKK of  $\mu$ WKK) voor ééngezinswoningen in Vlaanderen (elektrisch vermogen rond 1 kWe). Het biedt een eerste inzicht in de mogelijke technologieën en hun (verwachte) commerciële beschikbaarheid, de toepassing ervan voor het woningpark in Vlaanderen, een inschatting van het totale marktpotentieel, een technische en economische analyse op basis van de huidig beschikbare informatie gevolgd door een sensitiviteitsanalyse op de verschillende parameters en tenslotte een overzicht van randvoorwaarden, barrières en risico's voor de introductie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen. Een uitgebreidere samenvatting is terug te vinden onder Hoofdstuk 7 Besluit.

$\mu$ WKK eenheden op basis van een Stirlingmotor en in combinatie met een hulpbrander staan op de rand van commerciële doorbraak. Enkele eenheden gebaseerd op een Rankine cyclus lijken ook bijna marktrijp. Over een tijdspanne van 5 jaar kunnen die technologieën gevolgd worden door  $\mu$ WKK's op basis van brandstofcellen. Microturbines hebben momenteel een te groot elektrisch vermogen om in ééngezinswoningen toegepast te worden en internal combustion engines (ICE's of interne verbrandingsmotoren) hebben enkele intrinsieke nadelen.

Vlaanderen (en bij uitbreiding België) heeft een relatief oud woningpark. Op basis van statistieken van de samenstelling van het woningpark (leeftijd, type, brandstof voor verwarming) en de huidige beschikbare  $\mu$ WKK technologie kan geconcludeerd worden dat tussen 21 en 42 % van de huidige aardgasaansluitingen van huishoudens op relatief korte termijn in aanmerking kunnen komen voor  $\mu$ WKK. Dit komt overeen met ongeveer 300 000 tot 600 000 huishoudens<sup>1</sup>. Rekening houdend met de jaarlijkse verkoopcijfers van verwarmingsketels zou dit bij een grootschalige commercialisering 23 000 tot 46 000 eenheden op jaarbasis betekenen. De totale primaire energiebesparing die daarmee gepaard gaat ligt in de grootte orde van ongeveer 500 tot 1000 GWh per jaar, de bijhorende CO2 reductie bedraagt dan ongeveer 75 000 tot 650 000 ton op jaarbasis<sup>2</sup>.

Vanuit economisch perspectief is een  $\mu$ WKK aan huidige marktprijs en technische specificaties voorlopig niet haalbaar. De voornaamste reden hiervoor is het feit dat er nog maar heel weinig commerciële eenheden beschikbaar zijn naast voor een groot stuk handgemaakte prototypes en er van echte schaalvoordelen door serieproductie nog geen sprake is. Om economisch haalbaar te zijn (eenvoudige TVT van 4 en dynamische TVT van 5 jaar), dient de eenheidskost van een  $\mu$ WKK 3 500 € te bedragen ipv van de beste huidige commerciële prijs van 8 000 € (bij een eenheidskost van 3 500 € bedraagt de totale systeemkost ongeveer 5 500 €). In het geval van een eenheidskost van 3 500 € bedraagt de NPV 1 200 € en de IRR 23 % (aannames zijn een actualisatievoet van 5 %, een inflatie van 2 % en een levensduur van 15 jaar). Vanaf een eenheidskost van 5 000 € of lager (totale systeemkost 7 100 €) kan de  $\mu$ WKK terugverdiend worden binnen zijn verwachte levensduur.

Uit de sensitiviteitsanalyse blijkt dat een globaal jaarlijks elektrisch rendement van 5 % het absolute minimum is om economische haalbaarheid te verzekeren. Voor de aangewende unit in deze studie komt dit inclusief allerlei verliezen overeen met 1370 tot 1430 draaiuren voor een gemiddelde jaarlijkse warmtevraag van 20 000 kWh.

---

<sup>1</sup> Dit komt ongeveer overeen met 10 tot 20 % van het totale Vlaamse woningpark in 2006.

<sup>2</sup> De grote spread wordt veroorzaakt door het verschil in aannames rond de EF voor centraal opgewekte elektriciteit: 0,349 kg CO<sub>2</sub>/kWh nucleaire centrales inbegrepen en 0,767 kg CO<sub>2</sub>/kWh zonder nucleaire centrales.

Lagere elektrische rendementen betekenen ook meer CO<sub>2</sub> uitstoot en meer energieverbruik in plaats van besparingen. Uit simulaties met de huidige commercieel beschikbare  $\mu$ WKK's dient vanuit technisch en economisch perspectief de jaarlijkse warmtevraag<sup>3</sup> tussen 15 000 en 25 000 kWh te liggen

Randvoorwaarden, barrières en risico's kunnen als volgt samengevat worden:

- Aansluiting op het elektriciteits- en gasnet
  - Impact op het elektriciteitsnet: de impact op het lokale elektriciteitsnet is van dezelfde aard als voor kleinschalige PV met dit verschil dat de gelijktijdigheid tussen elektriciteitsproductie en -consumptie maar ook de gebruiksduur hoger is dan voor PV
  - Onzekere impact op het lokale aardgasnet
- Technische randvoorwaarden, barrières en risico's
  - Goed begrip van regeling/aansturing door installateur en gebruiker is noodzakelijk
  - Technische betrouwbaarheid systeem moet nog verbeteren - kinderziektes
  - Technische specificaties versus prestaties in realiteit: noodzaak aan labeling (cfr HR+ en HRTop)
  - Goede sturing en regeling van de bijbrander (en bij uitbreiding de hele  $\mu$ WKK eenheid) is cruciaal
  - Gevaar voor foutieve implementatie van een  $\mu$ WKK
  - Andere "concurrerende" technologieën zoals thermophotovoltaïcs
- Economische randvoorwaarden, barrières en risico's
  - Huidige hoge investeringskost
  - Evolutie energieprijzen: de spread tussen elektriciteit- en gasprijs heeft een impact op de economische haalbaarheid
  - Teruglevering aan het elektriciteitsnet
- Ondersteuning, regelgeving en consumentengedrag
  - Onzekerheid over evolutie WKC verkoopprijzen en praktische modaliteiten voor het verkopen van WKC's door particulieren
  - Omslachtige aanvraagprocedure WKC's
  - Dumpen overbodige warmte of andere vormen van misbruik voor economische optimalisatie

De effecten van een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK op de verschillende actoren zullen zich bij de juiste prijzen voor de fabrikant en eindafnemer uiten in financieel voordeel gecombineerd met ecologische besparingen. Voor de overheid kan  $\mu$ WKK leiden tot CO<sub>2</sub> reductie en primaire energiebesparing. Voor de distributienetbeheerders is de impact op het gas- en elektriciteitsnet onduidelijker hoewel het intelligent aanwenden van  $\mu$ WKK's door een goede sturing/regeling in combinatie met de flexibiliteit van thermische opslag tot een reductie van het piekverbruik op het lokale net kan leiden.

---

<sup>3</sup> Het is belangrijk op te merken dat deze warmtevraag niet gelijk is aan het aardgasverbruik. Huidige verbruiksgegevens van huishoudens geven geen indicatie van het rendement van het gebruikte verwarmingssysteem en kunnen dus enkel een indicatie zijn van de warmtevraag van de aangesloten woning.

## INHOUD

<b>Verspreidingslijst</b>	<b>I</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>II</b>
<b>Inhoud</b>	<b>IV</b>
<b>Lijst van tabellen</b>	<b>VII</b>
<b>Lijst van figuren</b>	<b>VIII</b>
<b>Lijst van afkortingen</b>	<b>X</b>
<b>Hoofdstuk 1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Motivatie</i>	1
1.2 <i>Scope en indeling</i>	2
<b>Hoofdstuk 2 <math>\mu</math>WKK technologie: stand van zaken</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Het principe van WKK</i>	3
2.2 <i>Overzicht technologieën voor <math>\mu</math>WKK</i>	4
2.2.1 <i>Zuigermotor met inwendige verbranding (ICE)</i>	4
2.2.2 <i>Stirlingmotoren</i>	6
2.2.3 <i>Brandstofcellen</i>	9
2.2.4 <i>Micro-turbines</i>	11
2.2.5 <i>(O)RC of (Organic) Rankine Cycle systemen</i>	12
2.3 <i>Conclusies technologieën <math>\mu</math>WKK</i>	14
<b>Hoofdstuk 3 marktontwikkeling en potentieel</b>	<b>16</b>
3.1 <i><math>\mu</math>WKK technologie</i>	16
3.2 <i>Woningpark in Vlaanderen</i>	18
3.2.1 <i>Type woning</i>	18
3.2.2 <i>Bouwjaar woning</i>	19
3.2.3 <i>Type verwarming</i>	20
3.3 <i>Huidig verbruik aardgas Vlaamse huishoudens</i>	21
3.4 <i>Huidige Vlaamse markt van verwarmingsketels</i>	23
3.5 <i>Conclusies marktpotentieel</i>	24
<b>Hoofdstuk 4 Economische en milieu aspecten</b>	<b>26</b>
4.1 <i>Rekenmodel</i>	27
4.1.1 <i>Investeringskosten</i>	29
4.1.2 <i>Investeringsubsidies of financiële voordelen</i>	30
4.1.3 <i>Werkings- en onderhoudskosten</i>	31
4.1.4 <i>Technische karakteristieken <math>\mu</math>WKK eenheid</i>	31

4.1.5	Karakteristieken van de vraag	32
4.1.6	Elektriciteit- en gasprijzen	34
4.1.7	Warmtekrachtcertificaten	34
4.1.8	CO2 emissie	34
4.1.9	Slotopmerkingen	35
4.2	<i>Resultaten rekenmodel</i>	36
4.2.1	Algemene technisch-economische resultaten	36
4.2.2	CO2 besparing	38
4.2.3	(Relatieve) primaire energiebesparing	39
4.3	<i>Sensitiviteitsanalyse</i>	41
4.3.1	$\mu$ WKK eenheidskost	41
4.3.2	Verkoopprijs warmtekrachtcertificaten	45
4.3.3	Elektriciteit en gasprijs	47
4.3.4	Buffervatvariaties, warmtevraag en wisselwerking met elektrisch rendement	52
4.3.5	Aantal draaiuren Stirling, elektriciteitsproductie en elektrisch rendement	55
4.3.6	Jaarlijkse warmtevraag	58
<b>Hoofdstuk 5</b>	<b>Randvoorwaarden, barrières en risico's</b>	<b>61</b>
5.1	<i>Impact op het elektriciteitsnet</i>	61
5.1.1	Het elektriciteitsnet in Vlaanderen	61
5.1.2	Voorschriften en reglementen bij aansluiting van decentrale productie-eenheden	63
5.1.3	Impact van decentrale productie-eenheden op het LS- distributienet	64
5.1.4	Vergelijk tussen PV en micro-WKK	74
5.1.5	Besluit	75
5.2	<i>Impact op het gasnet</i>	75
5.3	<i>Technische randvoorwaarden, barrières en risico's</i>	76
5.3.1	Algemene regeling/aansturing van een $\mu$ WKK eenheid	76
5.3.2	Regeling/sturing bijbrander (auxiliary burner)	76
5.3.3	Technische betrouwbaarheid systeem - kinderziektes	77
5.3.4	Technische specificaties $\mu$ WKK versus praktijk - labelling	77
5.3.5	Gevaar voor foutieve implementatie van $\mu$ WKK	78
5.3.6	Andere technologieën	79
5.4	<i>Economische randvoorwaarden, barrières en risico's</i>	79
5.4.1	Hoge investeringskost	79
5.4.2	Evolutie energieprijzen	79
5.4.3	Teruglevering aan het elektriciteitsnet	80
5.5	<i>Regelgevende en andere randvoorwaarden, barrières en risico's</i>	80
5.5.1	WKC prijzen	80
5.5.2	Omslachtige aanvraagprocedure WKK-certificaten	81
5.5.3	Inventiviteit gebruiker	81
<b>Hoofdstuk 6</b>	<b>Potentiële voor- en nadelen marktactoren</b>	<b>82</b>
6.1	<i>(Centrale) Producenten</i>	83
6.2	<i>Transmissienetbeheerder</i>	83
6.3	<i>Distributienetbeheerder</i>	83
6.4	<i>Energieleveranciers</i>	84
6.5	<i>Eindgebruiker</i>	84

6.6	<i>Overheid</i>	85
6.7	<i>Fabrikanten</i>	85
6.8	<i>Smart grids</i>	85
<b>Hoofdstuk 7</b>	<b>Besluit</b>	<b>87</b>
	<b>Literatuurlijst</b>	<b>90</b>
	<b>Bijlage A (De)centrale verwarmingssystemen in Vlaanderen</b>	<b>93</b>
	<b>Bijlage B Verkoop verwarmingsketels België</b>	<b>95</b>
	<b>Bijlage C Technisch-economische resultaten standaard situatie <math>\mu</math>WKK</b>	<b>96</b>
	<b>Bijlage D Technisch-economische resultaten nieuw fiscaal regime</b>	<b>97</b>



## LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Voornaamste kencijfers zuigermotor met inwendige verbranding (ICE).....	5
Tabel 2: Voornaamste kencijfers (kleine) Stirlingmotoren .....	6
Tabel 3: Voornaamste kencijfers brandstofcellen .....	11
Tabel 4: voornaamste kencijfers micro-turbine.....	12
Tabel 5: Voornaamste kencijfers Organic Rankine Cycle (ORC) .....	13
Tabel 6: Verdeling type woningen in Vlaanderen volgens ECODATA 2007 .....	19
Tabel 7: Verdeling type woningen in Vlaanderen volgens NIS 2001 .....	19
Tabel 8: investeringskosten $\mu$ WKK.....	29
Tabel 9: Investeringssubsidies/financiële voordelen bij investering in $\mu$ WKK .....	30
Tabel 10: Investeringssubsidies/financiële voordelen bij investering $\mu$ WKK (vanaf 2009) .....	30
Tabel 11: Technische karakteristieken van de aangenomen $\mu$ WKK .....	31
Tabel 12: Algemene technisch-economische resultaten standaard situatie $\mu$ WKK.....	36
Tabel 13: Opbrengst warmtekrachtcertificaten $\mu$ WKK (marktprijs 41 €) .....	37
Tabel 14: CO <sub>2</sub> besparing $\mu$ WKK tov referentiesituatie (EF 0,349 kg CO <sub>2</sub> /kWh).....	38
Tabel 15: CO <sub>2</sub> besparing $\mu$ WKK tov referentiesituatie (EF 0,434 kg CO <sub>2</sub> /kWh).....	39
Tabel 16: CO <sub>2</sub> besparing $\mu$ WKK tov referentiesituatie (EF 0,767 kg CO <sub>2</sub> /kWh).....	39
Tabel 17: Kenmerken van de LS-netten beheerd door INFRAX en EANDIS.....	62
Tabel 18: R en X-waarden van de gebruikelijke ondergrondse kabels. ....	63
Tabel 19: Spanningsstijging bij eenfasige injectie van een decentrale productie- eenheid. ....	67
Tabel 20: Spanningsstijging bij een tweefasige injectie van decentrale productie- eenheid. ....	68
Tabel 21: Spanningsstijging bij driefasige injectie van een decentrale productie- eenheid. ....	69

## LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Vergelijking brandstofbenutting bij gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit en bij WKK.....	4
Figuur 2: Voorbeeld $\mu$ WKK met ICE: Senertec Dachs (5,5 kWe, 12,5 kWth).....	5
Figuur 3: WhisperGen, $\mu$ WKK met Stirlingmotor .....	9
Figuur 4: Baxi $\mu$ WKK eenheid met brandstofcellen .....	10
Figuur 5: $\mu$ WKK eenheid obv brandstofcellen (demonstratieproject Japan) .....	11
Figuur 6: Micro-turbine .....	12
Figuur 7: Rankine $\mu$ WKK: de Lion Powerblock (OTAG) .....	14
Figuur 8: Voorbeeld hoe een $\mu$ WKK CO <sub>2</sub> uitstoot kan verminderen of verhogen.....	18
Figuur 9: Leeftijd woningpark EU.....	20
<i>Figuur 10: Evolutie verkoop verwarmingsketels België.....</i>	24
Figuur 11: Referentiepunt in de economische analyse: de condenserende verwarmingsketel.....	26
<i>Figuur 12: Basisopstelling <math>\mu</math>WKK en buffervat .....</i>	28
Figuur 13: Voorbeeld warmtevraagprofiel woning .....	33
Figuur 14: Evolutie prijzen WKC's in 2008 .....	34
Figuur 15: RPEB in functie van variërende rendementen .....	41
<i>Figuur 16: Eenvoudige en dynamische TVT volgens variërende <math>\mu</math>WKK eenheidskost... 42</i>	42
Figuur 17: Eenvoudige en dynamische TVT volgens variërende $\mu$ WKK eenheidskost, nieuwe fiscale regeling.....	43
Figuur 18: NPV volgens variërende $\mu$ WKK eenheidskost.....	44
Figuur 19: NPV volgens variërende eenheidskost en nieuwe fiscale regeling.....	44
Figuur 20: IRR volgens variërende $\mu$ WKK eenheidskost .....	44
<i>Figuur 21: IRR volgens variërende <math>\mu</math>WKK eenheidskost en nieuwe fiscale regeling .....</i>	45
<i>Figuur 22: TVT bij variërende verkoopprijs WKC &amp; initiële eenheidskost <math>\mu</math>WKK 8000 €</i>	46
Figuur 23: IRR bij variërende verkoopprijs WKC & initiële eenheidskost $\mu$ WKK 8000 €	46
Figuur 24: NPV bij variërende verkoopprijs WKC & initiële eenheidskost $\mu$ WKK 8000 €.	46
.....	46
Figuur 25: Eenvoudige en dynamische TVT bij variërende elektriciteitsprijs .....	47
Figuur 26: NPV bij variërende elektriciteitsprijs.....	47
Figuur 27: Eenvoudige en dynamische terugverdientijd bij variërende gasprijs.....	48
<i>Figuur 28: NPV bij variërende gasprijs .....</i>	49
Figuur 29: NPV in functie van variërende elektriciteit- en gasprijzen .....	49
Figuur 30: Dynamische TVT in functie van variërende elektriciteit- en gasprijs .....	50
<i>Figuur 31: NPV ifv eenheidskost <math>\mu</math>WKK en stijgende energiekosten .....</i>	51
Figuur 32: Eenvoudige TVT ifv eenheidskost $\mu$ WKK en stijgende energiekosten .....	51
Figuur 33: Netto CO <sub>2</sub> uitstoot variërend volgens jaarlijks elektrisch rendement.....	55
Figuur 34: PBE variërend volgens verschillend jaarlijks elektrisch rendement van de $\mu$ WKK.....	56
Figuur 35: TVT $\mu$ WKK in functie van verschillend jaarlijks elektrisch rendement .....	57
Figuur 36: NPV variërend volgens jaarlijks elektrisch rendement.....	57
Figuur 37: IRR variërend volgens jaarlijks elektrisch rendement .....	58
Figuur 38: CO <sub>2</sub> uitstoot bij variërende jaarlijkse warmtevraag .....	59
Figuur 39: PBE bij variërende jaarlijkse warmtevraag .....	59
Figuur 40: TVT bij variërende jaarlijkse warmtevraag .....	59
Figuur 41: NPV bij variërende jaarlijkse warmtevraag.....	60
Figuur 42: IRR bij variërende jaarlijkse warmtevraag .....	60
Figuur 43: Schematisch overzicht van de opbouw van het elektriciteitsnet zonder DG	62
<i>Figuur 45: Schematisch overzicht van de opbouw van een standaard distributienet en spanningsverloop op verschillende momenten van netbelasting op dezelfde plaats in een distributienet. Bron: Infracx. ....</i>	66
<i>Figuur 46: Overzicht van de spanningstijging. ....</i>	70
Figuur 47: Hal bij Kiwa Gastec in Apeldoorn .....	70

---

Figuur 48: opbouw van de testopstelling van de "WEILANDPROEF" .....	71
Figuur 49: Spanning bij opstart en stop van de $\mu$ WKK's .....	71
<i>Figuur 50: Spanning bij opstart en stop van de <math>\mu</math>WKK's .....</i>	<i>72</i>
<i>Figuur 51: Verloop stromen voor en na kortsluiting. Rode lijn = spanning WKK / Blauwe lijn = stroom WKK / Groene lijn = stroom van het net.....</i>	<i>73</i>
Figuur 52: Overzicht van residentiële $\mu$ WKK's momenteel te koop in Vlaanderen. Anderen zie [Harrison,2008] / Solo(stirling) – EC-power(motor) behoren niet tot de scope van deze studie. ....	74
Figuur 53: Actoren op de Belgisch-Vlaamse energiemarkt .....	82

## LIJST VAN AFKORTINGEN

<b>Begrip</b>	<b>Definitie voor deze studie</b>
$\mu$ WKK	= $\mu$ CHP = micro-WKK = micro-warmtekrachtkoppeling Volgens de EU directive is dit warmtekrachtkoppeling met een elektrisch vermogen < 50 kWe. In deze studie zal de term " $\mu$ WKK" gebruikt worden voor $\mu$ WKK-technologieën bestemd voor residentiële toepassingen.
Residentiële toepassing	In deze studie wordt bedoeld: ééngezinswoningen, zowel vrijstaand als rijwoningen als halfopen bebouwing. $\mu$ WKK's die hier van toepassing kunnen zijn hebben dus een elektrisch vermogen in de grootte-orde van 1-2 kWe en een relevant thermisch vermogen voor tapwater en ruimteverwarming (gaande van ruwweg 10 tot 35 kWth). Het gaat dus niet om appartementsblokken, kantoorgebouwen, industriële toepassingen, ...
Efficiëntie/rendement	In deze studie wordt rendement of efficiëntie altijd aangegeven obv de onderste verbrandingswaarde tenzij expliciet aangegeven.
RPEB	Relatieve primaire energiebesparing
PEB	Primaire energiebesparing
LVB	Laagste (of onderste) verbrandingswaarde
HVB	Hoogste (of bovenste) verbrandingswaarde
WKC	Warmtekrachtcertificaat
DNB	Distributienetbeheerder
EF	Emissiefactor

---

## HOOFDSTUK 1      INLEIDING

---

### 1.1 Motivatie

Micro-warmtekrachtkoppeling (=  $\mu$ WKK) is een technologie waarbij tegelijk warmte en elektriciteit geproduceerd wordt. Hierdoor kan primaire energie op een efficiëntere manier aangewend worden.  $\mu$ WKK wordt door sommigen beschouwd als een potentiële opvolger van de huidige condensatieketels.

In het Vlaams klimaatbeleidsplan 2006-2012 werden de prioriteiten voor het bereiken van de klimaatdoelstellingen voor Vlaanderen vastgelegd. De klemtoon daarbij ligt op binnenlandse maatregelen:

1. onderzoek naar instrumenten voor energiebesparing in functie van het energierenovatieprogramma 2020 voor bestaande woningen en het streven naar een zo laag mogelijk energieprestatiepeil voor nieuwe woningen.
2. onderzoek hoe bij de regulering van distributie autonome elektriciteitsproductie obv hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling meer in rekening gebracht kan worden.

COGEN Vlaanderen, een onafhankelijke VZW voor de promotie van warmtekrachtkoppeling ter vermindering van de CO<sub>2</sub>-emissies, richtte het WKK-platform Vlaanderen op voor advisering rond WKK-wetgeving en ondersteuningsmaatregelen. Meer recent spitste COGEN Vlaanderen zich toe op het gebruik van WKK in gebouwen. Het energieverbruik van gebouwen is namelijk sinds 1990 met 36 % gestegen waardoor onderzoek naar instrumenten voor de verbetering van energieprestaties van bestaande gebouwen zijn nut kan bewijzen. Bovendien maakt het energieverbruik voor productie van elektriciteit en warmte in 2004 22 % uit van de totale Vlaamse uitstoot van broeikasgassen. De stimulatie van WKK en groene stroom kunnen mee een antwoord bieden op deze problematiek [Vlaamse Overheid, 2006].

In het buitenland zijn verschillende studies uitgevoerd naar de technisch-economische haalbaarheid van  $\mu$ WKK. In sommige landen, zoals het Verenigd Koninkrijk, Japan en Nederland, werden concrete veldtesten uitgevoerd met prototypes van  $\mu$ WKK-units voor gezinswoningen.

Verschillende fabrikanten van verwarmingsketels spitsen zich dan ook toe op onderzoek en ontwikkeling van  $\mu$ WKK-eenheden voor gezinswoningen en mikken op een marktintroductie in België eind 2010-begin 2011.

Uit de literatuur en de verschillende testen in het buitenland blijkt dat deze technologie interessante mogelijkheden biedt qua energiebesparing en reductie van CO<sub>2</sub>. Deze potentiële voordelen zijn echter niet gegarandeerd en afhankelijk van een aantal factoren zoals o.a. de performantie van de toestellen (elektrische en thermische efficiënties), de specifieke kenmerken van de afzonderlijke gezinswoningen (warmtevraag en elektriciteitsvraag), de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het elektriciteitspark en de marktomstandigheden.

Uit enkele  $\mu$ WKK-overlegvergaderingen blijkt dat verschillende partijen (fabrikanten verwarmingsketels, overheden, netbeheerders, energieleveranciers, ...) sterk geïnteresseerd zijn in de mogelijkheden en gevolgen van een eventuele marktintroductie van  $\mu$ WKK op de Vlaamse energiemarkt. Op dit moment bestaat echter nog geen oriënterende studie naar de technisch-economische haalbaarheid van  $\mu$ WKK op Vlaams residentieel niveau.

### 1.2 Scope en indeling

Dit rapport is een oriënterende studie van de technisch-economische haalbaarheid van micro-warmtekrachtkoppeling (vanaf nu  $\mu$ WKK) in Vlaanderen op residentieel niveau, d.i. het gebruik van  $\mu$ WKK systemen met een elektrisch vermogen in de grootte-orde van 1-2 kWe voor éénsgezinswoningen.

In deze studie zal in eerste instantie een overzicht gegeven worden van de verschillende technologieën die toepasbaar zijn voor  $\mu$ WKK en hun specifieke kenmerken. Daarbij zal de nadruk liggen op technologieën die het dichtst bij commercialisering staan (of reeds op de markt verkrijgbaar zijn).

Het tweede hoofdstuk behandelt de marktontwikkeling in Vlaanderen en geeft een eerste inzicht in het marktpotentieel voor residentiële  $\mu$ WKK.

Vervolgens wordt de economische haalbaarheid vanuit het standpunt van de eindgebruiker met de verschillende factoren en hun invloeden gesimuleerd. Het doel hierbij is om de verschillende beïnvloedende parameters in kaart te brengen en hun impact te kunnen inschatten (nieuwbouwwoning/bestaande woning, verschillende vraag naar warmte/elektriciteit, rendementen, kosten, ...) zodat de sensitiviteit beoordeeld kan worden.

De resultaten van het rekenmodel worden gekoppeld aan het marktpotentieel voor het berekenen van energiebesparingen en CO<sub>2</sub>-reductiepotentieel op grotere schaal.

Het vierde hoofdstuk beschrijft enkele technische en regelgevende aspecten en geeft een eerste indicatie van potentiële barrières voor de marktintroductie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen.

In een afsluitend hoofdstuk wordt een beknopt overzicht gegeven van de marktactoren die momenteel op de Vlaamse energiemarkt actief zijn en mogelijke voor- of nadelen voor die verschillende actoren.

Niet-residentiële WKK toepassingen vallen dus niet binnen het bereik van deze studie, net zoals een gedetailleerde uitwerking van de waardeketen bij commerciële toepassingen van  $\mu$ WKK technologie.

---

## HOOFDSTUK 2 $\mu$ WKK TECHNOLOGIE: STAND VAN ZAKEN

---

In dit hoofdstuk wordt eerst een beknopte voorstelling gegeven van het principe van warmtekrachtkoppeling en zijn potentiële voordelen. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de huidige beschikbare technologieën voor  $\mu$ WKK-toepassingen. Zoals in de scope beschrijving is aangegeven, ligt het accent vnl op technologieën die aan twee voorwaarden voldoen: ze zijn min of meer klaar (rijp) om op commerciële schaal toegepast te worden en ze zijn vanuit praktisch oogpunt toepasbaar in residentiële toepassingen.

### 2.1 Het principe van WKK

Warmtekrachtkoppeling kan gedefinieerd worden als *“de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische) en nuttige thermische energie, uitgaande van dezelfde primaire energiebron.”* [COGEN Vlaanderen, 2006].

De conventionele wijze waarop momenteel meestal voldaan wordt aan behoeftes van elektriciteit en warmte is het aankopen van elektriciteit van een energieleverancier via het lokale elektriciteitsnet en het verbranden van brandstof (meestal stookolie of aardgas) in een verwarmingsketel.

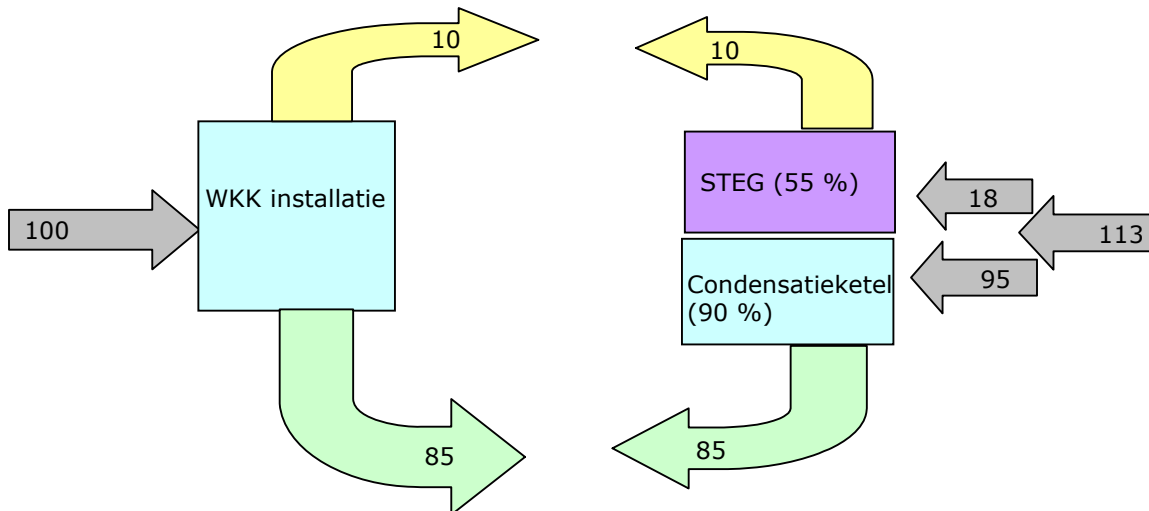
Het gebruik van warmtekrachtkoppeling met de gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte kan tot efficiëntere benutting van brandstof leiden ten opzichte van die conventionele manier van werken. Gecentraliseerde elektriciteitscentrales lozen namelijk grote hoeveelheden warmte in de atmosfeer via koeling: die geloosde warmte zou (voor een deel) gerecupereerd kunnen worden om aan de warmtebehoefte (in de nabije omgeving van zo'n centrale) te voldoen. Conventionele elektriciteitscentrales kennen, door het niet benutten van die restwarmte, een totale brandstofbenutting gaande van ruwweg 35 tot maximaal 60 %. Bovendien is warmte op hoge temperatuur “hoogwaardiger”<sup>4</sup> dan warmte op lage temperatuur. Bij conventionele verwarmingsketels wordt brandstof onmiddellijk omgezet in (laagwaardige) warmte. Bij warmtekrachtkoppelingssystemen daarentegen wordt de warmte (hoge temperaturen) in eerste instantie omgezet in mechanische energie (en dus elektriciteit), en wordt de rest van de warmte (lagere temperaturen) in tweede instantie gebruikt voor verwarming van sanitair water of voor een verwarmingscircuit [COGEN Vlaanderen, 2006].

Een volledige uiteenzetting van de thermodynamische processen valt buiten het bereik van deze studie maar onderstaande figuur verduidelijkt de potentiële voordelen van (micro)-warmtekrachtkoppeling. Hierbij is uitgegaan van een  $\mu$ WKK installatie met elektrische en thermische efficiëntie van respectievelijk 10 en 85 % en een conventionele elektriciteitscentrale met 55 % elektrisch rendement en een lokale verwarmingsketel met 90 % thermisch rendement.

---

<sup>4</sup> In thermodynamische termen wordt dit verduidelijkt door het begrip “exergie”.

Figuur 1: Vergelijking brandstofbenutting bij gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit en bij WKK



### 2.2 Overzicht technologieën voor $\mu$ WKK

De technologieën die qua elektrisch vermogensbereik eventueel in aanmerking kunnen komen voor residentiële toepassingen van  $\mu$ WKK kunnen als volgt worden ingedeeld:

- Zuigermotor met inwendige verbranding
- Stirlingmotoren
- Brandstofcellen
- Micro-turbines
- (O)RC of (Organic) Rankine Cycle systemen

#### 2.2.1 Zuigermotor met inwendige verbranding (ICE)

Bij ICE's of Internal Combustion Engines kunnen we een onderscheid maken obv de inwendige verbrandingscyclus: de Otto of de Diesel cyclus.

In een Ottomotor wordt een mengsel van lucht en brandstof samengeperst en wordt de verbranding ingezet door een vonk die extern wordt opgewekt.

In een Dieselmotor wordt alleen lucht samengeperst en ontsteekt de geïnjecteerde brandstof spontaan door de hoge temperatuur. Ottomotoren kunnen veel verschillende brandstoffen aan (benzine, aardgas, biogas, ...) terwijl Dieselmotoren zwaardere brandstoffen gebruiken (diesel, olie, ...).

De karakteristieken van de zuigermotor met inwendige verbranding worden in *Tabel 1* samengevat.



Tabel 1: Voornaamste kencijfers zuigermotor met inwendige verbranding (ICE)

Zuigermotor met inwendige verbranding (ICE)	
Elektrisch vermogen	1-50 000 kWe
Totale brandstofbenuttigingsgraad	60-95 %
Elektrisch rendement	20-40%
Kracht-warmte verhouding	0,35-2,4

Bronnen: [COGEN Vlaanderen, 2006], [Senternovem, 2005], [Honda, 2007], [Dentice d'Accadia et al., 2003]

De meest bekende producenten van ICEs voor  $\mu$ WKK-toepassing zijn Baxi-Senertec, EC Power, Frichs en Vaillant in Europa en vooral Honda in Japan [Carbon Trust, 2007].

De voordelen van ICE's ten opzichte van andere warmtekrachtkoppelingstechnologieën zijn o.a. een lage investeringskost<sup>5</sup>, betrouwbaarheid en eenvoud van onderhoud [Onovwiona et al., 2006]. Hoewel ICE's zo ongeveer de meest rijpe technologie zijn voor WKK, worden ze slechts zelden gebruikt voor residentiële toepassingen. Meerdere redenen worden in de literatuur aangehaald: regelmatig onderhoud, levensduur, gewicht, volume, geluidsniveau, enige draaitijd vereist alvorens warmte afgegeven wordt ... [Dentice d'Accadia et al., 2003] [Carbon Trust, 2007]. Bovendien is de elektrische output van de meeste commercieel beschikbare eenheden te hoog voor een ééngezinwoning: de kleinste eenheden zoals Senertec Dachs en Ecopower produceren nog steeds tot 4,5 kWe [Dentice d'Accadia et al., 2003] [De Paepe et al., 2005]. Ze kunnen wel toegepast worden in het geval van een gemeenschappelijke stookplaats voor meerdere woningen.

Figuur 2: Voorbeeld  $\mu$ WKK met ICE: Senertec Dachs (5,5 kWe, 12,5 kWth)



Bron: VITO Thermotechnisch labo

De uitzondering wat betreft toepasbaarheid van een kleinschalige ICE-WKK eenheid in ééngezinwoningen is de Ecowill van Honda: deze  $\mu$ WKK heeft een elektrische en thermische output van respectievelijk 1 kWe en 3,25 kWth en midden 2007 bedroegen de gecumuleerde verkoopcijfers 50 000 eenheden [Honda]. Deze units werden voornamelijk op de Japanse markt verkocht. Eén van de redenen dat deze eenheid in Japan en bijvoorbeeld niet in Europa toegepast wordt, is het feit dat de Ecowill door zijn geluidsniveau buitenshuis geïnstalleerd wordt en verwarmingssystemen buitenshuis zijn

<sup>5</sup> De Ecowill wordt niet verdeeld in Europa maar kost omgerekend tussen 6000 en 7000 €exclusief BTW.

geen uitzondering in Japan. Een variatie van de Ecowill wordt in de Verenigde Staten verkocht onder de naam Freewatt ([www.freewatt.com](http://www.freewatt.com)).

### 2.2.2 Stirlingmotoren

Stirling motoren zijn motoren die werken met externe verbranding die toelaat een groot aantal brandstofsoorten te gebruiken (vloeibaar, gasvormig, kolen e.a.). Hun werking is gebaseerd op de expansie en contractie van gassen bij verschillende temperaturen. Mogelijke configuraties van de cilinder(s) en zuigers hebben als gevolg dat Stirlingmotoren onderverdeeld kunnen worden in 3 groepen: alfa-, beta- en gamma-motoren. Op basis van de aandrijfmethode van Stirlings kan de onververdeling gebeuren in twee groepen: de kinematische aandrijving en de aandrijving met vrije zuiger.

Een volledige beschrijving van de werking van het Stirling principe en de verschillende varianten valt buiten het bestek van deze studie maar kan nagelezen worden in [COGEN Vlaanderen, 2006] of op de websites van fabrikanten van Stirling motoren.

Stirlingmotoren hebben een aantal voordelen ten opzichte van zuigermotoren met inwendige verbranding: lager geluidsniveau, hoge thermodynamische efficiëntie, weinig onderhoud door externe verbrandingsmotor, kleiner volume... [Carbon Trust, 2007]. Die eigenschappen maken de Stirlingmotoren heel geschikt voor  $\mu$ WKK-installaties voor residentiële toepassingen. Hun elektrische efficiëntie zou in theorie die van interne verbrandingsmotoren moeten benaderen maar ligt in de praktijk een stuk lager.

De karakteristieken van de kleinere Stirlingmotoren<sup>6</sup> worden samengevat in Tabel 2.

Tabel 2: Voornaamste kencijfers (kleine) Stirlingmotoren

(Kleine) Stirlingmotoren	
Elektrisch vermogen	<1- 70 kWe
Totale brandstofbenuttigingsgraad	60-95 %
Elektrisch rendement	5-20 %
Kracht-warmte verhouding	0,1-0,25

Bron: productinformatie fabrikanten en [Carbon Trust, 2007]

Van alle technologieën is de Stirling motor de meest waarschijnlijke om op relatief korte tijd commercieel door te breken. De enige fabrikant die eind 2008 een  $\mu$ WKK-eenheid met een Stirlingmotor gericht op ééngezinswoningen commercieel op de markt heeft, is WhisperGen<sup>7</sup>. Zij verkopen de Whispergen unit met vermogens van 1 kWe en ongeveer 7 kWth voor de Stirling aangevuld met een boost burner van 6 kWth. Het is een niet-modulerende eenheid die volgens de fabrikant bij voorkeur in combinatie met een buffervat van 200 tot 300 liter gebruikt wordt. De kostprijs inclusief de installatie maar exclusief BTW bedraagt momenteel 10 000 tot 12 000 €. De  $\mu$ WKK-eenheden werden tot heel recent in Nieuw-Zeeland geproduceerd maar begin 2008 werd een joint-venture opgericht met het Spaanse Mondragón. Vanaf het laatste kwartaal van 2008 waren de eerste Whispergen units in serie voorzien voor Europa. De serieproductie liep echter vertraging op en de eerste units worden verwacht tijdens de eerste helft van 2009. Een maximale productie rond 1 000 eenheden voor 2009 is voorzien. Op termijn zou de fabriek 30 000  $\mu$ WKKs per jaar moeten aankunnen. In België gebeurt de verdeling (net zoals in Nederland) momenteel door de Magicboiler Company

---

<sup>6</sup> Grotere Stirlingmotoren, met elektrische vermogens van bijvoorbeeld > 100 kWe, hebben grotere elektrische rendementen (tot 40 % en hoger) en een grotere kracht-warmte verhouding (0,8-1,7) [COGEN Vlaanderen, 2006].

<sup>7</sup> <http://www.whispergen.com>.

([www.magicboiler.com](http://www.magicboiler.com)). Ook de firma Electrotech ([www.electrotech.be](http://www.electrotech.be)) geeft op zijn website aan de Whispergen unit te verdelen hoewel momenteel niet duidelijk is of er ook daadwerkelijk verkocht worden. De Stirling is een  $\mu$ WKK met een kinematische zuiger en 4 cilinders (in tegenstelling tot de vrije zuiger Stirlings met 1 cilinder van sommige andere consortiums).

Verskillende andere grote fabrikanten (inclusief alle toonaangevende ketelfabrikanten) zijn momenteel bezig met de ontwikkeling van nieuwe verwarmingsketels gebaseerd op een Stirling motor en beschikken reeds over prototypes. Daarbij wordt vaak één soort Stirlingmotor als basis gebruikt waarbij de verschillende ketelfabrikanten van het consortium dan apart de integratie in een volledig ketel voor zich nemen en de bijbrander integreren. Timing van geschatte commercialisering voor die fabrikanten varieert van 2010 tot begin 2011 of later. Een overzicht van de verschillende consortiums met hun partners wordt hieronder gegeven.

De 2 belangrijkste consortiums zijn de volgende:

1. Microgen Stirling: wordt ontwikkeld door MEC (Microgen Engine Corporation<sup>8</sup>), een consortium van enkele investeerders en Europese ketelfabrikanten zoals Viessmann, Baxi, Vaillant, Remeha en Sunpower. Zoals aangegeven werkt elke fabrikant aan de integratie van de Stirling in een eigen ketel. Op de nationale micro-WKK dag in Nederland van 23/4/2008 werden de concrete plannen van sommige fabrikanten uit het consortium toegelicht:
  - a. Vaillant: in 2008 worden 50 prototypes en in 2009 100 prototypes voorzien voor uitgebreide testen. Commercialisering wordt voorzien vanaf 2011
  - b. Remeha: is al een tijdje bezig met uitgebreide veldtesten. In 2007 werden bijvoorbeeld 8 ketels gedurende een jaar in reële omstandigheden opgevolgd. Zij voorzien een geleidelijke commercialisering vanaf 2010.

Een andere partner in het consortium, Baxi, voorziet eerst een commerciële lancering in het Verenigd Koninkrijk en Nederland, en vervolgens in België (voorlopig planning eind 2009, begin 2010). Viessmann tenslotte stelt 2011 op als commerciële lanceringsdatum.

De Stirling van dit consortium is een vrije zuiger stirling motor (of FPSE, Free Piston Stirling Engine) met 1 cilinder.

2. Rinnai (Japan), Infinia Corporation, MTS (Merloni Thermosanitari, Italië), Enatec en BBT Thermotechnik (d.i. de thermotechnische subgroep van Bosch) vormen ook een consortium voor de ontwikkeling van een  $\mu$ WKK eenheid. Enatec is een samenwerkingsverband tussen Eneco Energie en ECN ([www.enatec.com](http://www.enatec.com)). MTS omvat o.a. de merken Ariston, Chaffoteaux & Maury, Elco, ... [Enatec, 2007]. Met de micro-WKK eenheid van dit consortium worden in de periode 2008-2009 uitgebreide veldtesten voorzien (200 eenheden in 2009). Nefit (onderdeel van Bosch) kondigde tijdens de nationale micro-wkk dag in Nederland de commercialisering aan vanaf 2011. Deze eenheid bevat net als bij Microgen een vrije zuiger Stirling motor.

Naast deze consortiums zijn ook nog andere bedrijven actief in onderzoek en ontwikkeling naar Stirlingmotoren en de integratie ervan in een  $\mu$ WKK eenheid bestemd voor residentiële toepassingen:

- Sunmachine ontwikkelde een  $\mu$ WKK op houtpellets. Het is een modulerende  $\mu$ WKK met een elektrisch vermogen tussen 1,5 en 3 kWe en een thermisch vermogen van 4,5 tot 10 kWth. De eerste eenheid werd in de loop van 2008 in België geïnstalleerd. Vanaf eind 2008 zouden nieuwe installaties moeten

---

<sup>8</sup> <http://www.microgen-engine.com/>.

volgen ([www.tibri.be](http://www.tibri.be), [www.sunmachine.de](http://www.sunmachine.de)) maar door enkele kinderziektes werden die leveringen tot nader order uitgesteld. Het elektrische vermogen ligt voor een ééngezinwoning vrij hoog, het thermische vermogen dan weer relatief laag hoewel dit door een buffervat van 1 000 liter opgevangen wordt. Voorzichtige schattingen van elektrische efficiënties zouden tussen 20 en 25 % liggen, terwijl het globale rendement ongeveer 90 % zou bedragen.

- Disenco (<http://www.disenco.com/>) ontwikkelt eveneens een micro-WKK gebaseerd op een Stirling motor. Hun eenheid levert tot 3 kWe en tot 15 kWth. Cijfers over elektrische efficiëntie zijn nog niet bekend, overall zou het rendement 90 % zijn.

Informatie omtrent de elektrische rendementen van de Stirlingprototypes van enkele producenten die specifiek op ééngezinwoningen mikken (Enatec, WhisperGen, Microgen, ...) wordt gezien de meeste units zich nog in de fase van prototypes bevinden behoorlijk afgeschermd. Bovendien is de beschikbare documentatie niet altijd even duidelijk met betrekking tot hoe de rendementen precies bepaald werden en zijn zelfs de definities van de begrippen elektrisch, thermisch en totaal rendement nog stof voor discussie. Algemeen mag aangenomen worden dat het elektrisch rendement van de Stirling motor voor de eenheden rond 1 kWe (zonder eventuele bijbrander) rond 12 tot 15 % ligt (in theorie zou 17,5 % gehaald kunnen worden). Het thermisch vermogen van de Stirling motor alleen volstaat niet om aan piekvraag naar verwarming te voldoen in een ééngezinwoning. Daarom plaatsen de fabrikanten van residentiële micro-WKKs een additionele (conventionele) piekbrander bij in de eenheid: die piekbrander (afhankelijk van de fabrikant met een range van 6 tot meer dan 23 kWth) wordt bij voorkeur zo weinig mogelijk ingeschakeld want de totale elektrische efficiëntie wordt bij inschakeling van deze piekbrander gereduceerd aangezien het elektrische vermogen geleverd wordt door de Stirling in combinatie met een basis thermisch vermogen terwijl de piekbrander enkel nog extra thermisch vermogen gaat toevoegen. Het bijschakelen van een thermisch buffervat kan de nood aan frequent inschakelen van piekbranders beperken. De relatief hoge thermische output van een Stirling motor in verhouding tot de elektrische output (1 kWe tov 4,5-7,5 kWth) maken dat deze technologie vooral geschikt is voor bestaande woningen (renovatie) die beperkt geïsoleerd zijn en waar de warmtevraag bijgevolg voldoende hoog ligt. Op die manier kan de Stirling voldoende uren draaien en elektriciteit genereren zonder het risico dat er sterk intermitterend gewerkt moet worden (d.i. voorsturend aan- en uitschakelen omdat de warmtevraag lager ligt dan de minimale thermische output van de Stirling). Een te lage warmtevraag leidt dus tot veel start en stops en, indien er relevante start-stopverliezen zijn, tot een lager elektrisch rendement. Buffering kan een oplossing voor al te veel start/stops zijn. Indien die start-stopverliezen beperkt zijn, beïnvloedt de geringe elektriciteitsproductie door het beperkt aantal draaiuren het economische plaatje echter zowiezo negatief. Een voldoende hoge warmtevraag maakt dat de Stirling een voldoende aantal draaiuren bereikt met meer elektriciteitsproductie en een beter economisch resultaat én rendement. Enige voorzichtigheid is daarbij geboden: een warmtevraag die dan weer te hoog ligt, maakt het frequent inschakelen van de piekbrander noodzakelijk wat dan weer leidt tot een lager elektrisch rendement. Veldtesten in het Verenigd Koninkrijk bevestigden dit fenomeen [Carbon Trust, 2007].

*Figuur 3: WhisperGen,  $\mu$ WKK met Stirlingmotor*



Bron: [Carbon Trust, 2007]

De kostprijs van een WhisperGen  $\mu$ WKK werd eerder al aangegeven. Alle andere eenheden (voor het overgrote deel nog prototypes ofwel units met groter elektrisch vermogen) zijn ofwel nog niet verkrijgbaar of enkel verkrijgbaar aan hogere kostprijzen, variërend van ruwweg 15 000 tot 35 000 € afhankelijk van het type en de fabrikant. De meeste fabricanten geven aan dat grootschaliger serieproductie deze kostprijzen tot realistischere waarden zou moeten kunnen terugbrengen waarbij de targetprijs, afhankelijk van de bron, 1 500 € meer dan een condensatieketel of 6 000 – 8 000 € per unit zou moeten bedragen. Bedoeling is dat via de elektriciteitsproductie de  $\mu$ WKK eenheden op ongeveer 5 tot 7 jaar terugverdiend kunnen worden ten opzichte van een condensatieketel.

Gezien deze technologie het dichtst bij commercialisering staat (of voor een deel al gecommmercialiseerd wordt), zal deze als basis gebruikt worden in de verdere studie met betrekking tot economische aspecten van  $\mu$ WKK voor residentiële toepassingen in België.

### 2.2.3 Brandstofcellen

In brandstofcellen worden waterstof en zuurstof via een elektrochemisch proces rechtstreeks omgezet in elektrische energie met water als bijproduct. De meest gebruikte onderverdeling van brandstofcellen is op basis van het elektrolyt. De verschillende soorten zijn dan [COGEN Vlaanderen, 2006], [Onovwiona, 2006]:

- AFC (Alkaline Fuel Cells): lage temperatuurcellen, 1-100 kWe.
- PEM (Polymer Electrolyte Membranes): lage temperatuurcellen, 1-250 kWe.
- DMFC (Direct Methanol Fuel Cells): lage temperatuurcellen, 1-7 kWe.
- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells): medium temperatuurcellen, tot 250 kWe.
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells): hoge temperatuurcellen, tot 1 MWe.
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cells): hoge temperatuurcellen, 1-300 kWe.

De temperatuuraanduiding in bovenstaand overzicht verwijst naar volgende indeling: < 150°C (lage temperaturen), 150-300°C (medium temperaturen) en > 600 °C (hoge temperaturen).

De voordelen van brandstofcel systemen voor  $\mu$ WKK zijn een laag geluidsvolume, lage onderhoudskosten en goed gedrag bij deellast. In het nadeel van brandstofcellen speelt dan weer de heel hoge investeringskost, de relatief korte levensduur en het feit dat er eerst waterstof gevormd moet worden door reforming, meestal van methaan of aardgas [Onovwiona et al., 2006].

In de literatuur lijken vooral de PEM en SOFC brandstofcellen in aanmerking te komen voor commercialisering voor residentiële toepassingen [COGEN Vlaanderen, 2006], [Onovwiona, 2006].

Er zijn heel wat bedrijven die actief zijn in onderzoek en ontwikkeling naar brandstofcellen in  $\mu$ WKK eenheden. Sommige onder hen zijn recent begonnen met concrete veldtesten. Bekende producenten van PEM gebaseerde fuel cell  $\mu$ WKK's zijn o.a. Vaillant, Baxi, Panasonic, Ebara Ballard, Toyota, Hydrogenics Corporation en UTC fuel cells [Onovwiona, 2006] [Harrison, 2008]... Anderen spitsen zich dan weer toe op SOFC gebaseerde  $\mu$ WKK's: Ceramic Fuel Cells Limited ([www.cfcl.com](http://www.cfcl.com)), Acumentrics ([www.acumentrics.com](http://www.acumentrics.com)), Hexis Limited ([www.hexis.com](http://www.hexis.com)), Ceres Power ([www.cerespower.com](http://www.cerespower.com)) ... De Galileo 1000 N is het prototype de  $\mu$ WKK eenheid van Hexis: de eenheid heeft een elektrisch vermogen van 1 kWe en een thermisch vermogen van 2,5 kWth. De elektrische efficiëntie zou momenteel ongeveer 25-30 % bedragen. Ook bij deze eenheid wordt dan een hulpbrander van ongeveer 20 kWth voorzien. Veldtesten van deze eenheid zijn voorzien vanaf eind 2008. De karakteristieke van het prototype van Baxi Innotech zijn gelijkaardig: 1,5 kWe, 3 kWth en een elektrische efficiëntie tot 32 %. Een additionele piekbrander modulerend tussen 3,5 en 15 kWth zou voor de volledige thermische energievraag moeten instaan. De elektrische efficiëntie van de huidige prototypes ligt nog een stuk lager dan wat in de praktijk haalbaar zou kunnen zijn: Ceramic Fuel Cells Limited meldde recent nog een elektrisch rendement van 50 % voor zijn SOFC brandstofcellen [CFCL, 2008].

*Figuur 4: Baxi  $\mu$ WKK eenheid met brandstofcellen*



Bron: Productinformatie fabrikant

$\mu$ WKK eenheden op basis van brandstofcellen zijn momenteel nog niet commercieel beschikbaar. In Japan worden al uitgebreide veldtesten gedaan: zo staan er momenteel meer dan 2000 eenheden opgesteld in het kader van een grootschalig demonstratieproject, de kostprijs<sup>9</sup> van elke eenheid is momenteel echter nog een veelvoud van de commerciële targetprijs [Nishizaki, 2008], [Omata, 2007].

---

<sup>9</sup> Duidelijke kostprijzen werden door de fabrikanten niet vrijgegeven. De eenheden in demonstratieprojecten in Japan krijgen steun in de grootorde van 30 000 \$ maar aangezien er momenteel nog geen markt is en de technologie nog niet rijp is, is het moeilijk een juiste prijs te bepalen.

Figuur 5:  $\mu$ WKK eenheid obv brandstofcellen (demonstratieproject Japan)



Bron: [Omata, 2007]

Tabel 3: Voornaamste kencijfers brandstofcellen

Brandstofcellen	
Elektrisch vermogen	1-1000 kWe
Totale brandstofbenuttigingsgraad	80-90 %
Elektrisch rendement	25-65 %
Kracht-warmte verhouding	0,8-2

Bron: [COGEN Vlaanderen, 2006], [Onovwiona, 2006], productinformatie

De kenmerken van de relevante brandstofcellen voor residentiële  $\mu$ WKK-toepassingen worden samengevat in Tabel 3

In vergelijking met Stirlingmotoren, ligt het elektrisch rendement een stuk hoger bij brandstofcellen. Het thermisch rendement ligt bijgevolg lager dan voorgaande technologieën wat betekent dat brandstofcellen verondersteld worden een toekomst te hebben voor toepassing in nieuwbouwwoningen met goede isolatie en relatief lage warmtevraag.

Zoals eerder aangegeven staan een aantal uitdagingen een commercialisering in de weg: een definitieve marktintroductie van brandstofcellen voor  $\mu$ WKK zal wellicht niet binnen de 5 jaar gebeuren maar wordt door sommige fabrikanten voorzichtig geschat op ten vroegste 2013.

#### 2.2.4 Micro-turbines

De micro-turbine werkt volgens dezelfde principes als de klassieke grote gasturbines maar dan op veel kleinere schaal. De elektrische vermogens die in de literatuur terug te vinden zijn, gaan van 25 tot 250 kWe en de elektrische efficiënties liggen in de range van 12 tot 33 %. Deze vermogens zijn dus duidelijk nog te groot om toepasbaar te kunnen zijn op residentieel niveau. De mogelijkheid van kleinere elektrische vermogens wordt nog onderzocht [Pilavachi, 2002]. Eén van de bedrijven die zich hierop toelagen is bijvoorbeeld Micro Turbine Technology (MTT, <http://www.mtt-eu.com/>).

Een uitgebreide beschrijving van de technische werking van een micro-turbine valt buiten het bestek van deze studie maar ten opzichte van de gasmotor kunnen de voordelen van de microturbine als volgt samengevat worden: slechts 1 warmtewisselaar (alle warmte is via de rookgassen beschikbaar), minder schadelijke emissies door het continue verbrandingsproces, lage onderhoudskosten door gering aantal bewegende onderdelen en brandstofflexibiliteit [COGEN Vlaanderen, 2006] [Onovwiona et al., 2006].

Micro-turbines zijn commercieel verkrijgbaar maar zoals eerder aangegeven zijn de elektrische vermogens te groot voor residentiële toepassingen.

*Figuur 6: Micro-turbine*



Bron: VITO thermotechnisch labo

*Tabel 4: voornaamste kencijfers micro-turbine*

Micro-turbine	
Elektrisch vermogen	25-250 kWe
Totale brandstofbenuttigingsgraad	60-80 %
Elektrisch rendement	12-33 %
Kracht-warmte verhouding	0,25-0,7

Bron: productinformatie fabrikanten, [COGEN Vlaanderen, 2006], [Biomass Technology Group, 2007], [Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2004]

### 2.2.5 (O)RC of (Organic) Rankine Cycle systemen

Net zoals de Stirling motor gaat het hier om een externe verbrandingsmotor. De Rankine cyclus verwijst naar de werking van een klassieke stoomturbine (voor een beschrijving van de werking van (varianten van) de Rankine cyclus, zie [COGEN Vlaanderen, 2006]). ORC-installaties zijn een variant op de klassieke stoomturbines. In plaats van water gaat men organische vloeistoffen met lage verdampingstemperaturen gebruiken als arbeidsmedium waardoor de warmterecuperatie en prestaties van het systeem verbeterd worden.



Deze  $\mu$ WKK technologie is na de Stirling motor en voor de brandstofcelgebaseerde  $\mu$ WKK's wellicht de eerstvolgende die op grote schaal gecommmercialiseerd kan worden. Op dit moment verdeelt OTAG ([www.otag.de](http://www.otag.de)) reeds de Lion Powerblock, een  $\mu$ WKK eenheid met een Rankine cyclus. Van deze  $\mu$ WKK zijn er in België op het moment van schrijven van deze studie 2 eenheden aanwezig in België<sup>10</sup>. Het elektrische vermogen moduleert tussen 0,3 en 2 kWe en het thermisch vermogen tussen 3 en 16 kWth. De grootte ordes liggen dus nog iets hoger dan bij de Stirling motoren, vandaar dat deze  $\mu$ WKK's in eerste instantie toepasbaar lijken voor hele grote woningen (bijvoorbeeld inclusief zwembad) of twee- of driewoonsten waarbij ook een (groter<sup>11</sup>) buffervat zeker noodzakelijk lijkt om enigszins te voldoen aan de warmtebehoefte. De kostprijs van een volledige installatie inclusief buffervat en exclusief BTW bedraagt eind 2008 ongeveer 18 000 €.

Ander fabrikanten zitten nog in het stadium onderzoek, ontwikkeling en testen van prototypes, zoals Cogen Micro (<http://www.cogenmicro.com/>) met een Rankine cyclus gebaseerde  $\mu$ WKK eenheid en de Energetix Genlec (<http://www.energetixgroup.com>) die een ORC  $\mu$ WKK ontwikkelen en officieel met de verdeling zouden starten eind 2008, begin 2009. Ook Daalderop ontwikkelt momenteel een modulerende ORC  $\mu$ WKK met een elektrisch vermogen van 0,8 tot 1 kWe en thermisch vermogen van 14 kWth die wellicht gecombineerd zal moeten worden met een buffervat. Vanaf eind 2008, begin 2009 worden veldtesten voorzien.

In de literatuur zijn verschillende voor- en nadelen terug te vinden van ORC  $\mu$ WKK's ten opzicht van gewone RC  $\mu$ WKK's: de organische vloeistof is over het algemeen duurder en kan gevaarlijk zijn terwijl de thermische stabiliteit van sommigen ervan beperkt zou zijn [COGEN Vlaanderen, 2006].

De voornaamste kenmerken van ORC worden samengevat in Tabel 5.

Tabel 5: Voornaamste kencijfers Organic Rankine Cycle (ORC)

<b>(Organic) Rankine Cycle</b>	
Elektrisch vermogen	0,3-10 000 kWe
Totale brandstofbenuttigingsgraad	60-94%
Elektrisch rendement	3-30 %
Kracht-warmte verhouding	0,1-0,4

Bron: [COGEN Vlaanderen, 2006], productinformatie fabrikanten

<sup>10</sup> Firma Demeulenaere uit Lichtervelde (<http://www.warmtekrachtkoppeling.com/overzicht/>) en VITO.

<sup>11</sup> 600 tot 1000 l.

Figuur 7: Rankine  $\mu$ WKK: de Lion Powerblock (OTAG)



Bron: VITO thermotechnisch labo, productinformatie fabrikant

### 2.3 Conclusies technologieën $\mu$ WKK

Op basis van het overzicht in de vorige sectie kunnen een aantal besluiten met betrekking tot toekomstige commercialisering van  $\mu$ WKK voor residentiële toepassingen getrokken worden:

- Micro-WKK's gebaseerd op de Stirlingmotor met een bijbrander, al dan niet gecombineerd met buffervat, worden door 1 fabrikant reeds gecommmercialiseerd, weliswaar aan een relatief hoge prijs (ca. 10 000-12 000 €) in vergelijking met een conventionele verwarmingsketel. Typische elektrische efficiëntie (zonder piekbrander) ligt rond 12-15 %. Het totaal rendement zou vergelijkbaar zijn met een condensatieketel. Typische vermogens voor de Stirling liggen rond 1 kWe en 4,5 tot 7,5 kWth. De piekbranders die bijgeplaatst worden lopen van 6 tot 23 kWth. Sommige eenheden zijn binnen bepaalde grenzen modulerend, anderen dan weer niet. Een heel aantal bekende ketelfabrikanten is volop bezig met onderzoek, ontwikkeling en testen van Stirling-gebaseerde  $\mu$ WKK's. Technische informatie met betrekking tot die prototypes is maar heel beperkt voor handen en ook prijsinformatie wordt nog afgeschermd (schattingen van kostprijzen van prototypes lopen bij benadering van 15 000 tot 35 000 €). Een geleidelijk aan opbouwende commercialisering wordt, afhankelijk van de verschillende fabrikanten, voorzien vanaf 2010 gaande tot 2011 en later. De target markt voor deze technologie is gezien de lage kracht-warmte verhouding de renovatiemarkt: grote woningen die minder goed geïsoleerd zijn en dus een voldoende hoge warmtevraag hebben. Hoewel Stirlingmotoren in theorie met een grote verscheidenheid aan brandstoffen overweg kunnen, spitsen de fabrikanten zich voornamelijk toe op aardgas (de uitzondering is bijvoorbeeld de Sunmachine die op pellets werkt, hoewel ook daar een versie op aardgas zal uitgebracht worden).
- Na de Stirling motoren lijken de  $\mu$ WKK's gebaseerd op de Rankine cyclus het dichtst bij de doorbraak. OTAG verdeelt reeds zijn Lion Powerblock: een modulerende  $\mu$ WKK eenheid met elektrisch vermogen tussen 0,2 en 2 kWe en een thermisch vermogen van 3 tot 16 kWth. Elektrische efficiëntie werden nog niet bevestigd maar zouden ongeveer 11 % bedragen, het totaalrendement zou vergelijkbaar zijn met een condensatieketel. Naast OTAG zijn verschillende andere fabrikanten (Daalderop, Energetix Group, Cogen Micro) momenteel bezig met de ontwikkeling van RC of ORC gebaseerde  $\mu$ WKK's.

- Interne verbrandingsmotoren vormen de meest mature technologie maar de meeste motoren hebben een te hoog elektrisch vermogen (5 kWe en meer) om toepasbaar te zijn in ééngezinswoningen. Enkel de Japanse Ecowill kent een grootte orde van 1 kWe (thermisch 2,8 kWth) maar interne verbrandingsmotoren kennen enkele intrinsieke beperkingen die toepassing binnenshuis bemoeilijken: het geluidsniveau ligt relatief hoog, gewicht en volume zijn relatief groot en enige opstarttijd is nodig alvorens warmte afgegeven wordt..
- Micro-turbines zijn reeds commercieel beschikbaar maar de elektrische vermogens starten vanaf 25 kWe en zijn veel te hoog voor residentiële toepassingen.
- Brandstofcellen zijn wellicht niet binnen 5 jaar op commerciële schaal te verwachten. Verschillende fabrikanten (Baxi, Hexis, Ceres, Vaillant ...) zijn al geruime tijd met onderzoek en ontwikkeling bezig en prototypes worden al getest in laboratoria. In Japan worden  $\mu$ WKK eenheden reeds in veldtesten opgevolgd. Voornaamste moeilijkheden zijn momenteel de (heel) hoge kostprijs en de beperkte levensduur van dergelijke units. Elektrische efficiënties (25-50 % in de praktijk) liggen een stuk hoger dan bij Stirling motoren of Rankine gebaseerde  $\mu$ WKK's. De thermische efficiëntie ligt bijgevolg lager dan voorgaande technologieën wat betekent dat brandstofcellen verondersteld worden een toekomst te hebben voor toepassing in nieuwbouwwoningen met goede isolatie en relatief lage warmtevraag.

## HOOFDSTUK 3 MARKTONTWIKKELING EN POTENTIEEL

---

In dit hoofdstuk wordt een eerste inschatting gemaakt van het potentieel van  $\mu$ WKK voor Vlaanderen.

Daarbij werd volgende redenering gevolgd:

1. **Vertrekpunt is de technologie of technologieën die het dichtst bij commercialisering staan en die binnen het jaar technisch toegepast zou kunnen worden in de praktijk. Technologieën die nog niet rijp genoeg zijn en dus nog te veel aan verandering onderhevig zijn door bijkomend onderzoek en ontwikkeling, worden even buiten beschouwing gelaten. Dit om te vermijden dat het resultaat van dit hoofdstuk alle huishoudens als potentiële gebruikers van  $\mu$ WKK aanduidt. De scope beperkt zich met andere woorden tot enige jaren tot maximaal 5 jaar.**
2. Voor de meest mature technologie wordt, op basis van de voorwaarden voor toepassing ervan, gekeken naar het bestaande woningpark in Vlaanderen met de specifieke warmtebehoefte die daarbij verondersteld kan worden. Er wordt met andere woorden ervan uitgegaan dat de vraagzijde het marktpotentieel bepaalt.
3. Het voorgaande punt wordt nog eens afgetoetst met gegevens rond residentieel aardgasverbruik die door de twee grootste distributienetbeheerders van Vlaanderen bezorgd werden en die een goed inzicht geven in het marktpotentieel.
4. Tot slot worden de algemene marktomstandigheden beschreven, d.i. de huidige verwarmingsmarkt in België met zijn specifieke kenmerken.

### 3.1 $\mu$ WKK technologie

Uit de analyse van de verschillende  $\mu$ WKK-technologieën in het vorige hoofdstuk bleek reeds dat  $\mu$ WKK's met een Stirlingmotor (en een piekbrander) het dichtst bij grootschalige commercialisering staan: de Whispergen wordt zelfs reeds commercieel verkocht, zij het aan een relatief hoge prijs ten opzichte van condensatieketels. De rest van deze studie zal in eerste instantie gefocust zijn op het potentieel, karakteristieken en doelgroep van een  $\mu$ WKK-eenheid gebaseerd op Stirlingmotoren. Meerdere redenen kunnen hiervoor aangehaald worden waar van de twee belangrijkste de volgende zijn:

1. Beschouwde termijn: voor het voldoen aan de energievraag van huishoudens (elektriciteit en warmte) liggen op lange termijn heel veel opties open qua technologiekeuze (warmtepomp, district- of groepsverwarming, zonneboilers,  $\mu$ WKK, ...). De scope van de studie is om, uitgaande van de bestaande marktomstandigheden, een zicht te krijgen op de toepassing en haalbaarheid van  $\mu$ WKK in Vlaanderen op relatief korte termijn (aantal jaar).
2. Scope en beheersbaarheid: voor elke bestaande  $\mu$ WKK technologie zou een aparte haalbaarheidsanalyse gedaan kunnen worden door de diversiteit aan technische karakteristieken. Voor huishoudens is de Stirlingmotor de meest waarschijnlijke technologie voor doorbraak op korte termijn. Andere technologieën zijn om diverse redenen ofwel minder geschikt voor residentieel

toepassingen (ICE's, micro-turbine) of zijn nog niet commercialiseerbaar op korte termijn (brandstofcellen, (organic) Rankine  $\mu$ WKK). Die laatste technologieën worden gekenmerkt door andere rendementen/efficiënties, zijn in sommige gevallen ook meer geschikt voor een andere targetmarkt en zijn bovendien nog te zeer in een ontwikkelfase en aldus nog sterk aan verandering onderhevig, waardoor de studie van te veel onzekere veronderstellingen zou moeten uitgaan om praktisch toepasbaar te zijn.

Micro-WKK eenheden gebaseerd op de Stirlingmotor en een ingebouwde piekbrander kennen typisch een lage kracht-warmteverhouding: het elektrisch rendement<sup>12</sup> van de Stirling ligt bij de meeste fabrikanten rond 12 tot 15 %, het totale rendement is vergelijkbaar met een condenserende verwarmingsketel (in theorie alnaargelang toepassing voor sanitair warm water en/of ruimteverwarming tussen 95 en meer dan 105 %).

De lage kracht-warmteverhouding van de Stirlingmotoren die momenteel ontwikkeld worden én het feit dat start-stopverliezen (een Stirling genereert niet ogenblikkelijk zijn maximale hoeveelheid elektriciteit) zoveel mogelijk beperkt moeten worden, heeft ertoe geleid dat Stirling-gebaseerde micro-WKK's voornamelijk geschikt zijn voor woningen met een voldoende grote warmtevraag. Op die manier kan de  $\mu$ WKK-eenheid voldoende uren draaien om een relevante hoeveelheid elektriciteit op jaarbasis op te wekken. Het is namelijk de lokale elektriciteitsproductie die leidt tot CO<sub>2</sub>- en energiebesparing, én tegelijk zorgt voor een rendabele installatie gezien de veel hogere prijs voor elektriciteit dan voor aardgas.

Om in eerste instantie een globaal zicht te krijgen op de target markt waarop  $\mu$ WKK-fabrikanten zich gaan richten, werd in een kleine rondvraag bij de fabrikanten gepolst naar de "ideale" woningen voor micro-WKK op basis van een Stirling. Volgende vuistregels werden daarin o.a. naar voren gebracht:

- Renovatiewoningen, geen nieuwbouw
- een bewoonbare en verwarmde oppervlakte van meer dan 110 m<sup>2</sup>
- een huidig referentiegasverbruik tussen 18 000 en 30 000 kWh<sup>13</sup>

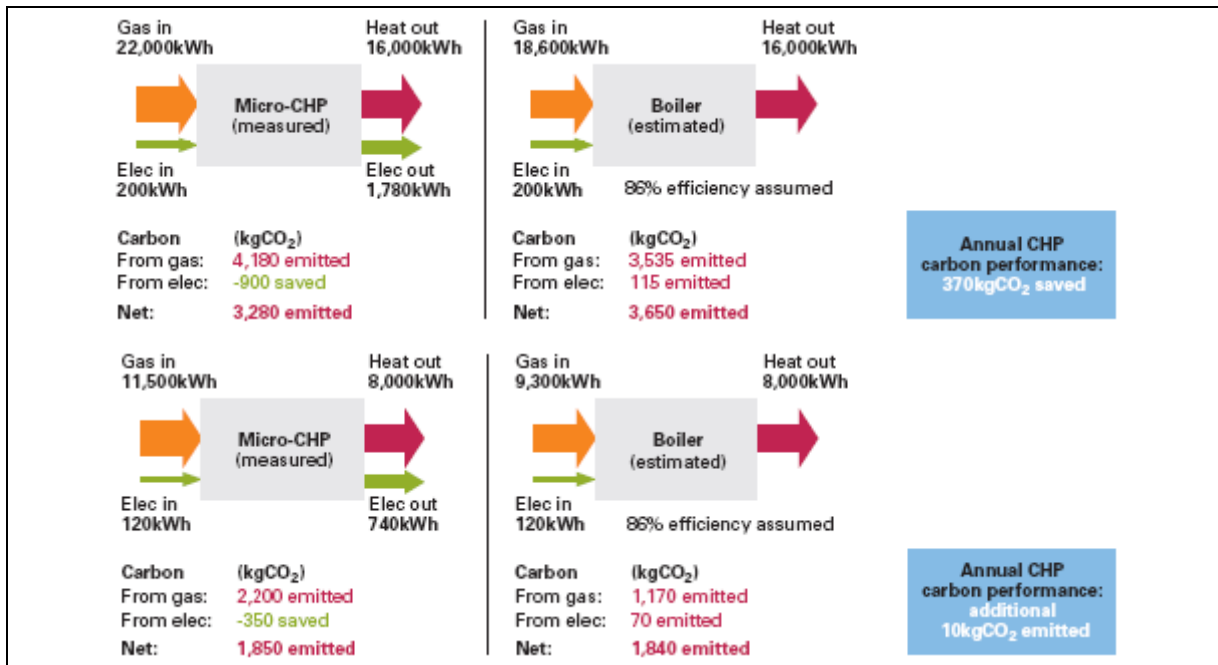
Kleinere woningen maar met bijvoorbeeld een relatief groot aantal bewoners (4-5) waardoor er toch voldoende warmtevraag is, kunnen ook in aanmerking komen. Bovenstaande opmerkingen werden min of meer bevestigd in de Carbon Trust field trials in het Verenigd Koninkrijk waaruit blijkt dat bij voorkeur de jaarlijkse warmtevraag meer dan 20 000 kWh bedraagt. Dat komt (in het Verenigd Koninkrijk) overeen met woningen met een oppervlakte groter dan 110 m<sup>2</sup> of gebouwd voor 1920. Daarnaast heeft ook het al dan niet rechtlijnige karakter van die warmtevraag een invloed op de mogelijke toepassing van  $\mu$ WKK [Carbon Trust, 2007]. In Figuur 8 wordt verduidelijkt aan de hand van gemeten praktijkgeval tijdens de veldtesten van Carbon Trust hoe een  $\mu$ WKK in een geschikte omgeving (met voldoende warmtevraag) en een minder geschikte omgeving (te weinig warmtevraag) de CO<sub>2</sub> uitstoot kan verminderen of verhogen. Voor de uitstoot van CO<sub>2</sub> door het verbranden van gas wordt in dit voorbeeld 0,19 kg/kWh en voor centraal geproduceerde elektriciteit 0,57 kg/kWh aangenomen.

<sup>12</sup> Zoals eerder aangegeven is de definitie van dit begrip nog voor discussie vatbaar en dienen cijfers die in de wandelgangen van de sector circuleren steeds met de nodige omzichtigheid behandeld te worden.

<sup>13</sup> Sommige fabrikanten geven dergelijke indicaties in m<sup>3</sup> wat gezien de variabele energieinhoud van aardgas (hoogwaardig of laagwaardig) een verschil kan geven wanneer dit uitgedrukt wordt in kWh. 1500 à 1600 m<sup>3</sup> lijkt in ieder geval de absolute benedengrens te zijn voor  $\mu$ WKK's op basis van een Stirling motor. Met referentiegasverbruik wordt het verbruik bedoeld mocht een condenserende gasketel gebruikt worden. Uitgaande van een globaal rendement van 90 % komt dit neer op een warmtevraag van 16 200 tot 27 000 kWh. Jaarlijkse globale rendementen van verwarmingssystemen zijn echter niet gegarandeerd 90 %. Oudere installaties zullen lagere rendementen hebben waardoor de warmtevraag op basis van aardgasverbruik overschat kan worden.

In de sensitiviteitsanalyse van het volgende hoofdstuk wordt op bovenstaande nog verder ingegaan en zal ook blijken dat bij een lagere warmtevraag en dus lagere elektriciteitsproductie ook de economische rendabiliteit beïnvloed wordt.

Figuur 8: Voorbeeld hoe een  $\mu$ WKK CO<sub>2</sub> uitstoot kan verminderen of verhogen



Bron: [Carbon Trust, 2007]

### 3.2 Woningpark in Vlaanderen

Vorige sectie gaf reeds aan dat  $\mu$ WKK met Stirlings bij voorkeur toegepast wordt in bestaande woningen of voldoende grote woningen zodat de warmtevraag voldoende groot is en er dus een relevante hoeveelheid elektriciteit opgewekt kan worden om ten volle te genieten van de voordelen van cogeneratie.

In deze sectie wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste kenmerken van het woningpark in Vlaanderen met betrekking tot de eventuele toepassing van  $\mu$ WKK. Het gaat hierbij om:

- Bouwjaar woning
- Type woning (appartement, gesloten bebouwing, halfopen bebouwing, open bebouwing)
- Type verwarming (decentraal/centraal en brandstof)

Enige omzichtigheid bij de interpretatie van de gegevens is geboden: bij sommige bronnen was het niet altijd duidelijk of het om een woongebouw ging (d.i. bijvoorbeeld een huis met één inwonende familie of een appartementsblok met verschillende appartementen) dan wel om een wooneenheid (d.i. bijvoorbeeld een appartement dat deel uitmaakt van een volledige appartementsblok).

#### 3.2.1 Type woning

Een eerste inzicht in de verdeling volgens type wooneenheid is terug te vinden op de website van de federale overheid met ECODATA.

Tabel 6: Verdeling type woningen in Vlaanderen volgens ECODATA 2007

Type bebouwing	Percentage Vlaanderen	Aantallen Vlaanderen
Alleenstaand	29,6 %	850 783
Half open	18,8 %	539 549
Rijwoning	24 %	690 044
Appartement/studio/...	21 %	601 597
Andere/onbekend	6,6 %	186 388
Totaal	100	2 868 361

Bron: [http://ecodata.mineco.fgov.be/Nl/begin\\_nl.htm](http://ecodata.mineco.fgov.be/Nl/begin_nl.htm)

Een relatief groot aantal andere en onbekende woningen is in bovenstaande tabel aanwezig. Op basis van de socio-economische enquête van NIS in 2001 werd een heel gedetailleerd en betrouwbaar beeld gegeven van de toenmalige samenstelling van het woningpark in Vlaanderen. De NIS gegevens van 2001 gaven volgende verdeling aan [FOD Economie, 2008] voor Vlaanderen (België):

Tabel 7: Verdeling type woningen in Vlaanderen volgens NIS 2001

Type bebouwing	Percentage Vlaanderen	Percentage België	Aantallen Vlaanderen
Alleenstaand	36,1	32,3	986 863
Half open	20,4	18	557 673
Rijwoning	22,6	24,5	617 814
Appartement/studio/...	20	24,1	546 738
Andere/onbekend	0,9	1,1	24 603
Totaal	100	100	2 733 691

Bron: [FOD Economie, 2008]

Aangenomen kan worden dat over het algemeen alleenstaande en half open bebouwingen een grotere warmtevraag zullen hebben dan rijwoningen en appartementen en dus geschikter zijn voor toepassing van  $\mu$ WKK. De ouderdom van de woning (wat een indicatie kan zijn voor de mate van isolatie) en het type verwarming speelt echter ook een rol.

De bewoonbare oppervlakte van de woningen in Vlaanderen bedraagt in ongeveer 43 % van de gevallen meer dan 150 m<sup>2</sup>, voor heel België is dit tussen 38 en 39 % gezien de kleinere woningen in Brussel en Wallonië [Bartiaux et al., 2005].

### 3.2.2 Bouwjaar woning

De gemiddelde leeftijd van het woningpark in België (en Vlaanderen) is relatief hoog [BRG Consult, 2008]. In Figuur 9 wordt een overzicht gegeven voor de EU landen. Oudere woningen zijn over het algemeen minder goed geïsoleerd en het is daarbij niet altijd mogelijk (vb. in het geval van volle muren) om bij renovatiewerken na te isoleren. Pas bij de eerste oliecrisis in de jaren '70 liet het belang van goede isolatie zich voelen. Aangenomen kan dus worden dat voornamelijk de woningen vóór deze tijd (1970) en waar na-isolatie niet of moeilijk kan gebeuren het meest geschikt zijn voor  $\mu$ WKK op basis van de huidige technologie. Voor België gaat dit, alnaargelang de bron over 50 tot 60 % van het gebouwenpark [BRG Consult, 2008] [National Board of Housing Sweden et al., 2005]. Voor Vlaanderen zou dat op 55 à 60 % komen (zie ook volgende sectie). Ter vergelijking: in Nederland en vele andere Europese landen bedraagt het aandeel woningen met bouwjaar voor 1970 maximaal 50 %.

De meest recente gegevens van het kadaster [ECODATA, 2008] geven voor Vlaanderen

1 506 296 gebouwen aan met bouwjaar vóór 1970 ofwel bijna 60 % van het gebouwenpark.

Figuur 9: Leeftijd woningpark EU

	Year	<1919	1919–1945	1946–1970	1971–1980	1981–1990	>1990
Austria	2003	18,6	8,1	27,4	15,9	12,4	17,6
Belgium <sup>2)</sup>	2004	15,0	16,5	29,0	15,2	9,2	15,1
Cyprus <sup>3)(4)</sup>	2001	na	7,4	16,9	20,7	27,4	27,1
Czech Republic <sup>5)(2)</sup>	2001	10,9	14,7	26,3	22,5	16,4	8,2
Denmark <sup>7)</sup>	2003	20,2	16,9	28,3	17,6	9,7	7,4
Estonia	2003	9,4	14,2	30,0	21,5	19,6	5,3
Finland <sup>8)</sup>	2002	1,6	8,8	30,6	23,4	20,0	14,4
France <sup>9)</sup>	2002	19,9	13,3	18,0	26,0	10,4	12,4
Germany <sup>4)</sup>	2002	14,6	12,6	47,2	10,9	14,6	na
Greece <sup>1)</sup>	2001	3,1	7,2	31,8	24,5	19,1	14,3
Hungary <sup>14)</sup>	2001	13,9	12,5	26,1	22,3	17,7	7,4
Ireland	2002	9,7	8,2	16,4	17,5	16,2	31,9
Italy	1991	19,0	10,5	40,7	19,7	10,1 <sup>11)</sup>	na
Latvia	2002	11,0	13,8	27,7	22,6	21,1	3,7
Lithuania	2002	6,2	23,3	33,1	17,6	13,5	6,3
Luxembourg <sup>2)</sup>	2001	11,9	14,8	27,0	14,9	11,6	17,1
Malta <sup>15)</sup>	2002	14,9	11,0	29,4	16,9	15,8	11,8
Netherlands	2002	7,1	13,2	30,9	18,9	29,8 <sup>11)</sup>	na
Poland <sup>12)</sup>	2002	10,1	13,1	26,9	18,3	18,7	12,9
Portugal	2001	5,9	8,5	22,9	18,3	44,4 <sup>11)</sup>	na
Slovak Republic <sup>6)(2)</sup>	2001	3,4	6,6	35,1	25,6	21,0	6,8
Slovenia <sup>7)</sup>	2002	15,3	7,9	28,1	23,6	16,2	8,7
Spain <sup>1)</sup>	2001	8,9	4,2	33,5	24,1	13,6	15,7
Sweden <sup>10)</sup>	2003	12,4	20,2	33,1	17,4	9,7	7,2
United Kingdom <sup>13)</sup>	2001	20,8	17,7	21,2	21,8	18,5 <sup>11)</sup>	na

Dwellings classified by the period which the construction of the building containing them was completed.

1 1981 and later  
 2 Estimate  
 3 <1915, 1915–1948, 1949–1967, 1968–1981, 1982–1989, >1989  
 4 <1919, 1919–1948, 1949–1978, 1979–1986, >1986  
 5 2001 Housing Census, conventional dwellings  
 6 Percent of occupied dwellings instead of total dwelling stock  
 7 Data includes holiday dwellings  
 8 Difference of percentage totals from 100% due to dwellings with unknown built dates  
 9 Main residences only  
 10 <1922, 1921–1950, 1951–1970  
 11 <1919, 1919–1944, 1945–1964, 1965–1980, >1980  
 12 <1918, 1918–1944, 1945–1970, 1971–1978, 1979–1988, >1988  
 13 Permanently occupied dwellings only, Population and Housing Census 1.3.2001, <1920, 1920–1945  
 14 <1919, 1919–1944, 1945–1969, 1970–1979, 1980–1989, >1989  
 15 <1920, 1921–1950, 1951–1976, 1977–1985, 1986–1990, >1990  
 16 <1945 covers conventional dwellings  
 17 <1919, 1919–1944, 1945–1969, 1970–1979, 1980–1989, >1989

Source: National statistical institutes

Bron: [National Board of Housing Sweden et al., 2005]

### 3.2.3 Type verwarming

Het specifieke verwarmingssysteem waarmee een woning verwarmd wordt is cruciaal voor eventuele toepassing van  $\mu$ WKK op relatief korte termijn: een centrale verwarming op aardgas is de snelst bereikbare doelgroep van de  $\mu$ WKK's met een Stirlingmotor die momenteel ontwikkeld worden.

Gegevens omtrent de manier van verwarmen in Vlaanderen (en bij uitbreiding België) lagen niet voor de hand. De informatie die in deze sectie gebruikt werd, is gebaseerd op de meest recente gegevens over het gebouwenpark in Vlaanderen die verzameld werden in een databank in het kader van een "Socio-economische enquête van 2001" uitgevoerd door het NIS. De (verplichte) enquête werd door 96,71 % van de bevolking beantwoord, waarbij bovendien een aantal vragen niet volledig beantwoord werden.



Om voor heel Vlaanderen te gelden, werden enkele bewerkingen en extrapolaties uitgevoerd waarvoor de methode beschreven is in [Duerinck et al., 2006].

De statistieken van het Vlaamse gebouwenpark, opgesplitst volgens het type brandstof voor verwarming zijn terug te vinden in BIJLAGE A (centrale verwarmingssystemen, decentrale verwarmingssystemen en totaalcijfers voor Vlaanderen).

Volgende voornaamste conclusies kunnen daaruit getrokken worden:

- Respectievelijk 47,5 %, 39 % en 8,5 % van het gebouwenpark wordt verwarmd met aardgas, stookolie en elektriciteit. Andere types brandstof (LPG, hout en steenkool) vertegenwoordigen amper 5 % van het totale volume.
- Bijna 75 % van de gebouwen heeft een centraal verwarmingssysteem.
- Bijna 36 % van het gebouwenpark wordt verwarmd met een centrale verwarming op aardgas (856 805 woningen), terwijl 34 % (818 792 woningen) een centrale verwarming op stookolie kent.
- Half open en open bebouwingen met centrale verwarming op aardgas en een bouwjaar vóór 1990 vertegenwoordigen ongeveer 12 % van het gebouwenpark (284 919 woningen).
- Half open en open bebouwingen met centrale verwarming op aardgas en een bouwjaar vóór 1970 vertegenwoordigen ongeveer 6,5 % van het gebouwenpark (157 209 woningen). Deze woningen vormen wellicht de beste categorie (hoge warmtevraag, beperktere isolatie) voor de onmiddellijke installatie van micro-wkk.
- Het totaal aantal niet-appartementswoningen met een verwarming (decentraal of centraal) op aardgas bedraagt 842 712 woningen of 35 % van het totale gebouwenpark.
- Het totaal aantal half open en open bebouwingen met verwarming (decentraal of centraal) op aardgas bedraagt 465 845 woningen of 19,4 % van het totale gebouwenpark.

Gezien bij renovatie vaak teruggegrepen wordt naar centrale verwarming op aardgas zijn bovenstaande cijfers uit 2001 met betrekking tot die categorie wellicht een onderschatting van de huidige situatie.

### 3.3 Huidig verbruik aardgas Vlaamse huishoudens

Voorgaande secties geven al een idee van het marktpotentieel voor  $\mu$ WKK in Vlaanderen.

Cruciaal voor de rendabiliteit van  $\mu$ WKK in een ééngezinwoning met het oog op energie- (en dus ook geld-)besparing en reductie van CO<sub>2</sub> uitstoot is dat de warmtevraag van de woning voldoende hoog ligt (zie ook sensitiviteitsanalyse verder in deze studie). Met dit gegeven in het achterhoofd werden anonieme verbruikersgegevens van residentiële afnemers met een verbruik groter dan 20 000 kWh opgevraagd bij de twee grootste distributienetbeheerders in Vlaanderen die samen om en bij de 85 % van de energie leveren in Vlaanderen.

De bekomen gegevens werden dan geëxtrapoléerd voor heel Vlaanderen<sup>14</sup>. Bij het interpreteren van de onderstaande cijfergegevens dient de nodige omzichtigheid in acht genomen te worden omwille van volgende redenen:

- De absolute verbruiksgegevens geven geen indicatie over de manier van verwarmen (centraal versus decentraal).

---

<sup>14</sup> Deze methode is een hulpmiddel om een globaler zicht te krijgen maar niet feilloos: sommige kleinere DNB's zoals DNB BA hebben als afnemer vnl grote bedrijven waar  $\mu$ WKK niet van toepassing is, althans niet binnen de scope van deze studie.

- Absolute verbruiksgegevens geven ook geen indicatie over de kwaliteit van de huidige verwarmingsinstallatie: een heel oude verwarmingsketel die nu een verbruik van 21 000 kWh tot gevolg heeft maar een heel slecht rendement heeft, betekent niet noodzakelijk dat die specifieke woning geschikt is voor  $\mu$ WKK.
- De verbruiksgegevens zijn beschikbaar per EAN-code: eventuele verdere uitsplitsing naar verschillende (soorten) afnemers achter de aansluiting komen hier niet tot uiting.

De basisselectie op de aangeleverde verbruiksgegevens gebeurde als volgt:

1. Selectie van alle verbruiksgegevens tussen 20 000 kWh en 40 000 kWh per DNB
2. Berekening gemiddelde verbruik van die subset per DNB
3. Berekening gemiddelde verbruik van totale subset voor beide DNB's op basis van hun respectievelijke aandelen in de totale subset
4. Extrapolatie naar heel Vlaanderen van het aantal verbruikers die op basis van verbruiksgegevens in aanmerking komen voor  $\mu$ WKK

Het resultaat van bovenstaande denkoefening was een totaal marktpotentieel van 572 436 afnemers met een gemiddeld verbruik van 26 371 kWh. Wanneer daar de algemene verhoudingscoëfficiënt (centrale verwarming op aardgas/totaal verwarming op aardgas) van 0,75 uit voorgaande sectie toegepast wordt<sup>15</sup>, bekomt men 429 327 afnemers.

Wanneer dezelfde redenering nogmaals gevolgd wordt maar dit keer op een selectie op de verbruiksgegevens tussen 20 000 kWh en 30 000 kWh, dan bedraagt het totale marktpotentieel 427 108 afnemers met een gemiddeld verbruik van 23 872 kWh. Wanneer op dit resultaat de algemene verhoudingscoëfficiënt (centrale verwarming op aardgas/totaal verwarming op aardgas) van 0,75 uit voorgaande sectie toegepast wordt, bekomt men 320 331 afnemers.

Wanneer de uitersten van deze resultaten in beschouwing genomen worden, zou met toepassing van enige marge bij benadering tussen 21 en 42 % van de huidige huishoudelijke gasaansluitingen op basis van het verbruik in aanmerking komen voor toepassing van  $\mu$ WKK op basis van de Stirling technologie (300 000-600 000 huishoudens).

Tot slot dient nog eens benadrukt te worden dat het huidige aardgasverbruik maar tot een benaderende schatting kan leiden voor de warmtevraag van een woning. Afnemers met een huidig verbruik van 40 000 kWh lijken op het eerste zicht totaal niet in aanmerking te komen aangezien in een verdere sensitiviteitsanalyse zal blijken dat gegeven de technische karakteristieken van de Stirling  $\mu$ WKK die voor de simulatie en berekeningen gebruikt werd, de warmtevraag zich idealiter tussen 15 000 en 25 000 kWh bevindt voor toepassing van  $\mu$ WKK met de gegeven aannames. Wanneer bij een huidig verbruik van 40 000 kWh aardgas een thermisch rendement van een condensatieketel aangenomen wordt (90 %), leidt dit tot een jaarlijkse warmtevraag van 36 000 kWh, ver boven de target dus.

Het is echter waarschijnlijk dat niet elke verbruiker beschikt over een condensatieketel met een dergelijk jaarlijks rendement. Wanneer een oude (eventueel overgedimensioneerde) stookketel gebruikt wordt met een totaal jaarlijks rendement van 60 %, dan leidt een huidig verbruik van 40 000 kWh tot een jaarlijkse warmtevraag van 24 000 kWh. Vandaar dat in eerste instantie een bredere vork

---

<sup>15</sup> In een recent rapport over de Belgische verwarmingsmarkt, wordt een verhouding van 0,76 aangenomen [BRG Consult, 2008].

aangenomen werd (20 000 tot 40 000 kWh) en daarna een kleinere range (20 000 tot 30 000 kWh als huidig aardgasverbruik).

Tot slot dient ook nog vermeld te worden dat bij verbeterde technologie, in de vorm van een hogere kracht/warmteverhouding, goeie prestaties in deellast en een goed elektrisch rendement, eventueel lagere warmtevraagprofielen ook in aanmerking kunnen komen.

### 3.4 Huidige Vlaamse markt van verwarmingsketels

Voorgaande secties gaven een idee van het totale potentieel op korte termijn voor de introductie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen. Dit geeft echter nog geen inzicht in de jaarlijkse verkopen en trends op de huidige markt van verwarmingsketels in Vlaanderen en bij uitbreiding België.

Cijfergegevens voor Vlaanderen apart zijn niet verkrijgbaar. Ruwe schattingen uit de sector geven een verhouding 70/30 of 75/25 aan voor Vlaanderen ten opzicht van Wallonië.

Recente gegevens en een historiek voor de afgelopen jaren zijn terug te vinden in Figuur 10. Uit deze tabel blijkt dat in 2007 bijna 193 000 verwarmingsketels verkocht werden in België waarvan iets meer dan 30 000 eenheden stookolie als brandstof hebben. Opvallend daarbij is dat nog steeds bijna 55 000 eenheden niet-condenserende ketels zijn, hoewel een dalende trend duidelijk zichtbaar is ten voordele van de condensatieketels. Wanneer ervan uitgegaan wordt dat van de 162 000 gasketels 10 % niet voor de residentiële sector bestemd is<sup>16</sup>, dat van de resterende 145 800 eenheden 75 % of ongeveer 109 000 eenheden voor Vlaanderen bestemd zijn, en wanneer daarop het targetmarkt percentage in Vlaanderen toegepast wordt op basis van huidig verbruik (zie vorige sectie: 21 tot 42 %), dan bekomt men ongeveer 23 000 tot 46 000 eenheden op jaarbasis. Het spreekt voor zich dat een introductie van  $\mu$ WKK op de Vlaamse verwarmingsmarkt geleidelijk aan zal gebeuren en dat dergelijke volumes pas bij volledige ontplooiing bereikt kunnen worden.

Aangezien het totaal potentieel ruwweg tussen 300 000 en 600 000 eenheden geschat wordt op basis van de verbruiksgegevens (zie vorige sectie, schattingen op basis van de samenstelling van het woningpark liggen lager), én ervan uitgaande dat het huidige marktpotentieel stabiel blijft, zou dit betekenen dat bij volle introductie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen de markt bij benadering op 13 jaar "bevoorrad" zou kunnen worden wat bijna overeenkomt met de target levensduur van een micro-WKK eenheid van 15 jaar.

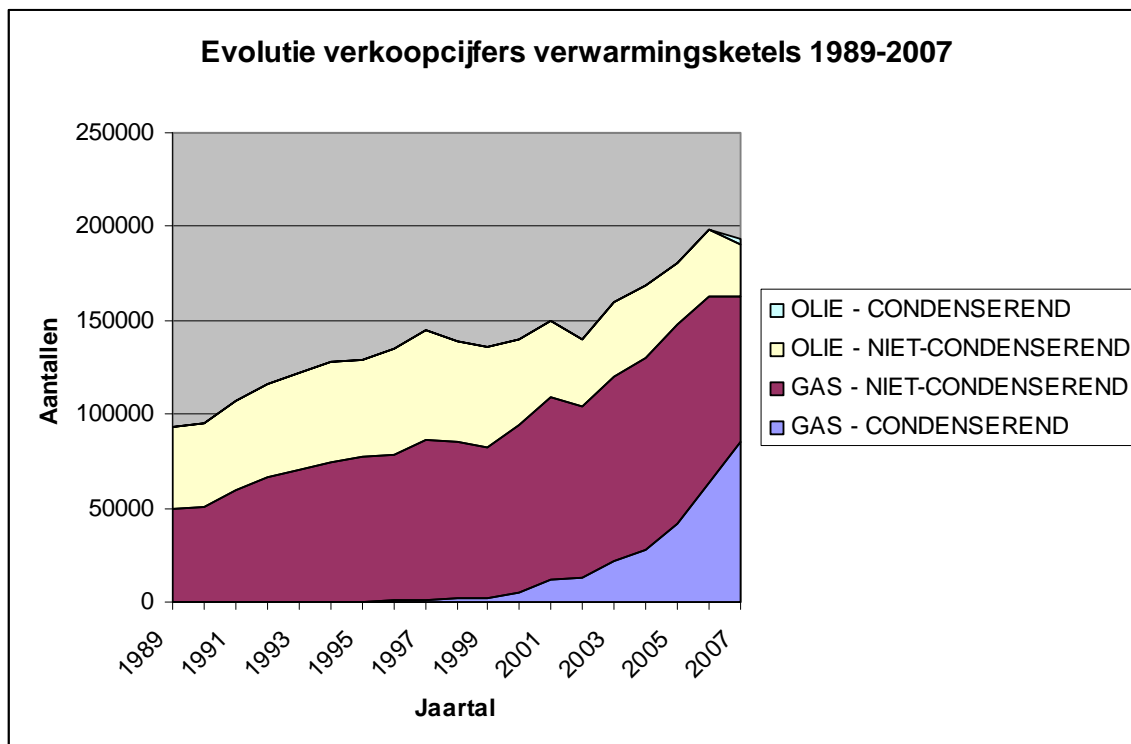
In BIJLAGE B wordt voor de volledigheid ook een overzicht gegeven van geschatte toekomstige verkopen van verwarmingsketels [BRG Consult, 2008].

Ter vergelijking: in een potentieelstudie van 2006 in Nederland werd een potentieel van 38 000 eenheden tot 2010 ingeschat en vervolgens tussen 77 000 en 92 000 eenheden per jaar [de Jong et al., 2006].

---

<sup>16</sup> Dit betekent niet noodzakelijk dat er in die situatie geen  $\mu$ WKK toegepast kan worden, alleen valt deze doelgroep buiten het bereik van deze studie. 10 % voor niet-huishoudelijke toepassingen is een schatting op basis van een rapport van BRG Consult ([BRG Consult, 2008] en de vermogens van de verkochte ketels zoals vrijgegeven door de sector.

Figuur 10: Evolutie verkoop verwarmingsketels België



### 3.5 Conclusies marktpotentieel

Op basis van voorgaande secties kunnen volgende besluiten getrokken worden:

- $\mu$ WKK op basis van een Stirlingmotor staat het dichtst bij commercialisering en is door zijn lage kracht-warmteverhouding het best geschikt voor woningen met een voldoende grote warmtevraag: 20 000 kWh lijkt het minimum aan warmtevraag te zijn op basis van veldtesten in het Verenigd Koninkrijk. Dit komt overeen met relatief grote woningen (110 m<sup>2</sup> en meer), geen nieuwbouw en een minder goede isolatie (oudere half open en open bebouwingen).
- In Vlaanderen zijn alnaargelang de bron tussen 48 en 57 % van de woningen open of half open bebouwingen. Dit komt overeen met ca. 1 390 000 tot 1 545 000 woningen.
- Vlaanderen heeft een relatief oud woningpark: bij benadering 60 % van de woningen is gebouwd voor 1970, het moment waarop men bewust werd van de noodzaak voor isolatie ten tijde van de oliecrisis.
- Voorgaande gegevens gecombineerd met type verwarmingssystemen geeft volgende resultaten:
  - Half open en open bebouwingen met centrale verwarming op aardgas en bouwjaar voor 1990 vertegenwoordigen 12 % of 284 919 gebouwen.
  - Dezelfde categorie als voorgaande maar met bouwjaar vóór 1970 vertegenwoordigt 6,5 % of 157 209 woningen
  - Het totale aantal half open en open bebouwingen met verwarming (zowel decentraal als centraal) op aardgas is gelijk aan 19,4 % van het totale gebouwenpark in Vlaanderen of 465 845 woningen.
- Op basis van de huidige verbruiksgegevens voor aardgas in Vlaanderen komen naar schatting 21 tot 42 % of ca. 300 000 tot maximum 600 000 huishoudelijke aardgasaansluitingen in aanmerking voor  $\mu$ WKK.

- Voorgaand punt gecombineerd met de huidige jaarlijkse verkopen van verwarmingsketels in België en teruggebracht naar Vlaanderen, geeft een jaarlijks potentieel van 23 000 tot 46 000 eenheden. Deze volumes zijn echter relevant voor een markt die op "kruissnelheid" is, in realiteit zal de introductie van  $\mu$ WKK geleidelijk aan gebeuren en zal in eerste instantie de kostprijs nog vrij hoog liggen wat een drempel kan zijn voor de commercialisering ervan.

## HOOFDSTUK 4 ECONOMISCHE EN MILIEU ASPECTEN

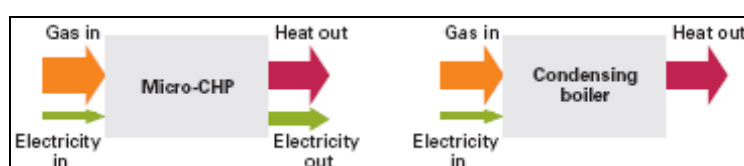
In dit hoofdstuk worden de economische en milieu aspecten van  $\mu$ WKK belicht. Net zoals voor de bepaling van het marktpotentieel is het uitgangspunt hier de technologie die het dichtst bij commercialisering staat: de Stirlingmotor met een bijbrander in een  $\mu$ WKK eenheid.

Een rekenmodel werd opgesteld waarin diverse technische en economische parameters gekoppeld worden aan een warmtevraag.

De uitgangspunten voor de economische en milieu-analyse kunnen als volgt samengevat worden:

- $\mu$ WKK op basis van Stirlingmotor, met rendementen en andere technische karakteristieken die kenmerkend zijn voor die technologie.
- Realistische prijsaannames voor elektriciteit en gas, gebaseerd op prijsinformatie voor huishoudelijke afnemers van medio 2008.
- Vertrekpunt is de huidige prijs voor de enige commercieel beschikbare  $\mu$ WKK eenheid voor ééngezinwoningen, daarna worden via sensitiviteitsanalyse verschillende mogelijkheden geanalyseerd.
- Voor het bepalen en berekenen van realistische waarden voor de verschillende inputparameters van het economische model, wordt er uitgegaan van een opstelling met buffervat: dat is het systeem zoals het toegepast wordt door de enige commercieel verkrijgbare unit en waarvoor voldoende technische informatie beschikbaar was voor betrouwbare berekeningen.
- De unit wordt aangestuurd op basis van de warmtevraag: dit is momenteel de meest logische manier van werken, elektriciteit wordt aanzien als bijproduct. Met de evolutie naar toekomstige smart grids is het mogelijk dat andere regelingen meer gaan sturen op elektriciteitsvraag en de warmte en/of elektriciteit nog meer gaan bufferen.
- Het referentiepunt is een condenserende verwarmingsketel (Figuur 11) en niet bijvoorbeeld een warmtepomp. Reden: zoals in vorige hoofdstukken reeds gesuggereerd wordt op basis van de literatuur en veldtesten in het buitenland, is de  $\mu$ WKK eenheid op basis van een Stirling uitermate geschikt voor bestaande woningen met een relatief grote warmtevraag en niet voor (goed geïsoleerde) nieuwbouw. De warmtepomp daarentegen is net gericht op nieuwbouw. Het referentiepunt bepaalt meteen ook welke opbrengsten/kosten in rekening gebracht moeten worden, namelijk enkel die posten die effectief verschillend zijn van het referentiepunt.

*Figuur 11: Referentiepunt in de economische analyse: de condenserende verwarmingsketel*



Bron: [Carbon Trust, 2007]

Samengevat werd er voor het bepalen van de relevante economische en milieu aspecten gebruik gemaakt van tools die in 3 grote blokken onderverdeeld kunnen worden:

- 1) simulatie warmtevraag in TRNSYS
- 2) simulatie werking  $\mu$ WKK op basis van een ingegeven warmtevraag in excel
- 3) economisch rekenmodel in excel

In het economische rekenmodel (3) worden op basis van een ingegeven warmtevraag en de technische parameters eenmalige en terugkerende opbrengsten en kosten berekend, die aanleiding geven tot cash flows. Rekening houdend met de tijdgebonden waarde van geld via een gekozen discontovoet, kan dan bepaald worden of de combinatie van de gekozen parameters een haalbaar systeem als resultaat hebben. Via sensitiviteitsanalyse kan daarna het effect van het wijzigingen van waardes van één of meerdere parameters in kaart gebracht worden.

Als basis voor bepaalde waardes van het rekenmodel werden de resultaten van een simulatie van de warmtevraag van verschillende soorten woningen in TRNSYS gebruikt, waarna de resultaten van die simulatie ingevoerd werden in een aan het rekenmodel gekoppeld simulatiewerkblad voor het aansturen van de  $\mu$ WKK in combinatie met het buffervat. Dit simulatiewerkblad geeft een overzicht van de werking van de  $\mu$ WKK in functie van de gekozen warmtevraag: het aantal equivalente vollasturen, het aantal start/stops, elektrische en thermische output, toestand van het buffervat, ... Op basis hiervan kunnen dan realistische waardes ingeschat worden voor bijvoorbeeld het jaarlijkse elektrische rendement en thermische rendement, die op hun beurt als input dienen voor het eerder genoemde economische rekenmodel.

De 3 componenten samen (TRNSYS simulatie, simulatiemodel excel en economische model) werden dus aangewend voor een inschatting van de economische, technische en milieu aspecten en worden in wat volgt "het model" of "het rekenmodel" genoemd.

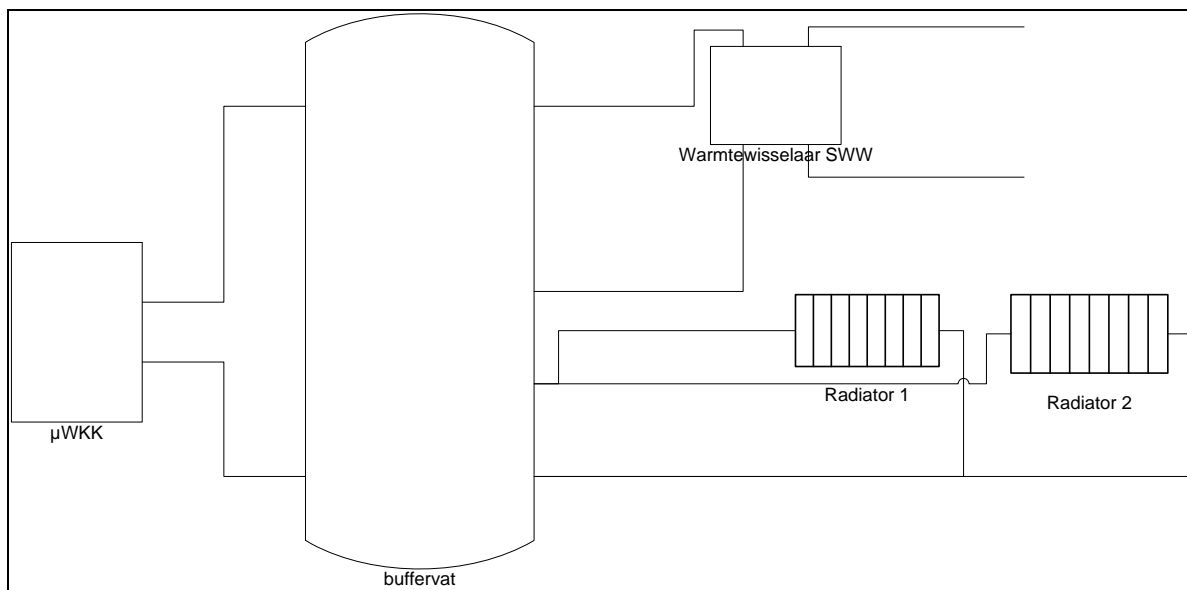
### 4.1 Rekenmodel

Het basis rekenmodel dat ontwikkeld en gebruikt werd voor de economische analyse en bijhorende sensitiviteitsanalyse is gebaseerd op de kenmerken van de momenteel enige commercieel verkrijgbare  $\mu$ WKK op basis van een Stirlingmotor waarvoor voldoende technische gegevens vrijgegeven werden.

De technische karakteristieken zoals elektrisch en thermisch vermogen en de toegepaste elektrische en thermische efficiënties (d.i. elektrische en thermische output op basis van een opgelegd warmtepatroon en noodzakelijk gasverbruik) zijn, voor zover mogelijk, gebaseerd op de kenmerken van deze commerciële eenheid. De aannames rond de kostprijs van een dergelijk systeem (voor de sensitiviteitsanalyse) zijn eveneens gebaseerd op de informatie die door fabrikanten ter beschikking gesteld werd.

De aangenomen basisopstelling is als volgt (er werd even abstractie gemaakt van pompen, temperatuursensoren e.d.):

Figuur 12: Basisopstelling  $\mu$ WKK en buffervat



De  $\mu$ WKK levert warm water rechtstreeks aan het buffervat (in het rekenmodel werd in de basissituatie een buffervat van 300 liter aangenomen om de nodige flexibiliteit te voorzien). Vanuit dat buffervat kan via een warmtewisselaar sanitair warm water (SWW) opgewarmd worden (in de figuur kon die ook in het buffervat zelf getekend worden) en wordt tegelijkertijd ook het verwarmingssysteem gevoed. De voordelen van deze opstelling zijn voornamelijk de flexibiliteit: met een buffervat dat zowel voor CV als sanitair warm water gebruikt wordt, kan er binnen bepaald grenzen gevarieerd worden met de temperaturen. Het warm water uit de aangenomen commerciële unit heeft als temperatuur ongeveer 75 °C met als maximum 85 °C. De temperatuur van de retour mag maximum 20 °C onder de vertrektemperatuur liggen.

De initiële uitgangspunten van het rekenmodel kunnen onderverdeeld worden in de volgende categorieën:

- Investeringskosten (in vergelijking met een traditionele condensatieketel)
- Investeringsubsidies of financiële voordelen naar aanleiding van de investering
- Werkings- en onderhoudskosten
- Technische karakteristieken van de  $\mu$ WKK eenheid
- Karakteristieken van de vraag.
- Elektriciteits- en gasprijzen
- Warmtekrachtcertificaten
- CO<sub>2</sub> emissie

De combinatie van de waarden die aan bovenstaande categorieën toegekend worden, geven in het model een overzicht van primair energieverbruik, relatieve primaire energiebesparing, totale primaire energiebesparing, CO<sub>2</sub> besparing en verbruik en productie van gas en elektriciteit. Dit resulteert in een overzicht van de economische haalbaarheid (jaarlijkse cash flows, terugverdientijd, net present value, ...) en wordt bekeken voor verschillende scenario's (andere input voor de parameters).

Hieronder wordt elk onderdeel van het model beknopt toegelicht met de initiële waarden die aan de parameter(s) toegekend worden.



#### 4.1.1 Investeringskosten

De huidige kostprijs van een  $\mu$ WKK-eenheid en toebehoren (leidingen, koppelingen, regelaar, ...) ligt nog vrij hoog (ongeveer 8000 €). Het referentiepunt voor deze studie is, zoals eerder aangegeven, een condensatieketel. De bijhorende kostprijs voor dit referentiepunt wordt eveneens in onderstaande tabel aangegeven.

Zoals gezegd is onderstaande prijs gebaseerd op de enige commercieel verkrijgbare  $\mu$ WKK. Prototypes van andere fabrikanten liggen momenteel nog een factor 2 tot 3 hoger, voor zover prijsinformatie vrijgegeven wordt. Voor grootschalige commercialisering mikken fabrikanten op een targetprijs zodat de  $\mu$ WKK door zijn elektriciteitsproductie op 5 tot 7 jaar terugverdiend zou moeten worden ten op zichte van een condenserende ketel. Schaalvoordelen door grootschalige serieproductie zouden dit op termijn mogelijk moeten hoewel het aanneembaar is dat in de beginfase financiële steun de technologie voor de eindgebruiker aantrekkelijk zal moeten maken.

Tabel 8: investeringskosten  $\mu$ WKK

<b>investeringskosten</b>	<b><math>\mu</math>WKK</b>	<b>CV</b>
$\mu$ WKK eenheid + toebehoren	8000	2000
installatiekosten	1000	1000
dimensie buffervat in liter	300	300
buffervat	700	700
andere	0	
BTW %	6	6
BTW bedrag	582	222
Totaal	10282	3922
<b>Meerkost <math>\mu</math>WKK</b>	<b>6360</b>	

De  $\mu$ WKK eenheid inclusief toebehoren betreft de ketel met Stirlingmotor en bijbrander, inclusief alle noodzakelijke koppelingen en regelingen maar exclusief het buffervat. Een buffervat van 200 of 300 liter wordt in dit geval aangeraden door de fabrikant. Simulaties in het model waarbij runs van minstens een half uur en bij voorkeur een volledig uur opgelegd worden (beperking start/stop verliezen) geven aan dat een buffervat van 300 liter zo goed als geen overschrijdingen van de buffercapaciteit tot gevolg hebben, bij een buffervat van 200 liter gebeuren frequente maar wel kleine overschrijdingen van de buffercapaciteit. De prijzen van buffervaten lopen sterk uiteen afhankelijk van merk, isolatie, enz. In dit geval werd een prijs van 700 € exclusief BTW aangenomen.

Sommige prototypes van andere fabrikanten zijn modulerende  $\mu$ WKK-eenheden die ook zonder buffervat kunnen werken. Aangezien er echter geen informatie voor handen is over de rendementen in deellast, zo goed als geen gedetailleerde prijsinformatie voor die prototypes en gezien de beperkte flexibiliteit zonder buffervat, werd in dit model noodzakelijkerwijs voor de opstelling met buffervat en een niet-modulerende  $\mu$ WKK gekozen.

Andere investeringskosten worden niet in rekening gebracht. Het BTW percentage van 6 % wordt verondersteld aangezien de target markt in eerste instantie de

renovatiemarkt is en dit percentage in Vlaanderen toegepast wordt voor renovatie van woningen van minstens 5 jaar oud.

De totale meerkost in het "standaardmodel" voor een  $\mu$ WKK ten opzichte van een condenserende ketel bedraagt in dit geval 6360 €. De bedragen die aangenomen werden voor een condenserende ketel zijn eveneens in bovenstaande tabel terug te vinden.

#### 4.1.2 Investeringssubsidies of financiële voordelen

De voornaamste bestaande financiële voordelen bij vervanging van een bestaande oude verwarmingsketel is de **belastingvermindering van 40 % van de investering met een maximum van 2770 €** voor inkomstenjaar 2009. Bij een hogere investeringskost voor een  $\mu$ WKK zal dan ook een hogere fiscale aftrek van toepassing zijn in het jaar volgend op de investering.

Voor het uitgangspunt voor de economische analyse werden geen andere investeringssubsidies in rekening gebracht. Op basis van de sensitiviteitsanalyse op o.a. de parameter eenheidskost verder in deze studie kan wel afgeleid worden wat de impact van bijkomende investeringssubsidies op de haalbaarheid kan zijn.

Tabel 9: Investeringssubsidies/financiële voordelen bij investering in  $\mu$ WKK

<i>investeringssubsidies overheid</i>	$\mu$ WKK	CV
toegepast % fiscale aftrekbaarheid	40	40
bovengrens fiscale aftrekbaarheid	2770	2770
tot belastingvermindering (max bovengr & % x invest kost) - jaar + 1	2770	1568,8
<b>Extra belastingvermindering voor <math>\mu</math>WKK tov CV</b>	1201,2	
andere	0	0
<b>Extra subsidie voor <math>\mu</math>WKK tov CV</b>		
Totale investeringssubsidies	2770	1568,8

Tijdens de looptijd van deze studiewerd de fiscale regeling met betrekking belastingverminderingen vanaf inkomstenjaar 2009 (aanslagjaar 2010) gewijzigd: bij woningen die al meer dan 5 jaar in gebruik zijn en waarbij de belastingplichtige energiebesparende uitgaven deed waarbij de 40 %-belastingvermindering de drempel van 2770 € overschrijdt, mag het resterende overschot telkens overgedragen worden naar de 3 volgende belastbare tijdperken. De maxima van 2770 €/jaar mogen hierbij niet overschreden worden. In de praktijk zal dit voor bovenstaande berekening tot gevolg hebben dat in totaal 40 % van de investering door belastingvermindering gecompenseerd kan worden, met dus een extra financiële compensatie van 1342,8 € zoals in onderstaande tabel terug te vinden is.

Tabel 10: Investeringssubsidies/financiële voordelen bij investering  $\mu$ WKK (vanaf 2009)

<i>investeringssubsidies overheid</i>			verschil $\mu$ WKK tov CV
toegepast % fiscale aftrekbaarheid	40	40	
bovengrens fiscale aftrekbaarheid	2770	2770	
totaalbedrag % van investeringskost	4112,8	1568,8	
tot belastingvermindering (max bovengr & % x invest kost) - jaar + 1	2770	1568,8	1201,2
resterend overdraagbaar bedrag	1342,8	0	
tot belastingvermindering (max bovengr & % x invest kost) - jaar + 2	1342,8	0	1342,8
resterend overdraagbaar bedrag	0	0	
tot belastingvermindering (max bovengr & % x invest kost) - jaar + 3	0	0	0
resterend overdraagbaar bedrag	0	0	
tot belastingvermindering (max bovengr & % x invest kost) - jaar + 4	0	0	0
Totale investeringssubsidies	4112,8	1568,8	

### 4.1.3 Werkings- en onderhoudskosten

In het initiële model werden geen verschillende werkings- en onderhoudskosten opgenomen ten opzicht van een condenserende ketel. Fabrikanten van  $\mu$ WKK eenheden beogen dezelfde werkings- en onderhoudskosten als voor een standaard condensatieketel. Het gasverbruik zal ten opzichte van een condensatie uiteraard hoger liggen doordat niet alleen warmte maar ook elektriciteit geproduceerd wordt.

### 4.1.4 Technische karakteristieken $\mu$ WKK eenheid

Zoals aangegeven in het hoofdstuk over de verschillende  $\mu$ WKK technologieën is er een grote diversiteit aan technische karakteristieken. Zelfs voor de  $\mu$ WKK gebaseerd op de Stirling technologie zijn er nog verschillen tussen de types die door de verschillende fabrikanten ontwikkeld worden: eerder werd reeds aangegeven dat sommige  $\mu$ WKK's kunnen moduleren. De eenheid uit het rekenmodel kan niet moduleren maar werkt met een buffervat van 300 liter. De andere technische karakteristieken werden eveneens uit de technische specificaties van die eenheid overgenomen.

Tabel 11: Technische karakteristieken van de aangenomen  $\mu$ WKK

<b>Karakteristieken <math>\mu</math>WKK</b>	
elektrisch vermogen	1
thermisch vermogen stirling	7,3
thermisch vermogen aux	6
totaal thermisch vermogen	13,3
elektrisch rendement bij max	12
elektrisch rendement bij full aux	6,6
elektrisch rendement realistisch	8
thermisch rendement realistisch	82
totaal rendement gemiddeld	90
referentierendement CV ketel	90
kracht-warmteverhouding realistisch	9,756%

Het elektrisch vermogen van de  $\mu$ WKK eenheid bedraagt 1 kWe, het thermisch vermogen van de geïntegreerde Stirlingmotor tussen 6,9 en 7,7 kWth. Samen met de hulpbrander kan er in totaal tussen 13,2 en 14 kWth gegenereerd worden. Bij maximale elektrische output (zonder inschakeling van de bijbrander), bedraagt het totaal elektrisch rendement bij benadering 11 tot 12 % (onderwaarde). Bij maximale thermische output (maximaal vermogen met ingeschakelde Stirling en bijbrander), bedraagt het elektrisch rendement nog bij benadering tussen 6 en 7 %. In realiteit zal doorheen het jaar af en toe de bijbrander ingeschakeld moeten worden en zal er ook sprake zijn van start/stop verliezen met betrekking tot generatie van elektriciteit en thermische output. Ook het standby en eigen verbruik bij werking (maximaal enkele tientallen Watts) zal het jaarlijks elektrisch rendement nog naar beneden beïnvloeden. Simulaties met een rekenmodel waarbij de regeling gericht is op minimum runs met een looptijd van een half uur en bij voorkeur een volledig uur, bij een warmtevraagprofiel met een totaal jaarlijkse warmtevraag van 20 000 kWh geven een totale verwachte elektriciteitsproductie van iets minder dan 2000 kWh en een globaal jaarlijks elektrisch rendement van ongeveer 8%. Bij gebruik van grotere buffervaten wordt nog meer elektriciteit opgewekt. Bij kleinere buffervaten daalt het globaal

elektrisch rendement en wordt dus ook minder elektriciteit opgewekt<sup>17</sup>. Veldtesten in Groot-Brittannië geven in de praktijk ook lagere jaarlijkse elektrische rendementen weer dan in de technische specificaties vermeld staat<sup>18</sup> (mede door start/stop verliezen en inschakelen van de bijbrander) [Carbon Trust, 2007]. In het model werd een praktisch jaarlijks elektrisch rendement van 8 % aangenomen. Voor het thermische rendement van de  $\mu$ WKK eenheid werd 82 % aangenomen ten opzichte van 90 % voor een condenserende ketel. Dit elektrisch en thermisch rendement werd bekomen bij simulatie van de werking van de  $\mu$ WKK met buffervat om aan een realistisch (in TRNSYS gesimuleerde) warmtevraagprofiel per uur over een heel jaar te voldoen.

Wat betreft het bepalen van de kracht/warmteverhouding zijn er in principe 3 mogelijkheden:

- 1) De verhouding van  $P_e$  (elektrisch vermogen) ten opzichte van  $P_{th}$  (thermisch vermogen) van de Stirlingmotor (het eigenlijke WKK-onderdeel zonder de bijbrander): in dit geval is het resultaat 13,7 %
- 2) De verhouding van  $P_e$  (elektrisch vermogen) van de Stirling ten opzicht van  $P_{th}$  (thermisch vermogen) van de totale eenheid (Stirling + bijbrander): in dit geval is het resultaat 7,52 %
- 3) De verhouding van jaarlijks geproduceerde elektriciteit  $E$  ten op zichte van de jaarlijks geleverde warmte  $Q$ : in dit geval is het resultaat 9,76%. Dit laatste is ook opgenomen in bovenstaande tabel.

### 4.1.5 Karakteristieken van de vraag

In het rekenmodel werd een **totale warmtevraag van 20 000 kWh** aangenomen. Een gedeelte daarvan bestemd voor **ruimteverwarming (+/- 17 000 kWh)** en ander gedeelte voor **sanitair warm water (+/- 3 000 kWh)**. De totale warmtevraag ligt daarbij binnen de vereiste range van de fabrikant<sup>19</sup>. De jaarlijkse elektriciteitsconsumptie werd aangenomen op 3 500 kWh. Dit kan van belang zijn mocht er een grote warmtevraag zijn (met dus een hoog aantal draaiuren van de  $\mu$ WKK) gecombineerd met een lage elektriciteitsvraag.

Volgens het Technisch Reglement voor de Distributie van Elektriciteit heb je voor een vermogen tot 10 kW recht op een bidirectionele (of terugdraaiende) teller. In de praktijk komt dit erop neer dat de elektriciteit die geproduceerd wordt, vergoed wordt aan het elektriciteitstarief. Wanneer je echter over een factureringsperiode (bv. 1 jaar) een nettoproducent wordt, wordt die elektriciteit op het net gezet. In principe kan die stroom verkocht worden maar in de praktijk zal voor kleine hoeveelheden teruggeleverde elektriciteit (zeker voor ééngezinswoningen) de administratieve kost hoger liggen dan de opbrengst. Belangrijk voor deze studie is het feit dat er vanuit gegaan werd dat geen stroom terug op het net gezet wordt en dus niet aan lage terugleververgoedingen verkocht wordt. Voor een enkelvoudige teller en een gemiddeld stroomverbruik van 3 500 kWh is het risico op netto productie nagenoeg uit te sluiten, bij een dag-nacht teller zou de kans echter kunnen bestaan met de huidige aannames dat een klein deel van de stroom terug op het net geplaatst wordt mocht bijvoorbeeld de  $\mu$ WKK unit voornamelijk tijdens de daguren stroom genereren en de eindgebruiker zelf zijn verbruik op de lagere nachttarieven afstemt.

---

<sup>17</sup> Een lagere jaarlijkse warmtevraag geeft uiteraard ook een lagere elektrische output, dit wordt verder in detail besproken in de sensitiviteitsanalyse.

<sup>18</sup> Ook voor condenserende ketels is een jaarlijks thermisch rendement over het algemeen een stuk lager dan de technische specificaties doen vermoeden: dit is te wijten aan dimensionering, plaats van opstelling, ...

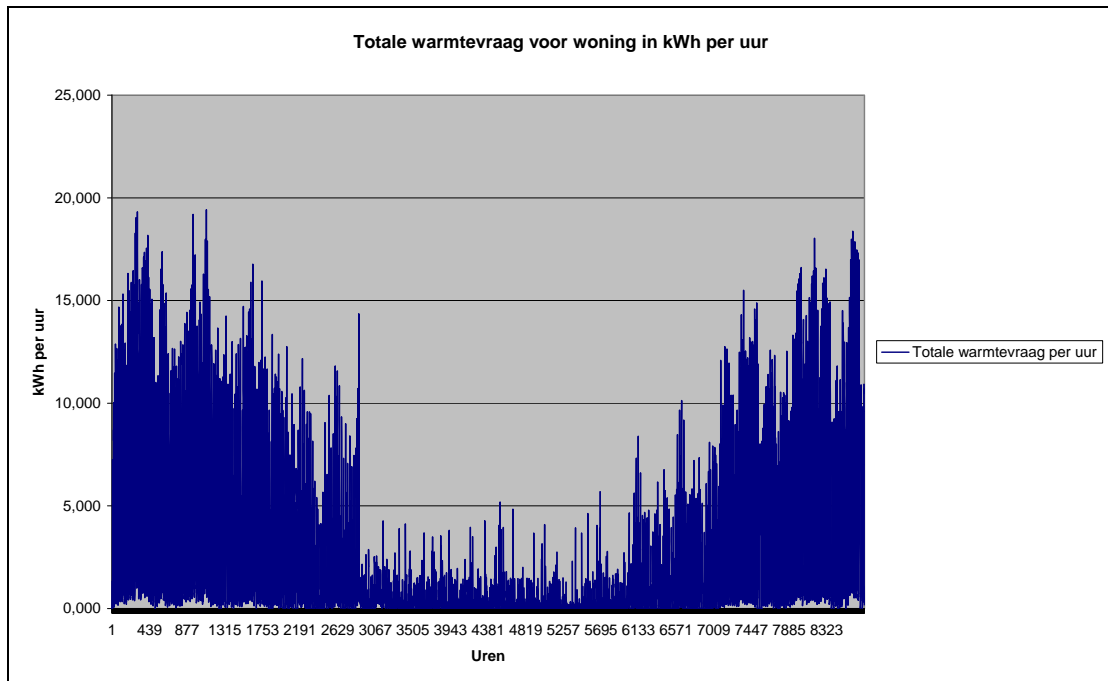
<sup>19</sup> De fabrikant suggereert een referentieverbruik tussen 18 000 kWh en 30 000 kWh of nog specifieker tussen 23 000 en 28 000 kWh. Een andere fabrikant gebruikt als referentieverbruik vaak 1600 m<sup>3</sup> (wat in energie uitgedrukt een verschillend resultaat kan geven naargelang de calorische waarde van het verbruikte aardgas).

Voor de simulatie van de runtijden van de  $\mu$ WKK werd een warmtevraag profiel gesimuleerd voor een woning in TRNSYS. Voor sanitair warm water werden gegevens gebruikt die verzameld werden in het kader van de "IEA/ECBCS Annex 42: The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems". De warmtevraag voor sanitair warm water is daarbij gebaseerd op een gemiddelde dagelijkse vraag van 200 liter, wat ongeveer overeenkomt met het verbruik van een gezin van 4 personen.

De warmtevraag werd bepaald in kWh per uur. Voor de sensitiviteitsanalyse die verderop in dit hoofdstuk gebeurt, werd gebruik gemaakt van simulaties van de warmtevraag in TRNSYS voor verschillende ordegroottes van totale warmtevraag voor ruimteverwarming (de vraag naar warm sanitair water werd constant gehouden). Verschillende types van woningen (rijwoning, half open bebouwing, open bebouwing) werden ingegeven met verschillende niveaus van isolatie, gaande van ongeïsoleerde muren en daken tot goed geïsoleerde woningen. Als basis voor de verschillende variaties werden woningmodellen gebruikt die eerder ontwikkeld werden in het kader van het el<sup>2</sup>ep-project [Verbeeck et al., 2006]. De gevraagde binnenuistemperatuur in de week bedraagt 21 °C tussen 7u en 8u en tussen 17u en 22u voor de meeste ruimtes. Tijdens de andere momenten bedraagt de temperatuur 15 °C. Zolder en kelder worden verondersteld onverwarmd te zijn. In toiletten en hall dient de temperatuur minimum op 10 °C gehouden te worden. In het weekend wordt er verwarmd van 7u tot 22u. In de badkamer wordt een temperatuur van 25 °C gevraagd tijdens de "verwarmde" uren.

Deze veronderstellingen voor de woningtypes gaven een jaarlijkse warmtevraag en -profiel voor ruimteverwarming variërend van 8 200 kWh voor de heel goed geïsoleerde woningen tot 30 200 kWh voor de zo goed als niet geïsoleerde woningen. De jaarlijkse vraag naar sanitair warm water werd voor alle types verondersteld gemiddeld 200 liter per dag te bedragen, wat overeenkomt met ongeveer 3 000 kWh per jaar.

*Figuur 13: Voorbeeld warmtevraagprofiel woning*



#### 4.1.6 Elektriciteit- en gasprijzen

Voor energieprijzen werden medio 2008 de tariefkaarten onderzocht en de gemiddeldes genomen van de voornaamste 8 energieleveranciers actief op de retailmarkt in Vlaanderen voor zowel elektriciteit als aardgas. Die prijs was gebaseerd op het elektriciteits- en gasverbruik van respectievelijk 3 500 kWh en 22 500 kWh en bedroeg respectievelijk 0,185 en 0,0525 € per kWh (inclusief BTW). Simulaties op basis van de simulatietool van de VREG gaven op dat moment gemiddeld 0,18 € en 0,056 €

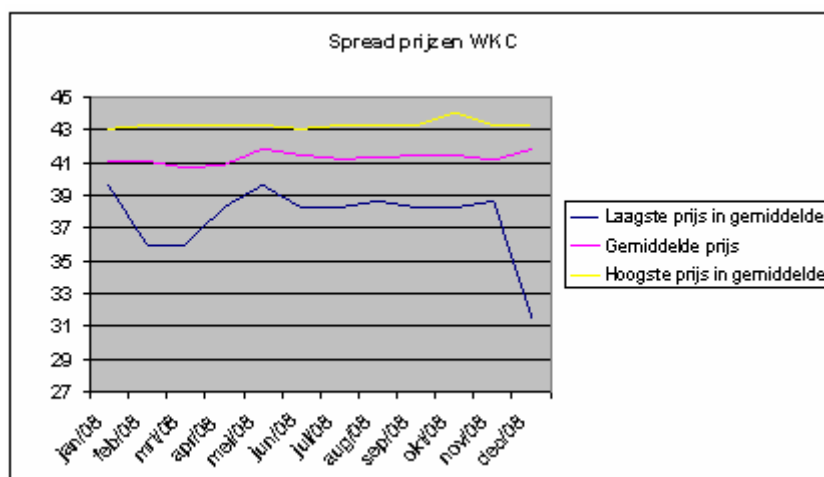
Voor de eenvoud (en na een snelle heel recente steekproef) werd in het initiële rekenmodel uitgegaan van een **elektriciteitsprijs van 0,18 €/kWh** en een **aardgasprijs van 0,06 €/kWh**.

#### 4.1.7 Warmtekrachtcertificaten

In het rekenmodel is er vanuit gegaan dat de warmtekrachtcertificaten te gelde gemaakt kunnen worden door de klant die met een  $\mu$ WKK eenheid stroom produceert. Een **gemiddelde marktprijs van 41 € per certificaat** werd aangenomen. In de praktijk is het nog niet duidelijk of dat effectief zo zal zijn aangezien de hoeveelheid warmtekrachtcertificaten per  $\mu$ WKK eenheid voor residentiële toepassingen heel beperkt zal zijn en momenteel geen directe (zekere) afzetmarkt bestaat voor warmtekrachtcertificaten: de handel in warmtekrachtcertificaten gebeurt momenteel voornamelijk bilateraal, er bestaat geen onmiddellijke rechtstreekse afnemer tenzij de minimumprijs die door de DNB geboden wordt (27 € per certificaat).

Ter illustratie wordt in onderstaande figuur de evolutie van de gemiddelde prijs voor een WKC aangegeven, net zoals de spread tussen de hoogste en laagste prijzen<sup>20</sup>.

Figuur 14: Evolutie prijzen WKC's in 2008



Bron: [VREG, 2009]

#### 4.1.8 CO2 emissie

Voor de berekening van CO2 emissies en de eventuele besparing hierop door toepassing van  $\mu$ WKK zijn twee elementen van belang:

<sup>20</sup> De uitzonderlijk lage prijs van 27 €WKC eind 2008 betreft een heel klein aantal WKC's die door de eigenaar van de hand gedaan werd aan de minimumprijs die door de DNB's gegarandeerd wordt.

- 1) De CO<sub>2</sub> intensiteitsfactor van aardgas (kg CO<sub>2</sub>/kWh): in het rekenmodel werd uitgegaan van 0,201 kg/kWh [IPCC, 1997].
- 2) De effectieve CO<sub>2</sub> intensiteitsfactor van het centrale elektriciteitspark.

Het tweede element kan voor discussie vatbaar zijn: worden enkel de productie-eenheden in rekening gebracht die eveneens gasgestookt zijn, worden alle klassieke centrales in rekening gebracht of wordt het volledige elektriciteitsproductiepark in rekening gebracht, inclusief de nucleaire centrales? Voor 2006 kan op basis van gegevens die door de Vlaamse elektriciteitscentrales ter beschikking gesteld werden, berekend worden dat de effectieve CO<sub>2</sub> intensiteitsfactor voor het volledige elektriciteitsproductiepark **0,349 kg CO<sub>2</sub>/kWh** bedroeg. Zonder nucleaire centrales bedroeg dit **0,767 kg CO<sub>2</sub>/kWh**. Wanneer enkel de gasgestookte centrales in rekening gebracht worden, bedraagt de effectieve CO<sub>2</sub> intensiteitsfactor ongeveer **0,434 kg CO<sub>2</sub>/kWh**. De waarde die door het Verificatiebureau aangenomen wordt bedraagt **0,760 kg CO<sub>2</sub>/kWh** [Auditconvenant, 2008].

#### 4.1.9 Slotopmerkingen

Dit rekenmodel is grotendeels gebaseerd op specificaties zoals door de fabrikanten aangegeven en gegevens die vrijgegeven werden in het kader van veldtesten zoals de Carbon Trust testen, de veldtesten door Remeha en eigen berekeningen en realistische inschattingen. Er kon niet gesteund worden op eigen metingen uit de praktijk. Buffervatverliezen zijn forfaitair in het model opgenomen en bepaald op 2 %. In verhouding tot de invloeden van afwijkingen van technische parameters (en dan voornamelijk rendementen en start/stop verliezen) in de realiteit ten opzichte van technische specificaties, zullen deze verliezen wellicht minder doorslaggevend zijn.

Op basis van de warmtevraag geeft het rekenmodel het aantal vollasturen weer dat bij die warmtevraag verwacht wordt. Verder worden met de ingegeven waardes voor de parameters volgende gegevens berekend:

- Hoeveelheid geproduceerde elektriciteit en het overeenkomstig bedrag aan uitgespaarde elektriciteit (zie opmerking in 4.1.5 met betrekking tot terugdraaiende elektriciteitsmeter).
- Het gasverbruik op onderste verbrandingswaarde en gecorrigeerd naar bovenste verbrandingswaarde zodat het gefactureerde bedrag aan aardgas berekend wordt.
- Referentiegasverbruik voor een gewone condenserende ketel (onderste en bovenste verbrandingswaarde).
- De jaarlijkse meerkost door het verhoogde aardgasverbruik.
- Totaal primair energieverbruik van de  $\mu$ WKK en van het referentiepunt.
- CO<sub>2</sub> emissies van de  $\mu$ WKK en van het referentiepunt met de totale CO<sub>2</sub> besparing/overschot voor de  $\mu$ WKK.
- Warmtekrachtcertificaten en opbrengst ervan.
- Jaarlijkse cashflows die berekend worden op basis van de kosten en baten en waaruit de net present value en een terugverdientijd berekend wordt.

De verdisconteringsvoet of actualisatievoet wordt (zonder inflatie) aangenomen 5 % te bedragen. Dit is een realistische aanname vanuit het standpunt van de eindklant, een particuliere bewoner van een ééngesinswoning. De vaste lange termijnrente<sup>21</sup> op 15 en 20 jaar schommelt de laatste jaren namelijk ruwweg tussen 4,2 en 6 % [Immotheek, 2009].

<sup>21</sup> Ter vergelijking: het rendement van een huidige OLO op 15 jaar (wat dikwijls als referentie gebruikt wordt voor de lange termijn rente in België) is momenteel ongeveer 4,5 %.

Als inflatie werd 2 % aangenomen, het streefdoel van inflatie voor de Europese Centrale Bank en afgezien van het jaar 2008 ook de waarde waarrond de effectieve inflatie de laatste jaren in de eurozone (en voor België eveneens maar iets grilliger) schommelde.

Als economisch resultaat van het rekenmodel wordt een netto contante waarde berekend (net present value of NPV), een eenvoudige terugverdiensijd, een dynamische terugverdiensijd en een intern rendement (internal rate of return of IRR).

## 4.2 Resultaten rekenmodel

### 4.2.1 Algemene technisch-economische resultaten

#### Algemeen

De algemene technisch-economische resultaten van de standaardsituatie zoals in vorige sectie beschreven, en die gebruikt worden voor het samenstellen van de uiteindelijke jaarlijkse cashflows, worden samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 12: Algemene technisch-economische resultaten standaardsituatie  $\mu$ WKK

<b>Outputparameter</b>	<b>Waarde</b>
Jaarlijkse warmteproductie $\mu$ WKK	20 000 kWh
Jaarlijkse elektriciteitsproductie $\mu$ WKK	1951 kWh
Aantal equivalente vollasturen	1951
Jaarlijks bedrag uitgespaarde elektriciteit	351 €
Jaarlijks gasverbruik zonder correctie LVB <sup>22</sup>	24 390 kWh
Jaarlijks gasverbruik met correctie LVB (d.i. gefactureerd gasverbruik)	26 829 kWh
Jaarlijks referentiegasverbruik condenserende ketel zonder correctie LVB	22 222 kWh
Jaarlijks referentiegasverbruik condenserende ketel met correctie LVB (d.i. gefactureerd gasverbruik)	24 444 kWh
Jaarlijkse kostprijs gasverbruik	1 610 €
Jaarlijkse kostprijs referentiegasverbruik	1 467 €
Jaarlijkse meerkost aardgasverbruik	143 €

Voor de omzetting van het aantal kWh van laagste (of onderste) verbrandingswaarde naar bovenste verbrandingswaarde wordt een factor 1,1 gehanteerd [EMIS, 2008].

#### WKC's

De bepaling van het aantal warmtekrachtcertificaten en de degressiviteit ervan voor één  $\mu$ WKK installatie met de gegeven inputparameters gebeurde op basis van de wetgeving ter zake [Belgisch Staatsblad1, 2006] en [Belgisch Staatsblad2, 2006] en met aanname van een marktprijs van 41 € per certificaat in de basissituatie enerzijds en een marktprijs van 27 € (minimum gegarandeerde prijs door de DNB's) ter vergelijking anderzijds.

<sup>22</sup> LVB = laagste of onderste verbrandingswaarde.



Tabel 13: Opbrengst warmtekrachtcertificaten  $\mu$ WKK (marktprijs 41 €)

jaar	Bedrag aan WKC's aan 41 €	Bedrag aan WKC's aan 27 €
1	71	47
2	71	47
3	71	47
4	71	47
5	60	40
6	39	26
7	18	12
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0

In het uiteindelijke resultaat van de economische analyse wordt echter uitgegaan van de eerder genoemde gemiddelde marktprijs van 41 €

### **Totaalresultaat**

Een detailbeeld van het totaalresultaat van de haalbaarheidsanalyse voor deze basissituatie wordt weergegeven in BIJLAGE C.

De tijdshorizon die af te lezen is op die figuur is 20 jaar, maar de economische berekeningen wat betreft IRR en net present value bestrijken een periode van 15 jaar die ongeveer overeenkomt met de verwachte (en target) levensduur van een  $\mu$ WKK gebaseerd op de Stirlingmotor.

Volgende samengevatte conclusies vallen daaruit af te leiden:

- de toepassing van een  $\mu$ WKK voor een ééngezinswoning aan de huidige kostprijs van de goedkoopste commerciële fabrikant (andere fabrikanten zitten nog een factor 2 of 3 hoger voor hun prototypes) is niet haalbaar met de huidige subsidieregeling of steun voor milieuvriendelijke investeringen zoals de belastingvermindering
- Een eenvoudige terugverdientijd ligt al hoger dan 20 jaar, de dynamische terugverdientijd nog een pak hoger.
- De netto contante waarde voor de investering bedraagt ongeveer -3 000 €
- Het interne rendement bedraagt -5 %

Deze resultaten dienen met de nodige omzichtigheid geïnterpreteerd te worden: ze zijn het resultaat van de aangenomen waardes voor de inputparameters. Die zijn op hun beurt gebaseerd op informatie uit de literatuur, resultaten uit veldtesten in het buitenland en berekende en geschatte waardes uit de simulaties die gemaakt werden, gebaseerd op de enige  $\mu$ WKK eenheid **waarvoor voldoende technische informatie beschikbaar was**. Aangezien die bewuste  $\mu$ WKK fabrikant als pionier op de markt kan

beschouwd worden, valt het te verwachten dat de prestaties van toekomstig commercieel beschikbare units minstens evenwaardig zullen zijn. Onofficiële tussentijdse resultaten lijken erop te wijzen dat aankomende units inderdaad hogere rendementen en prestaties zullen kunnen halen, hoewel daar meteen aan toegevoegd dient te worden dat de kostprijzen waartegen dergelijke units verkocht zullen worden nog niet betrouwbaar ingeschat kunnen worden.

### **Nieuw fiscaal regime vanaf inkomstenjaar 2009 (aanslagjaar 2010)**

Daarnaast werd er eerder reeds aangegeven dat er vanaf inkomstenjaar 2009 (aanslagjaar 2010) een nieuw fiscaal regime geldt waarbij de investeringskost voor energiebesparende maatregelen bij overschrijding van de jaarlijkse toegelaten bovengrens over meerdere jaren gespreid kan worden. Dit geeft een gunstige impact op het economische plaatje, weergegeven in BIJLAGE D.

Volgende conclusies vallen daaruit af te leiden in vergelijking met het vroegere fiscale regime:

- de toepassing van een  $\mu$ WKK voor een ééngezinswoning aan de huidige kostprijs van de goedkoopste commerciële fabrikant (andere fabrikanten zitten nog een factor 2 of 3 hoger voor hun prototypes) is nog steeds niet haalbaar met de huidige subsidieregeling of steun voor milieuvriendelijke investeringen zoals de belastingvermindering
- Een eenvoudige terugverdientijd bedraagt 17 jaar met het nieuwe fiscale regime ten opzichte van 23 jaar met de oude regeling, de dynamische terugverdientijd ligt in beide gevallen nog steeds een pak hoger dan 25 jaar.
- De netto contante waarde voor de investering bedraagt ongeveer -1864 € (ten opzichte van -3 000 €)
- Het interne rendement bedraagt -1 % (ten opzichte van -5 %)

### **Sensitiviteit**

In de volgende sectie waarin een sensitiviteitsanalyse gedaan wordt op de meest relevante parameters, zal in eerste instantie naar een "haalbare" investeringskost (gegeven de eerder toegelichte aannames) gezocht worden, om vervolgens een aantal andere inputparameters te laten variëren en het effect ervan op de haalbaarheid in kaart te brengen. De sensitiviteitsanalyse probeert daarbij het effect van eventueel betere prestaties of andere kosten op de economische haalbaarheid van  $\mu$ WKK in een ééngezinswoning aan te geven.

#### **4.2.2 CO2 besparing**

Voor wat betreft CO2 besparing, gaf het rekenmodel volgende resultaten:

*Tabel 14: CO2 besparing  $\mu$ WKK tov referentiesituatie (EF 0,349 kg CO2/kWh)*

<b>Outputparameter</b>	<b>Waarde</b>
CO2 emissie door aardgasverbruik $\mu$ WKK	4 902 kg CO2
CO2 emissie referentieketel door aardgasverbruik	4 467 kg CO2
Vermeden CO2 emissie door delokale productie elektriciteit	681 kg CO2
Totale nettobalans CO2 emissie tov referentie	246 kg CO2

Zoals in vorige sectie (4.1.8) aangegeven, is de referentie emissiefactor van belang voor het quantificeren van de CO2 besparing. Voor bovenstaande tabel werd de reële emissiefactor voor de Vlaamse elektriciteitscentrales aangenomen, inclusief de nucleaire centrales, zijnde 0,349 kg CO2/kWh. De reductie van CO2 in het

basisscenario bedraagt bijna 250 kg of iets minder dan 5 % ten opzichte van een referentieketel.

In de onderstaande 3 tabellen wordt ter vergelijking ook de situatie getoond wanneer enkel Vlaamse gasgestookte installaties in rekening gebracht worden (0,434 kg CO<sub>2</sub>/kWh), en wanneer de nucleaire centrales buiten beschouwing gelaten worden (0,767 kg CO<sub>2</sub>/kWh). Die laatste situatie is gelijkaardig aan het resultaat waarbij de emissiefactor van het Auditconvenant (0,760 kg CO<sub>2</sub>/kWh) gehanteerd wordt.

Tabel 15: CO<sub>2</sub> besparing μWKK tov referentiesituatie (EF 0,434 kg CO<sub>2</sub>/kWh)

<b>Outputparameter</b>	<b>Waarde</b>
CO <sub>2</sub> emissie door aardgasverbruik μWKK	4 902 kg CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> emissie referentieketel door aardgasverbruik	4 467 kg CO <sub>2</sub>
Vermeden CO <sub>2</sub> emissie door delokale productie elektriciteit	847 kg CO <sub>2</sub>
Totale nettobalans CO <sub>2</sub> emissie tov referentie	412 kg CO <sub>2</sub>

Tabel 16: CO<sub>2</sub> besparing μWKK tov referentiesituatie (EF 0,767 kg CO<sub>2</sub>/kWh)

<b>Outputparameter</b>	<b>Waarde</b>
CO <sub>2</sub> emissie door aardgasverbruik μWKK	4 902 kg CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> emissie referentieketel door aardgasverbruik	4 467 kg CO <sub>2</sub>
Vermeden CO <sub>2</sub> emissie door delokale productie elektriciteit	1 496 kg CO <sub>2</sub>
Totale nettobalans CO <sub>2</sub> emissie tov referentie	1 061 kg CO <sub>2</sub>

Zoals in bovenstaande tabellen te zien is, schommelt de jaarlijks bespaarde hoeveelheid CO<sub>2</sub> alnaargelang de gekozen emissiefactor tussen 246 en 1 061 kg per installatie ofwel 4,7 tot 17,7 % CO<sub>2</sub> besparing ten opzichte van een referentieketel.

In de eenvoudige veronderstelling dat voor het eerder bepaalde marktpotentieel (zie 3.5) met de huidige stand van de technologie in Vlaanderen voor elke aansluiting een dergelijke besparing gemaakt kan worden, zou dit op 300 000 à 600 000 keer 246 tot 1 061 kg CO<sub>2</sub> besparing op jaarbasis komen of ongeveer 75 000 tot 650 000 ton CO<sub>2</sub>. De effectieve besparing per wooneenheid is echter afhankelijk van een heel aantal factoren zoals: het specifieke warmtevraagprofiel (niet elke huishoudelijke aansluiting van het marktpotentieel heeft exact 20 000 kWh aan warmtevraag en ook niet volgens hetzelfde profiel), de dimensionering en gekozen opstelling van een eventuele μWKK installatie, de regeling en aansturing, enz.

#### 4.2.3 (Relatieve) primaire energiebesparing

Om de brandstofbesparing door gebruik van WKK aan te duiden zijn de begrippen primaire energiebesparing en relatieve energiebesparing belangrijk.

Aangenomen dat  $E$ ,  $\eta_E$ ,  $\alpha_Q$ ,  $\alpha_E$ ,  $\eta_Q$  respectievelijk de geproduceerde elektriciteit, het elektrisch rendement van de referentiecentrale, het thermisch rendement van de μWKK, het elektrisch rendement van de referentieketel (in dit geval de condensatieketel) zijn, dan kan de brandstofbesparing of primaire energiebesparing (PEB) als volgt geschreven worden [COGEN Vlaanderen, 2006]:

$$E * (1/\eta_E + \alpha_Q/(\alpha_E * \eta_Q) - 1/\alpha_E)$$

Deze formule wordt ook gebruikt voor het bepalen van het aantal warmtekrachtcertificaten en is gebaseerd op Vlaamse referentierendementen.

Voor het uitgangspunt van het model werden volgende rendementen verondersteld<sup>23</sup>:

- thermisch rendement  $\mu$ WKK: 82 %
- elektrisch rendement van de  $\mu$ WKK: 8 %
- thermisch rendement referentieketel voor Vlaanderen: 90 %
- elektrisch rendement centrale opwekking voor Vlaanderen: 50 %

Voor het vergelijken van verschillende installaties of technologieën (met andere woorden, het bepalen van de kwaliteit van de WKK-installatie) wordt de relatieve primaire energiebesparing (RPEB) gedefinieerd als:

$$1 - 1/(\alpha_Q / \eta_Q + \alpha_E / \eta_E)$$

- thermisch rendement  $\mu$ WKK: 82 %
- elektrisch rendement  $\mu$ WKK: 8 %
- thermisch rendement referentieketel Europa: 90 %
- thermisch rendement centrale opwekking Europa: 45,58 %

Voor WKK-eenheden met een elektrisch vermogen onder 1 MWe, dient de RPEB groter dan nul te zijn, voor WKK-eenheden groter dan 1 MWe moet de RPEB groter dan 10 % zijn om als kwalitatief beschouwd te worden. Voor de berekening van de RPEB worden de Europese referentierendementen aangenomen.

Aangezien de toegepaste referentierendementen bepalend zijn voor het resultaat van de RPEB en PEB zijn ze vaak het onderwerp van discussie. In dit geval werd teruggerepen naar de referentierendementen zoals ze vastgelegd zijn in het besluit van de Vlaamse Regering ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties van 7 juli 2006 [Belgisch Staatsblad1, 2006] en het ministerieel besluit inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties [Belgisch Staatsblad2, 2006]. Ter illustratie wordt in Figuur 15 de RPEB weergegeven in functie van verschillende combinaties van thermische en elektrische rendementen. Merk op dat niet elke theoretische combinatie in de praktijk haalbaar is.

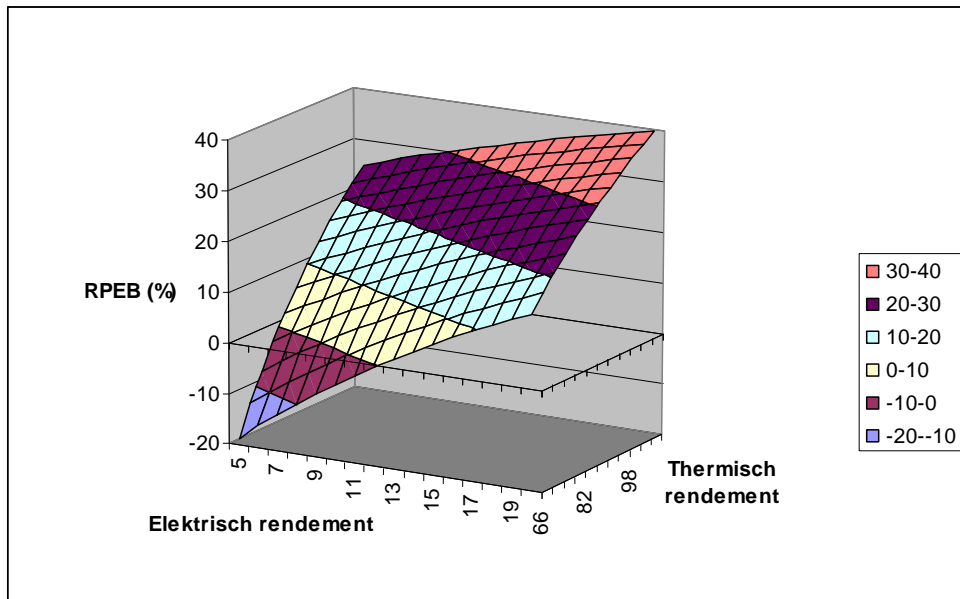
Voor de aangenomen waardes geeft dit in het rekenmodel een **RPEB** van **7,97 %** en een **PEB** (in het geval van een warmtevraag van 20 000 kWh) van ongeveer **1734 kWh**.

Wanneer de totale primaire energiebesparing voor het volledige marktpotentieel berekend wordt, zou dit een besparing van 300 000 à 600 000 keer 1 734 kWh betekenen ofwel 500 GWh tot 1 000 GWh op jaarbasis.

---

<sup>23</sup> Merk op dat deze rendementen afwijken van wat officieel op de technische specificaties van de in het model gebruikte  $\mu$ WKK staat: het elektrisch rendement bedraagt daar bij nominale output (Stirling) 11 tot 12 %, terwijl bij maximale warmte output, dit elektrisch rendement terugvalt op 6 tot 7 %. De aangenomen waardes hier worden verondersteld realistisch te zijn bij toepassing in het veld. Carbon Trust veldtesten toonden eerder al aan dat het jaarlijks elektrisch en thermisch rendement een stuk lager ligt dan wat in de technische specificaties staat. In België hebben er nog geen veldtesten plaatsgevonden waardoor het moeilijk in te schatten is, wat realistische waardes kunnen zijn.

Figuur 15: RPEB in functie van variërende rendementen

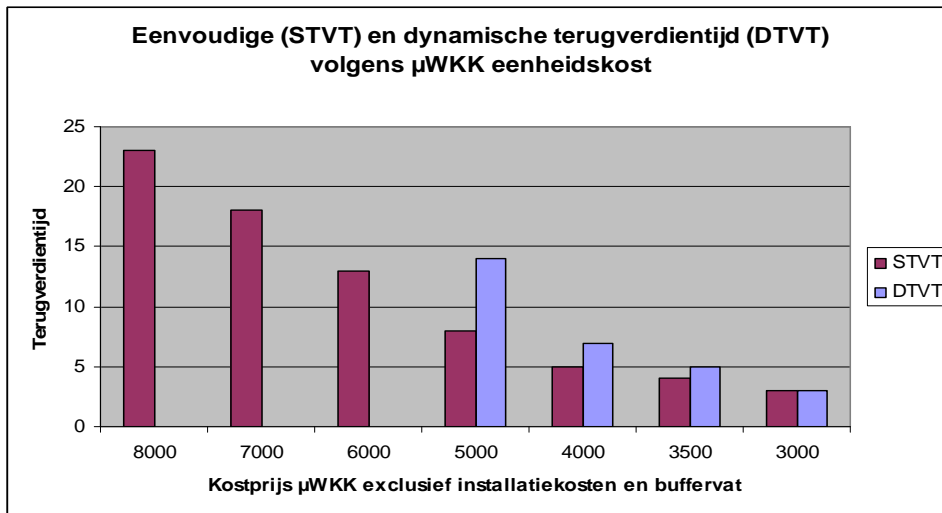


### 4.3 Sensitiviteitsanalyse

#### 4.3.1 $\mu$ WKK eenheidskost

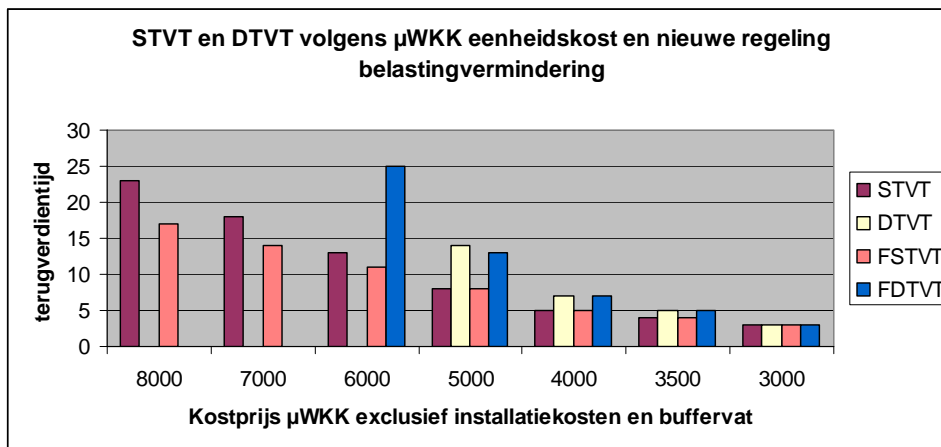
In eerste instantie werd in de sensitiviteitsanalyse een variërende prijs voor de  $\mu$ WKK exclusief het buffervat en de installatiekosten ingegeven. Die laatste twee kostposten werden behouden op respectievelijk 700 en 1 000 €. In figuur 16 is het resultaat terug te vinden: een kostprijs van 3 500 € (ofwel 1 500 € boven de aangenomen kostprijs van een condensatieketel) resulteert in een eenvoudige en dynamische terugverdientijd van respectievelijk 4 en 5 jaar. Voor een eenheidskost van 4 000 € is dit respectievelijk 5 en 7 jaar. Voor een eenheidskost van 5 000 € blijft de dynamische terugverdientijd net onder de aangenomen levensduur. Vanaf 6 000 € wordt de dynamisch terugverdientijd niet meer weergegeven op de grafiek omdat die boven 30 jaar ligt.

Figuur 16: Eenvoudige en dynamische TVT volgens variërende  $\mu$ WKK eenheidskost



De toepassing van de nieuwe regeling met betrekking tot belastingverminderingen, heeft alleen effect bij hele hoge investeringskosten. Bij een  $\mu$ WKK eenheidskost van 5000 € en meer is er een licht positief effect op de terugverdiëntijden merkbaar, dat sterker wordt naarmate de investeringskost hoger ligt. Feit blijft dat die jaarlijkse besparingen echter te laag zijn om de  $\mu$ WKK eenheid terug te verdienen binnen zijn levensduur, tenzij de eenheidskost lager dan of gelijk aan 5000 € is terwijl het fiscale voordeel voor die grootte-orde van investeringen met de nieuwe fiscale regeling ten opzichte van de oude in die specifieke gevallen van lagere eenheidskost dan weer minimaal is: bijna 71 € extra voordeel in het daaropvolgende jaar voor een  $\mu$ WKK met eenheidskost 5000 €. Met andere woorden: ofwel geniet men maximaal van de extra belastingvermindering door een heel hoge investeringskost maar wordt de  $\mu$ WKK niet binnen zijn levensduur terugverdiend, ofwel is de investeringskost van die mate dat de eenheid binnen zijn levensduur terugverdiend kan worden maar in dat geval is het extra fiscale voordeel met de nieuwe regeling heel beperkt.

*Figuur 17: Eenvoudige en dynamische TVT volgens variërende  $\mu$ WKK eenheidskost, nieuwe fiscale regeling*



Voor de net present value en de IRR kunnen de resultaten respectievelijk teruggevonden worden in Figuur 18 en Figuur 19. De IRR fluctueert daarbij van -5 % tot 35 % en bedraagt bij een eenheidskost van 3500 € 23 %. De NPV varieert volgens de verschillende  $\mu$ WKK eenheidskosten van -3035 tot 1540 €. In het geval van een eenheidskost van 3500 € bedraagt de NPV 1207 €.

De invloed van de nieuwe fiscale regeling is terug te vinden in Figuur 19 en Figuur 21. Daarbij worden vooral de negatieve resultaten bij de hoogste eenheidskost verzacht: de IRR fluctueert dan nog van -1 % tot 35 % en de NPV van -1864 € tot 1540 € waarbij de IRR en NPV bij een eenheidskost van 3500 € ongewijzigd blijven ten opzichte van de oude fiscale regeling. Met de gegeven aannames is het positieve effect van de nieuwe fiscale regeling eerder beperkt doordat ze enkel een relevante invloed uitoefent bij hoge investeringskosten die nooit terugverdiend kunnen worden.

Wanneer echter met de inputparameters van het rekenmodel gespeeld wordt en bijvoorbeeld volgende aannames gelden (door bijvoorbeeld verdere verbeteringen van de technologie en een iets lagere prijs dan de huidige prijzen):

- een hoger jaarlijks elektrisch rendement: 10 % (tov 8 % van het basisscenario)
- zelfde thermisch rendement: 82 %
- eenheidskost 6000 € (basisscenario: 8000 €, referentiescenario sensitiviteit: 3500 €)
- systeemkost 8160 €

dan worden met de nieuwe fiscale regeling volgende resultaten bekomen

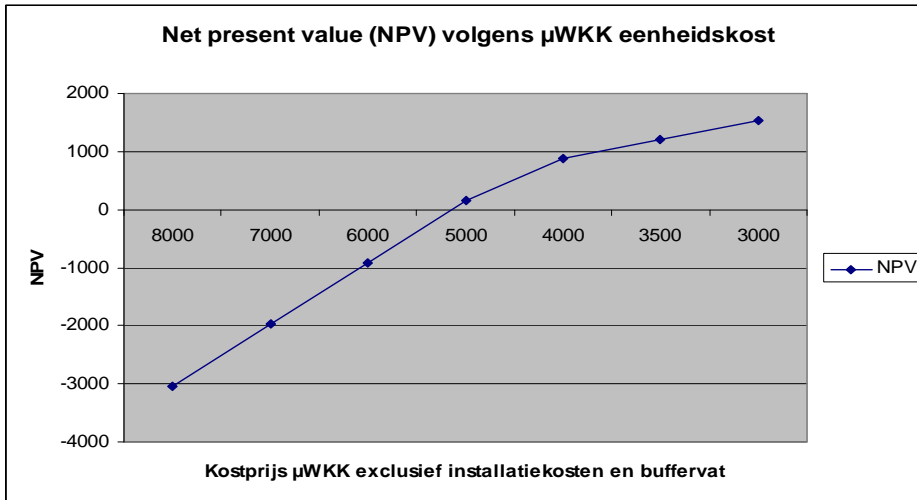
- STVT: 7 jaar
- DTVT: 11 jaar
- NPV: 543 €
- IRR: 10 %.

Ter vergelijking de resultaten met zelfde aannames maar met de oude fiscale regeling:

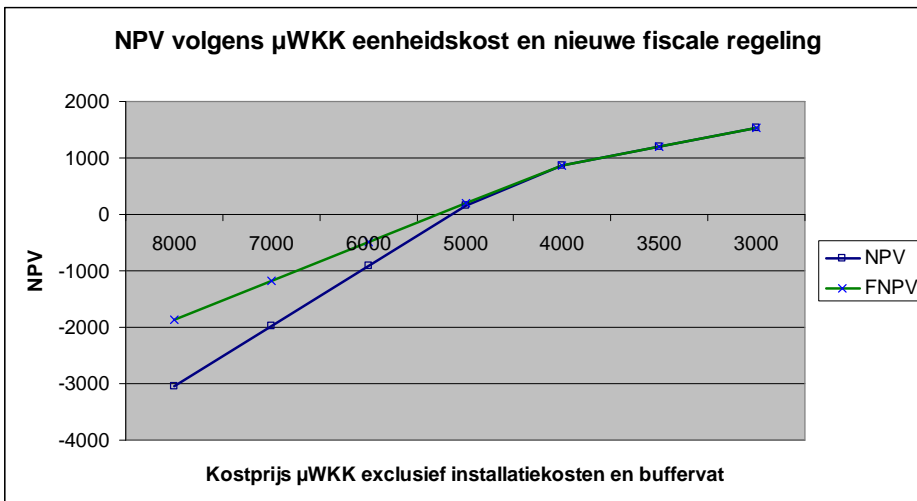
- STVT: 8 jaar
- DTVT: 14 jaar
- NPV: 111 €
- IRR: 8 %.

Een correcte aanname van een praktisch realiseerbaar jaarlijks elektrisch rendement heeft dus ook een invloed op de beoordeling van steunmaatregelen voor economische haalbaarheid.

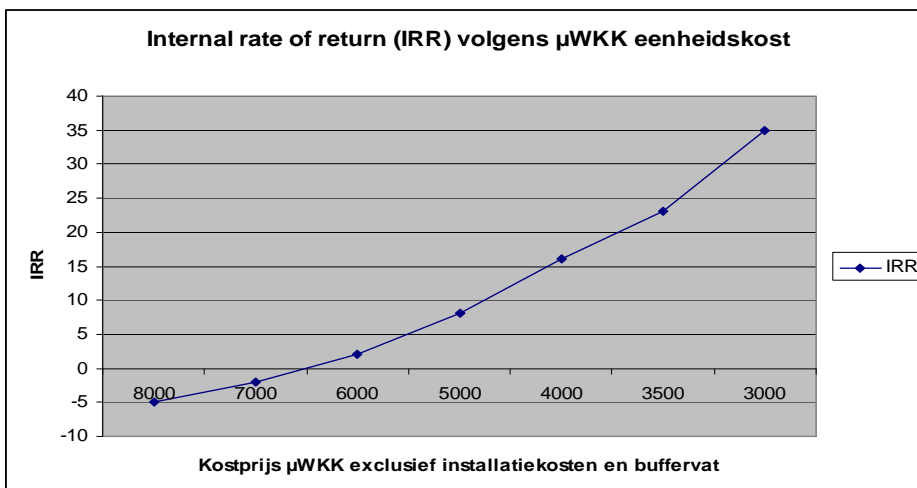
Figuur 18: NPV volgens variërende  $\mu$ WKK eenheidskost



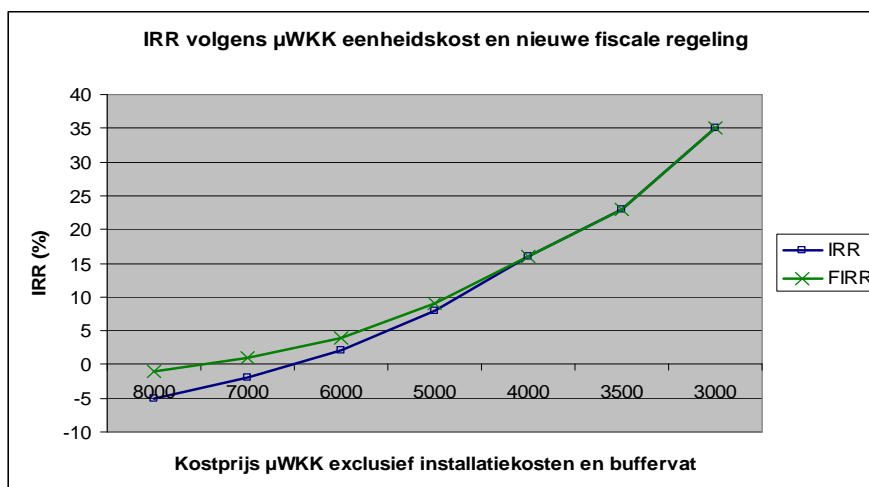
Figuur 19: NPV volgens variërende eenheidskost en nieuwe fiscale regeling



Figuur 20: IRR volgens variërende  $\mu$ WKK eenheidskost





Figuur 21: IRR volgens variërende  $\mu$ WKK eenheidskost en nieuwe fiscale regeling

In de volgende onderdelen van de sensitiviteitsanalyse zal altijd uitgegaan worden van het nieuwe basisgeval waarbij de eenheidskost van een  $\mu$ WKK eenheid 3500 € bedraagt én zonder rekening te houden met de recente nieuwe fiscale regeling die zal gelden vanaf aanslagjaar 2010, tenzij expliciet anders vermeld. De totale systeemkost voor  $\mu$ WKK bedraagt in dat geval 5512 €, wat een meerkost betekent van 1590 € ten opzichte van een gewone condensatieketel.

#### 4.3.2 Verkoopprijs warmtekrachtcertificaten

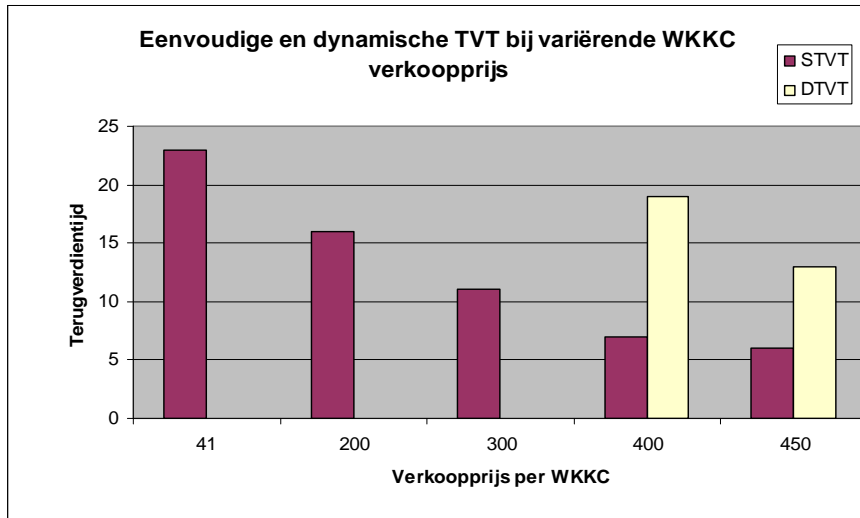
Eerder was al aangegeven dat er in de standaard situatie uitgegaan werd van een gemiddelde verkoopprijs van de door de  $\mu$ WKK eenheid gegenereerde warmtekrachtcertificaten aan 41 € per certificaat. Aangezien die prijs op de markt tot stand komt is die niet gegarandeerd. Bijgevolg werden verschillende mogelijke waarden voor de verkoopprijs van WKC's in het model ingegeven, vertrekkende van een basiseenheidsprijs voor  $\mu$ WKK van 3 500 € ipv 8 000 €.

De prijs van de WKC's kreeg volgende mogelijke waarden: 27, 31, 35, 39, 41 en 45 € waarbij de eerste de gegarandeerde minimumprijs is die een DNB betaalt voor een WKC terwijl 45 € de boeteprijs is.

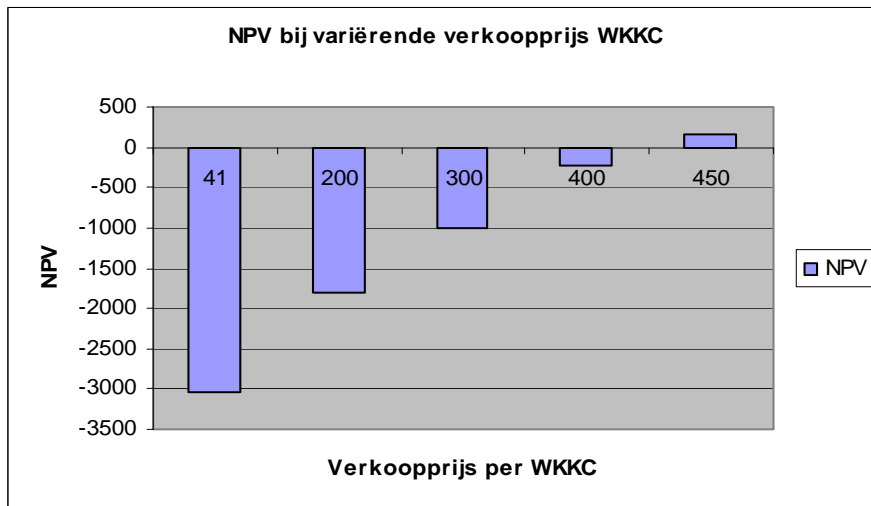
De impact van de prijs van WKC's op het totaalplaatje is heel beperkt: in alle gevallen bleef de eenvoudige en dynamische terugverdientijd respectievelijk 4 en 5 jaar. De IRR varieerde van 21 tot 24 % met stijgende WKC prijzen en de NPV liep op van 1098 € tot 1 239 €.

Voor de volledigheid werd de inputparameter eenheidskost van 8 000 € voor een  $\mu$ WKK eenheid teruggezet en een fictieve WKC prijs ingegeven van 200, 300, 400 en 450 € ingegeven om het effect na te gaan op de economische haalbaarheid. De resultaten zijn terug te vinden in Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24. In Figuur 22 worden dynamische terugverdientijden boven 20 jaar niet weergegeven. Bij een verkoopprijs van 450 € per warmtekrachtcertificaat wordt de eenvoudige terugverdientijd bijvoorbeeld 6 jaar, de dynamische terugverdientijd 13 jaar en de IRR en NPV respectievelijk 8% en 157 €.

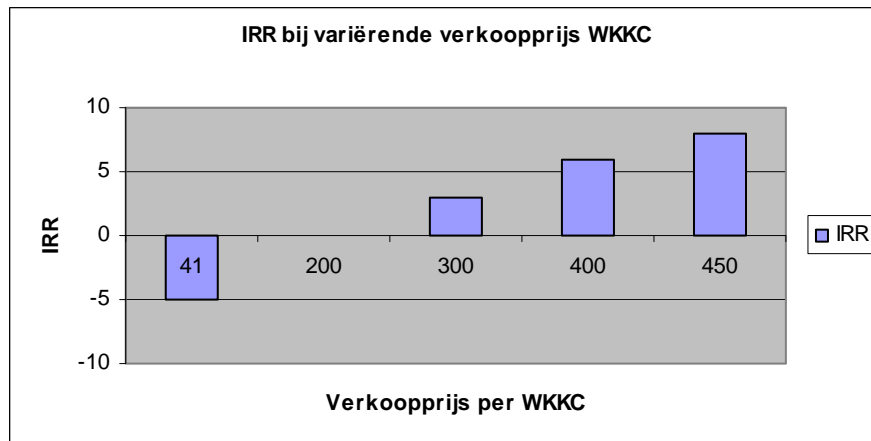
Figuur 22: TVT bij variërende verkoopprijs WKC & initiële eenheidskost  $\mu$ WKK 8000 €



Figuur 23: IRR bij variërende verkoopprijs WKC & initiële eenheidskost  $\mu$ WKK 8000 €



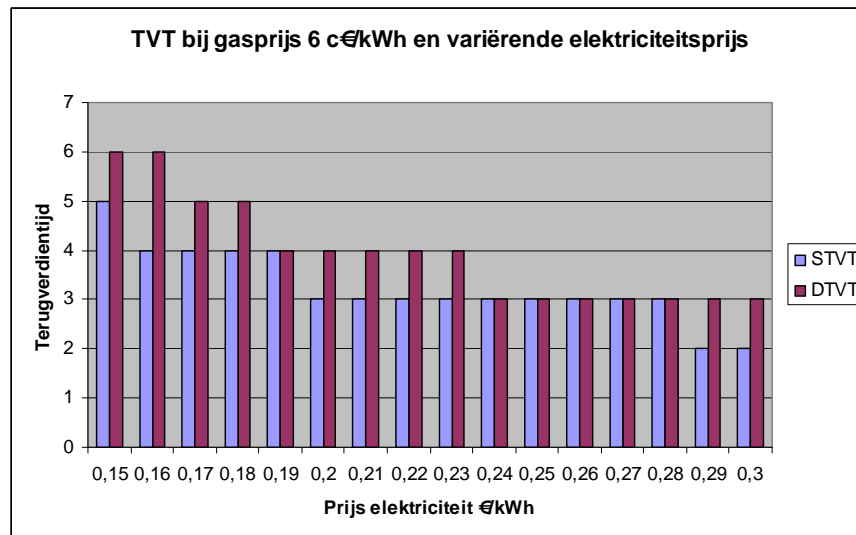
Figuur 24: IRR bij variërende verkoopprijs WKC & initiële eenheidskost  $\mu$ WKK 8000 €.



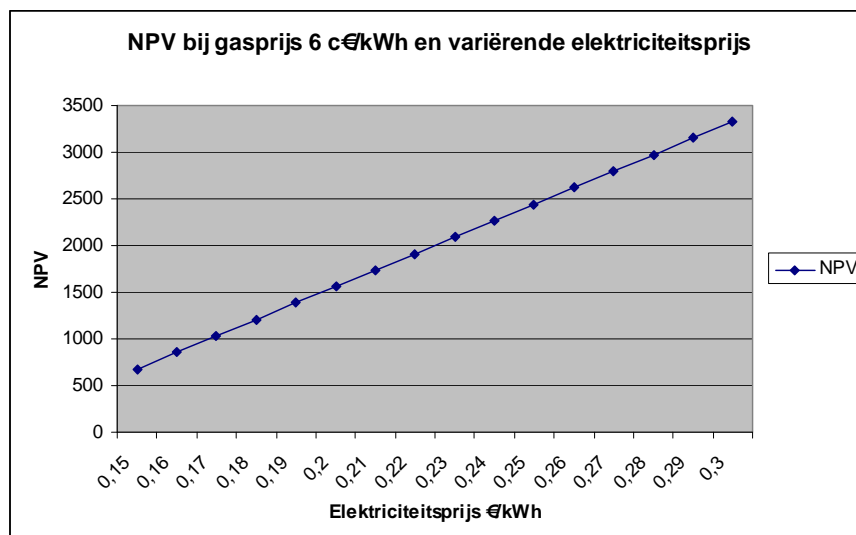
### 4.3.3 Elektriciteit en gasprijs

In het uitgangspunt werd een elektriciteitsprijs van 0,18 €/kWh en een gasprijs van 0,06 €/kWh verondersteld. In de volgende sensitiviteitsanalyse werd met beide inputparameters gespeeld om na te gaan wat het effect ervan is op de economische haalbaarheid. Zo werd de elektriciteitsprijs gevarieerd van -16,7 % of 0,15 €/kWh tot + 66,7 % of 0,3 €/kWh terwijl de aardgasprijs op 0,06 €/kWh behouden werd. In dit geval varieerde de resulterende eenvoudige (dynamische) terugverdiëntijd van 5 (6) tot 2 (3) jaar bij stijgende elektriciteitsprijzen. De NPV liep van 678 € tot 3 327 € waarbij 1 207 € het resultaat van de initiële situatie was. Met ander woorden, bij een minder gunstige aanname van elektriciteitsprijzen voor  $\mu$ WKK daalde de NPV maximaal met -44% (bij 16,7 % lagere elektriciteitsprijsaanname) en bij gunstiger aannames (+ 66,7 %) steeg de NPV tot 175 % van zijn oorspronkelijke waarde, wat een duidelijk belangrijke invloed van de verkoopsrijs van elektriciteit aangeeft.

*Figuur 25: Eenvoudige en dynamische TVT bij variërende elektriciteitsprijs*

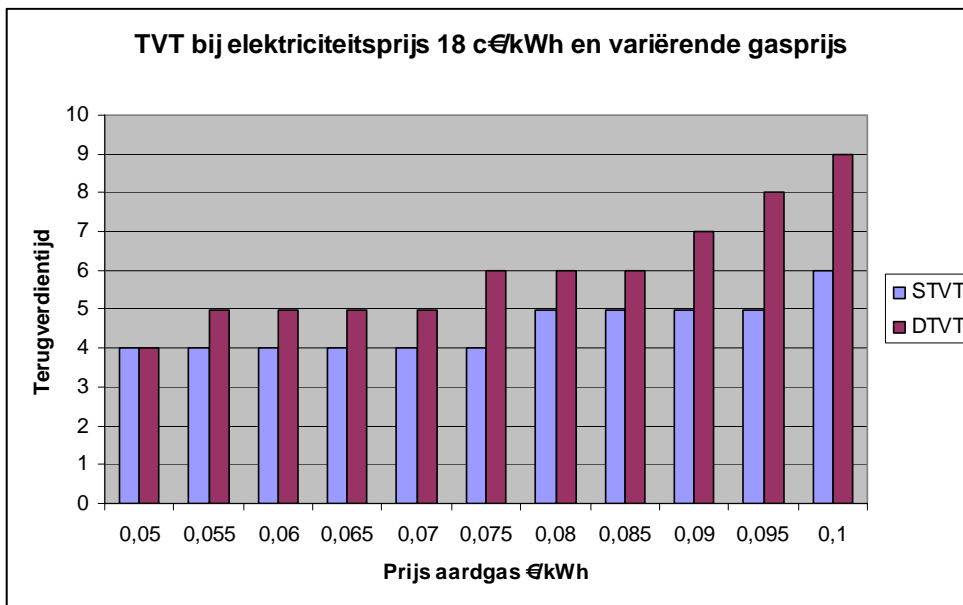


*Figuur 26: NPV bij variërende elektriciteitsprijs*

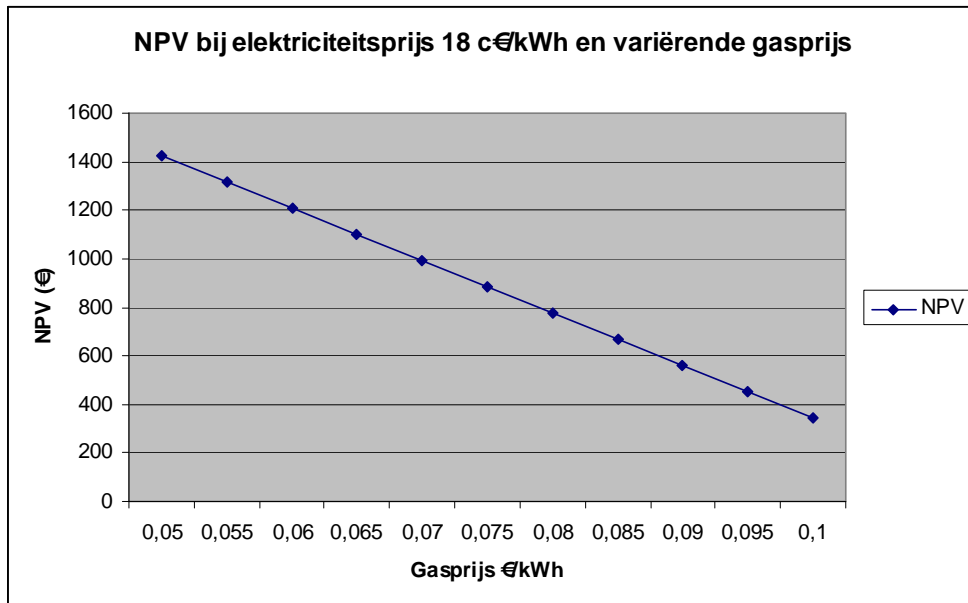


Eenzelfde variatierange gebeurde voor aardgas, namelijk van 0,05 tot 0,1 €/kWh, waarbij de elektriciteitsprijs op 0,18 €/kWh behouden werd. De resultaten van een variërende gasprijs kunnen als volgt samengevat worden. De eenvoudige (dynamische) terugverdientijd varieerde van 4 (4) tot 6 (9) jaar bij hogere aardgasprijzen terwijl de NPV varieerde van 1 423 € tot 344 € bij hogere aardgasprijsaannames. De invloed van de aanname van aardgas is dus minder groot bij dezelfde procentuele verschillen in aannames als bij elektriciteit wat logisch is gezien de lagere prijs van aardgas ten opzichte van elektriciteit.

*Figuur 27: Eenvoudige en dynamische terugverdientijd bij variërende gasprijs*



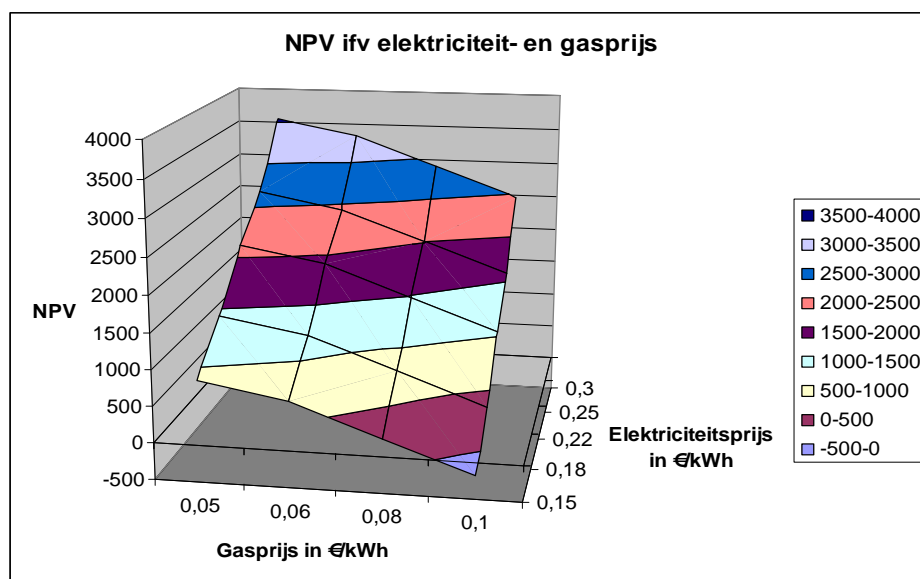
Figuur 28: NPV bij variërende gasprijs



Vervolgens werd dezelfde oefening nog eens tegelijk op elektriciteit- en gasprijs uitgevoerd: beide prijzen werden tegelijk afwijkend ingegeven om het globale effect op terugverdientijden en NPV en IRR te kunnen inschatten. Niet alle resulterende grafieken zijn in dit rapport opgenomen, enkel de meest relevante.

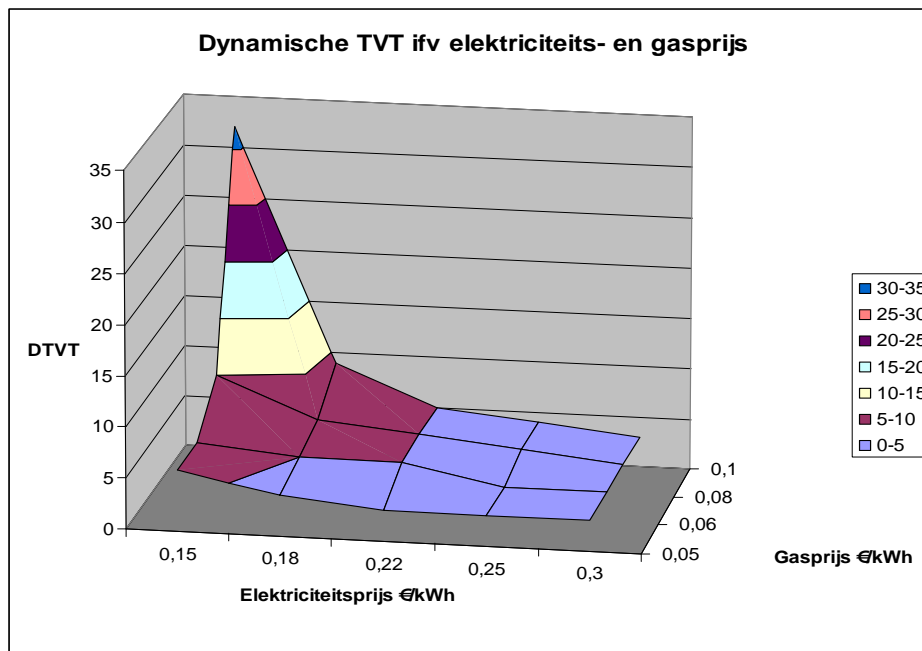
Voor de eenvoudige terugverdientijd bleven alle resulterende combinaties onder 15 jaar (maximaal 11 jaar). De NPV (zie Figuur 29) varieerde van -186 € voor de slechtste combinatie (aardgas 0,1 €/kWh en elektriciteit 0,15 €/kWh) tot 3 542 € voor de voordeligste combinatie van goedkoop aardgas en dure elektriciteit (respectievelijk 0,05 €/kWh en 0,3 €/kWh) wat nogmaals aantoonde dat vooral dure elektriciteit zorgt voor economische haalbaarheid van  $\mu$ WKK.

Figuur 29: NPV in functie van variërende elektriciteit- en gasprijzen



De dynamische terugverdiëntijd (zie Figuur 30) lag respectievelijk tussen 3 en 32 jaar voor de meest voordelige en meest nadelige combinatie. Uit de figuur blijkt ook dat enkel de meest nadelige combinatie (0,15 €/kWh elektriciteit en 0,1 €/kWh aardgas) een DTVT geeft van meer dan 15 jaar.

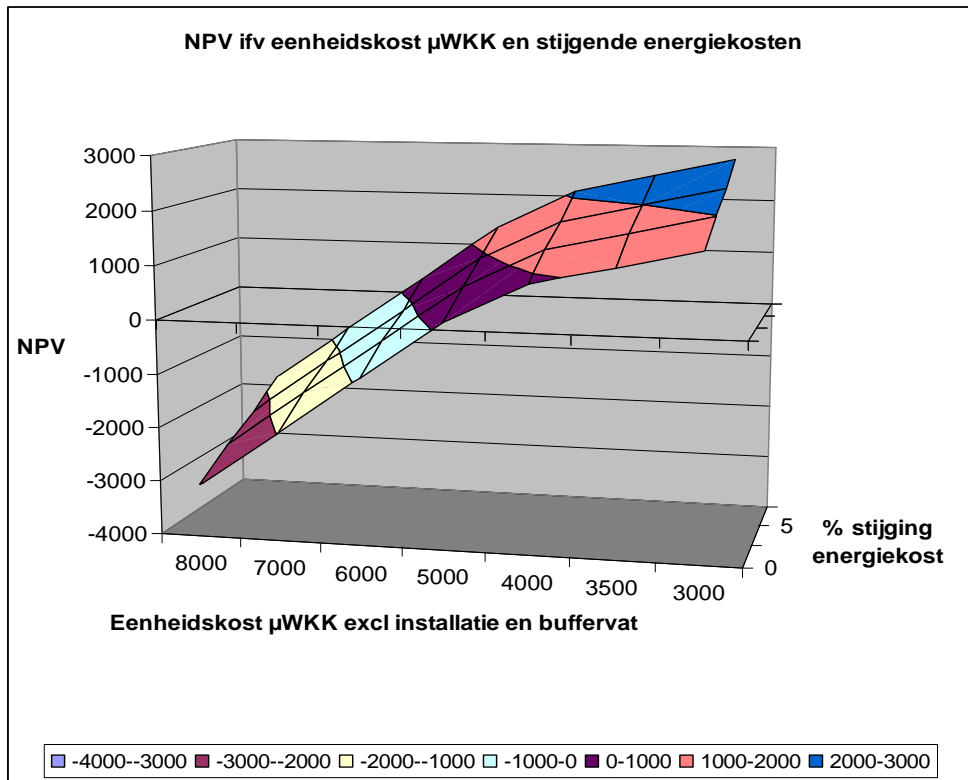
Figuur 30: Dynamische TVT in functie van variërende elektriciteits- en gasprijs



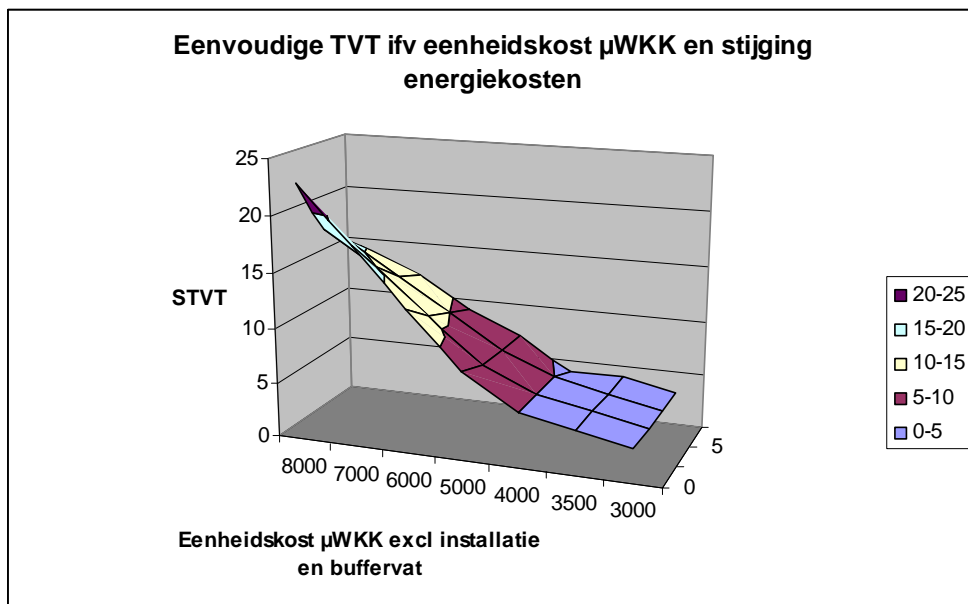
Tot slot werd ook nog even berekend wat een stijging van de energiekosten met verschillende percentages (bovenop de normale inflatie) zou betekenen voor de economische haalbaarheid.

Niet alle bekomen grafieken in het rapport zijn opgenomen. In figuur 31 en figuur 32 dat bij voldoende (5 à 7 %) jaarlijkse stijging van de kostprijs van aardgas en elektriciteit (bovenop normale inflatie) onder voorwaarde dat beiden eenzelfde procentuele stijging ondergaan,  $\mu$ WKK met Stirlingkarakteristieken financieel haalbaar wordt vanaf een eenheidskost van 4 000 € ipv 3 500 € bij het uitgangspunt zonder stijgende energiekosten. Bij een jaarlijkse stijging van bijvoorbeeld 7 % wordt de IRR bij eenheidskost 4 000 € 23 % (zelfde IRR bij 3 500 € eenheidskosten en zonder stijgende energiekosten), de STVT (DTVT) wordt dan 4 (6) jaar (ten opzichte van 4 (5) jaar bij het uitgangspunt) en de NPV tenslotte wordt dan 2 090 € ten opzichte van 1 207 € bij het uitgangspunt van een eenheidskost van 3 500 €.

Figuur 31: NPV ifv eenheidskost  $\mu$ WKK en stijgende energiekosten



Figuur 32: Eenvoudige TVT ifv eenheidskost  $\mu$ WKK en stijgende energiekosten



### 4.3.4 Buffervatvariaties, warmtevraag en wisselwerking met elektrisch rendement

Verreweg de moeilijkste parameter om betrouwbare informatie over te vinden of te berekenen is de (jaarlijkse) elektriciteitsproductie bij een  $\mu$ WKK installatie in een ééngezinwoning en daarmee samenhangend het jaarlijkse elektrisch rendement. Bovendien is de definitie van dit rendement nog onderhevig aan discussie. In dit geval wordt het gemiddeld jaarlijks elektrisch rendement als volgt gedefinieerd:  $E_{out}/Gas_{in}$  met  $E_{out}$  als totale jaarlijks geproduceerde elektriciteit en  $Gas_{in}$  de totale jaarlijkse gasconsumptie in kWh (onderwaarde). Het thermisch rendement wordt dan gedefinieerd als  $Q_{out}/Gas_{in}$  waarbij  $Q_{out}$  de geproduceerde warmte is. Deze waarden zijn in principe van nog een heel aantal verschillende factoren afhankelijk (werkingstemperatuur van het verwarmingssysteem, verliesposten, enz.). In het uitgangspunt zijn we uitgegaan van een warmtevraag van 20 000 kWh op jaarbasis en een buffervat van 300 liter gecombineerd met een  $\mu$ WKK met de typische output vermogens van de aangenomen  $\mu$ WKK eenheid.

Met behulp van TRNSYS werden verschillende warmtevraagprofielen voor verschillende types woningen gesimuleerd en vervolgens gecombineerd met een eenvoudige regeling voor de  $\mu$ WKK in combinatie met een buffervat. De resultaten van dat model gaven een indicatie voor het jaarlijkse rendement.

Afhankelijk van een grote of kleine warmtevraag, een groot of kleiner buffervat zal er in eerste instantie een invloed zijn op de jaarlijkse elektriciteitsproductie en het elektrisch rendement, ... en bijgevolg in tweede instantie ook op de investeringskost (een kleiner buffervat betekent een lagere investeringskost) en de gerealiseerde variabele kosten en opbrengsten. In alle gevallen is er dus een economische en ecologische impact gezien de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit en verbruikte brandstof bepalend is voor het primair energieverbruik, CO<sub>2</sub> uitstoot en besparingen in de zin van lokaal opgewekte elektriciteit.

Om een inzicht te krijgen in de impact van die verschillende parameters, wordt de waarde ervan gewijzigd.

In eerste instantie wordt vertrekend van de warmtevraag van de uitgangssituatie (warmtevraagprofiel horend bij een jaarlijkse warmtevraag van 20 000 kWh) een kleiner en groter buffervat in aanmerking genomen met de daarmee gepaard gaande effecten.

In de volgende punten worden enkele andere elektrische rendementen aangenomen en tot slot wordt voor verschillende warmtevraagprofielen, gaande van laag naar hoog, gesimuleerd wat het totaal effect op de resultaten van het model zijn.

#### 4.3.4.1 Andere dimensies buffervaten bij zelfde jaarlijkse warmtevraag 20 000 kWh

##### **Buffervat 50 liter**

De belangrijkste conclusies uit deze oefening zijn de volgende:

- Door het niet-modulerende karakter van de gebruikte  $\mu$ WKK eenheid en de heel beperkte buffercapaciteit was het nagenoeg onmogelijk om binnen de grenzen van de buffer te blijven, tegelijk aan de warmtevraag te voldoen én te voldoen aan de voorwaarde om minstens een half uur en bij voorkeur een volledig uur te runnen. Dit resulteerde in een laag aantal volle draaiuren van de Stirling (half zo laag als bij het uitgangspunt), relatief veel gebruik van de hulpbrander (dubbel zo veel ten opzichte van het uitgangspunt), momentane overschotten en tekorten van energie, een groter aantal start/stops (1/3



meer) en een berekend globaal jaarlijks elektrisch rendement dat een stuk lager ligt dan het uitgangspunt (rond 6 % ipv 8 %)

- In de praktijk zou het mogelijk zijn om het model aan te passen door bijvoorbeeld kortere runtijden toe te laten en een optimalere regeling uit te werken. De resultaten duiden er al op dat de beperkte flexibiliteit van output van de  $\mu$ WKK eenheid en de beperkte capaciteit van het buffervat tot nog slechtere resultaten leiden dan die in het eerste puntje vermeld (het uitgangspunt).
- Bij variatie met eenzelfde opstelling maar een lager warmteprofiel (rond 11 000 kWh en 17 000 kWh) blijft het probleem van de warmteoverschotten door de opgelegde beperking van minstens een half uur runtijd. De warmtetekorten worden daar echter wel sterk beperkt. Een flexibeler regeling die kortere runtijden toelaat zou tot goede warmtevoorziening leiden. Fabrikanten geven echter aan dat de  $\mu$ WKK's het best presteren wanneer voldoende lange runtijden gerespecteerd worden, zoniet bestaat het risico dat de performance te sterk daalt.
- Uitgaande van de beperktere productie van elektriciteit door het meer intermitterend werken van de  $\mu$ WKK zal het economische plaatje voor een dergelijke opstelling duidelijk minder positief zijn: een eenvoudige terugverdiensijd van 7 jaar en dynamische terugverdiensijd van 11 jaar tegenover respectievelijk 4 en 5 jaar bij het uitgangspunt (zelfde veronderstelling van eenheidskost van 3 500 € en rekening houdend met een lagere buffervatkost, 235 € ipv 700 €). De NPV (216 €) en IRR (10 %) liggen eveneens beduidend lager dan bij het uitgangspunt.

### **Buffervat 150 liter**

De belangrijkste conclusies uit deze oefening zijn de volgende:

- Door het niet-modulerende karakter van de  $\mu$ WKK eenheid en de beperkte buffercapaciteit waren er ook hier problemen om binnen de grenzen van de buffer te blijven, tegelijk aan de warmtevraag te voldoen én te voldoen aan de voorwaarde om minstens een half uur en bij voorkeur een volledig uur te runnen. Dit resulteerde nog steeds in een hoger aantal halve draaiuren van de Stirling ten opzichte van het aantal volledige uren, nog steeds bijna half zoveel gebruik van de hulpbrander en momentane overschotten en tekorten van energie, bijna 20 % meer start/stops en een berekend globaal jaarlijks elektrisch rendement lager dan het uitgangspunt (rond 7,3 % ipv 8 %)
- Bij het aanleggen van een lager warmteprofiel voor dezelfde opstelling (rond 11 000 kWh en 17 000 kWh) blijft het probleem van de warmteoverschotten door de opgelegde beperking van minstens een half uur runtijd. De warmtetekorten worden daar echter wel sterk beperkt. Bij 17 000 kWh warmtevraag, is het gebruik van de hulpbrander vergelijkbaar met de uitgangssituatie hoewel de Stirling in 2/3 van de opstartgevallen maar een half uurtje draait. In dat laatste geval is het economische plaatje doenbaar maar niet schitterend: een STVT van 5 jaar en een dynamische van 7 jaar, een NPV van 579 € en een IRR van 15 %. Een flexibelere regeling met kortere runtijden zou een betere matching vraag-aanbod van warmte zeker mogelijk maken maar ook hier geldt dat in dat geval het globale elektrische rendement zal dalen wat eveneens een negatieve invloed zal hebben op de economische rendabiliteit.
- Uitgaande van de beperktere productie van elektriciteit door het meer intermitterend werken van de  $\mu$ WKK is het economische plaatje voor een dergelijke opstelling minder positief dan het uitgangspunt: een STVT (DTVT) van 5 (6) jaar en een NPV van 856 € tov 1 207 € bij een buffervat met kostprijs 465 €. De IRR bedraagt 19 % ipv 23 %.

### **Buffervat 500 liter**

De belangrijkste conclusies uit deze oefening zijn de volgende:

- Door het grote buffervat kan in 2/3 van de gevallen de Stirling volledige uren draaien.
- Er kan perfect aan de warmtevraag voldaan worden zonder relevante overschotten of tekorten.
- De hulpbrander wordt minder aangesproken dan bij het uitgangspunt hoewel dit niet al te veel verschilt (12 % minder)
- Het aantal start/stops ligt 20 % lager dan bij het uitgangspunt
- Het berekende jaarlijkse rendement ligt (beperkt) hoger dan bij het uitgangspunt: 8,3 % tov 8 %
- Het economische plaatje is positiever dan het uitgangspunt maar niet spectaculair: de eenvoudige en dynamische terugverdientijd zijn beiden 4 jaar (ten opzicht van 4 en 5 jaar bij het uitgangspunt), de NPV bedraagt 1 359 € tov 1207 € en de IRR 25 % ipv 23 % (veronderstelling van een kostprijs van 900 € voor het buffervat).

### **Conclusies buffervatvariaties**

Het totale thermische vermogen van de gebruikte  $\mu$ WKK (13,2 kWth) is kleiner dan sommige momentane energievragen van woningen. Bovendien is de  $\mu$ WKK niet modulerend waardoor de flexibiliteit beperkt is. Zonder een buffervat of met een heel beperkt buffervat van 50 liter, leidt die rigiditeit bij verplicht opleggen van runs van een half of een volledig uur tot veel starts en stops en onvoldoende beantwoorden aan de warmtevraag (warmteoverschotten of erger, tekorten), waardoor het rendement van de  $\mu$ WKK negatief beïnvloed wordt. Het toelaten van runtijden van minder dan een half uur bij woningen met een lager warmtevraagprofiel kan het gebruik van een  $\mu$ WKK wel toelaten maar is vanuit economisch perspectief niet aan te raden wegens de te geringe elektriciteitsproductie. Veldtesten in Nederland met een buffervat van 80 liter bevestigden dit.

Een voldoende groot buffervat laat toe om flexibeler in te spelen op de warmtevraag en om warmtetekorten of overschotten te beperken of te vermijden, en om voldoende elektriciteit te kunnen opwekken die dan weer een positieve invloed heeft op de economische haalbaarheid.

Een buffervat van 150 l lijkt het absolute minimum vanuit economisch perspectief, hoewel er dan frequent problemen opduiken met de juiste afstemming van vraag en aanbod van warmte bij de minimum voorwaarde van een half uur runtijd. Wanneer het aangelegde warmteprofiel lager ligt (jaarlijks ongeveer 17 000 kWh) wordt de matching vraag-aanbod doenbaar en treden er zo goed als geen tekorten op maar wel overschotten die met een soepeler aansturing (maar bijgevolg nog minder rendement en dus een negatieve economische impact) verholpen kunnen worden.

Het ideale geval lijkt een buffer rond 300 liter te zijn voor de warmtevraag van 20 000 kWh (het uitgangspunt): er treden geen warmteoverschotten op en ook structurele warmtetekorten worden vermeden zonder dat daarvoor een al te hoge investeringskost tegenover staat. Een buffer van 500 liter laat nog meer flexibiliteit toe voor dezelfde warmtevraag maar wordt vanuit praktisch oogpunt relatief groot voor installatie. Bij hogere jaarlijkse warmtevragen, richting 25 000 kWh zou een buffervat van 300 liter nog volstaan maar bij simulaties met jaarlijkse warmtevragen hoger dan 25 000 kWh blijkt uit het model een structureel tekort aan thermisch vermogen om aan de warmtevraag te voldoen, zelfs met een buffervat van 500 liter. De economische winst met een buffervat van 500 liter ten opzichte van 300 liter is eerder beperkt.

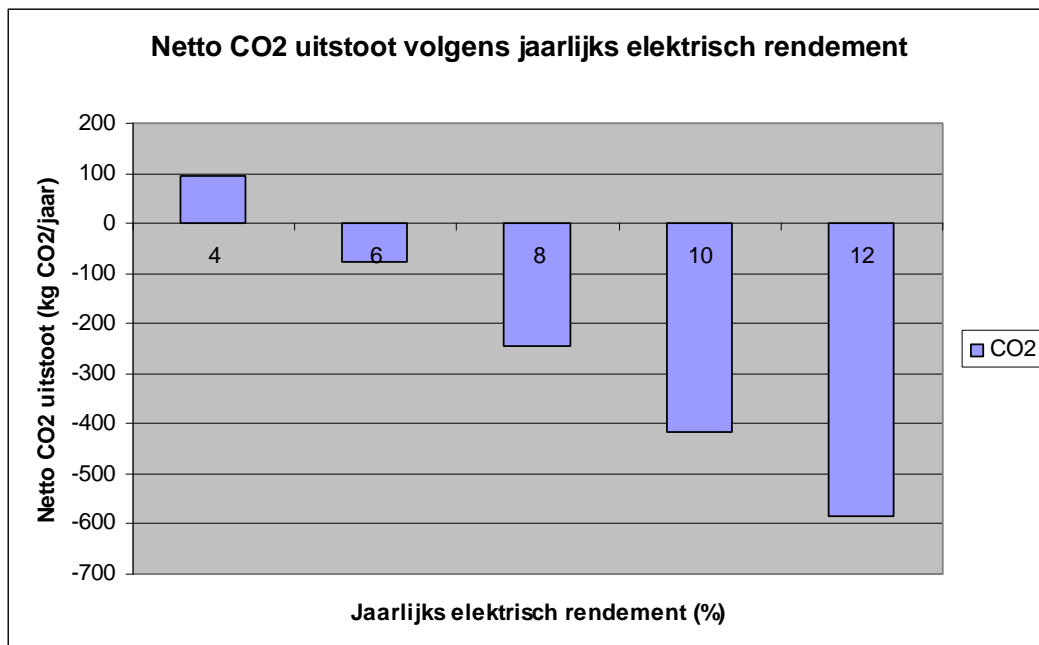
De ideale dimensionering voor de bewuste  $\mu$ WKK eenheid lijkt dus een buffervat van 300 tot 500 liter te zijn met een zo hoog mogelijke warmtevraag vanuit economisch standpunt maar niet hoger dan 25 000 kWh om structurele warmtetekorten te vermijden. Vanuit praktisch oogpunt kan een 500 litervat minder handig zijn door de grote omvang.

#### 4.3.5 Aantal draaiuren Stirling, elektriciteitsproductie en elektrisch rendement

Het totaal aantal (kwaliteitsvolle) draaiuren van de Stirling, en dus de elektriciteitsproductie, kan cruciaal zijn voor de economische haalbaarheid van de  $\mu$ WKK. Zoals eerder aangegeven bedraagt het elektrisch rendement van de gebruikte  $\mu$ WKK Stirlingmotor in theorie 11 tot 12 % en met ingeschakelde bijbrander 6 tot 7 %. Het globale jaarlijkse rendement wordt echter nog beïnvloed door standby verliezen, verliezen bij werking, start- en stopverliezen enzoverder. Jaarlijkse elektrische rendementen in de praktijk (veldtesten) worden niet zo vaak vrijgegeven. De Carbon Trust studie [Carbon Trust, 2007] duidde reeds aan dat die rendementen vaak een stuk lager liggen dan de technische specificaties van de toestellen. Om de invloed van deze parameter te kunnen inschatten worden enkele variaties ingebracht, waarbij verondersteld wordt dat het thermische rendement op 82 % behouden blijft.

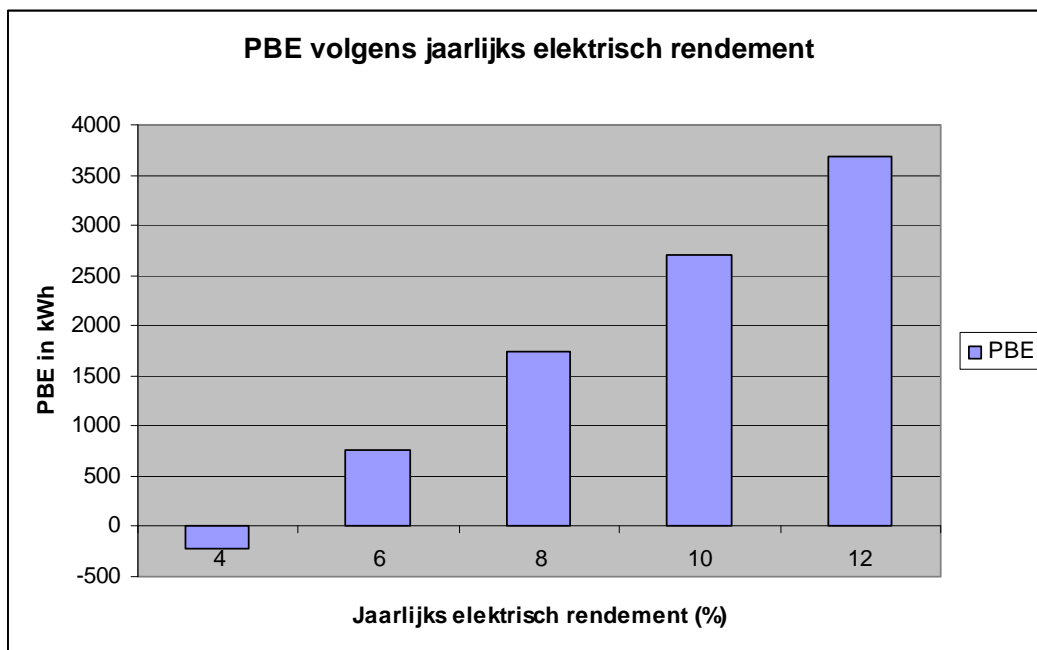
De ecologische invloed van het elektrisch rendement wordt duidelijk in Figuur 33 en Figuur 34. Bij een te laag elektrisch rendement wordt de relatieve primaire energiebesparing negatief: bij 4 % bijvoorbeeld zal er extra CO<sub>2</sub> uitstoot zijn door de toepassing van  $\mu$ WKK en zal er een negatieve primaire energiebesparing zijn.

Figuur 33: Netto CO<sub>2</sub> uitstoot variërend volgens jaarlijks elektrisch rendement<sup>24</sup>



<sup>24</sup> Hierbij werd de gemiddelde CO<sub>2</sub> emissiefactor voor het volledige Vlaamse elektriciteitspark genomen, zijnde 0,349 kg CO<sub>2</sub>/kWh.

*Figuur 34: PBE variërend volgens verschillend jaarlijks elektrisch rendement van de  $\mu$ WKK*

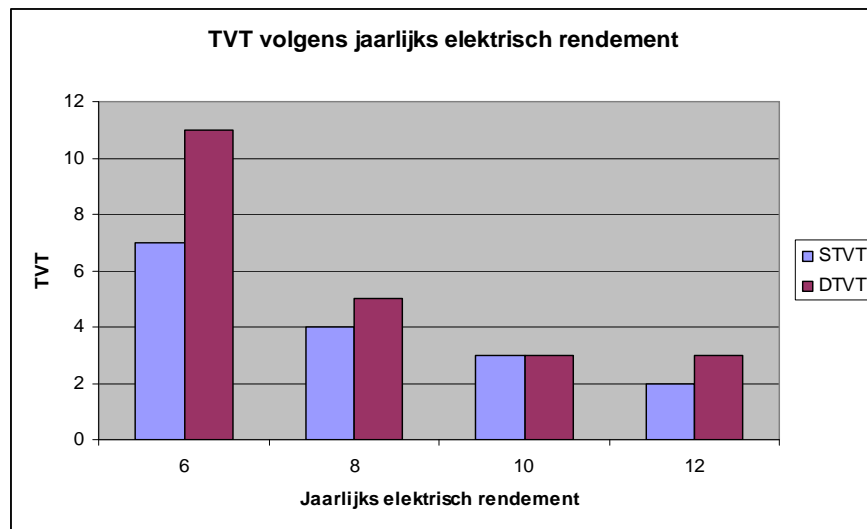


De invloed van het elektrisch rendement op de economische haalbaarheid wordt duidelijk in figuur 35, 36 en 37. In figuur 35 wordt de terugverdiëntijd voor een jaarlijks elektrisch rendement van 4 % niet weergegeven aangezien die meer dan 20 jaar bedraagt. Voor 10 % jaarlijks elektrisch rendement bedraagt zowel de eenvoudige als dynamische terugverdiëntijd 3 jaar. De NPV wordt positief vanaf 6 % jaarlijks elektrisch rendement terwijl een IRR boven 20 % bereikt wordt bij minstens 8 % jaarlijks elektrisch rendement. Hierbij werd steeds uitgegaan van een eenheidskost voor de  $\mu$ WKK van 3 500 € (uitgangspunt).

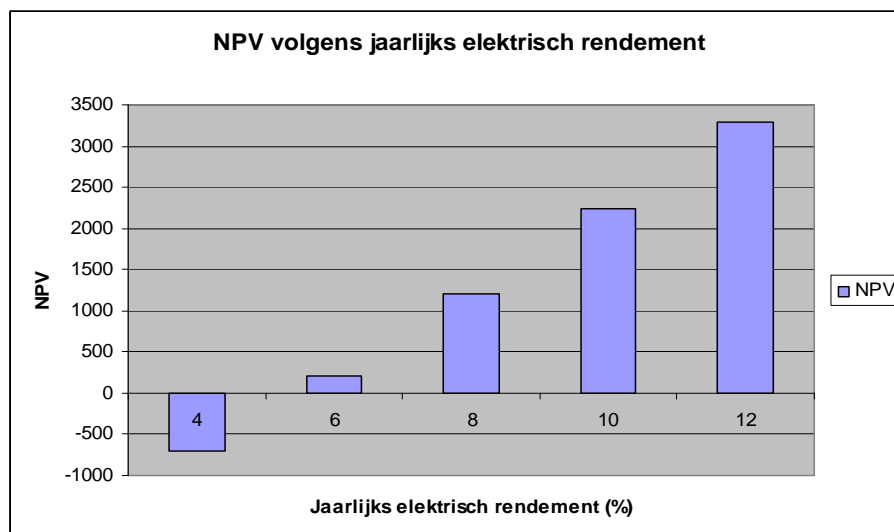
Bij wijze van illustratie: stel dat nieuwere versies van  $\mu$ WKK eenheden een jaarlijks elektrisch rendement van 12 % in de praktijk zouden halen<sup>25</sup>, dan kan voor een eenheidskost van 5 000 € reeds een eenvoudige en dynamische terugverdiëntijd van respectievelijk 4 en 5 jaar bereikt worden (cfr het uitgangspunt). De NPV bedraagt dan 2 224 € en de IRR 22 %.

<sup>25</sup> Nog steeds in de veronderstelling dat er netto over een hele facturatieperiode geen stroom terug op het net geplaatst wordt aan lagere terugleververgoedingen dan de inkoop.

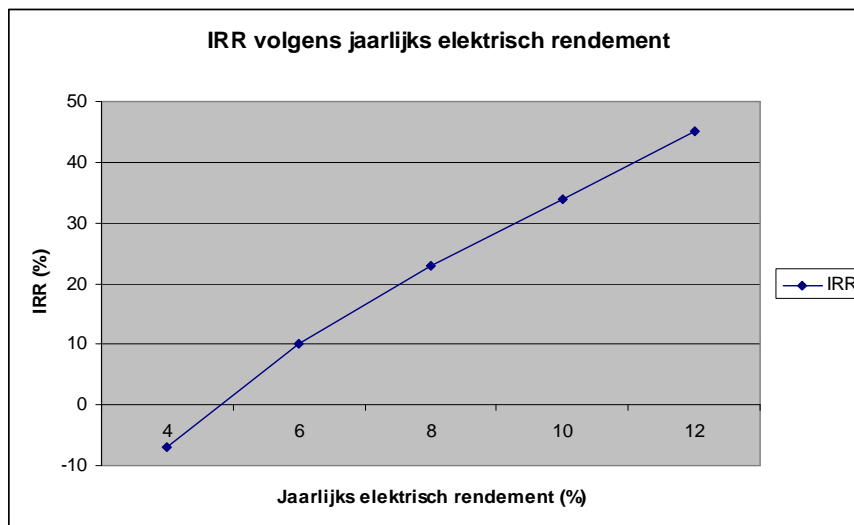
Figuur 35: TVT  $\mu$ WKK in functie van verschillend jaarlijks elektrisch rendement



Figuur 36: NPV variërend volgens jaarlijks elektrisch rendement



Figuur 37: IRR variërend volgens jaarlijks elektrisch rendement



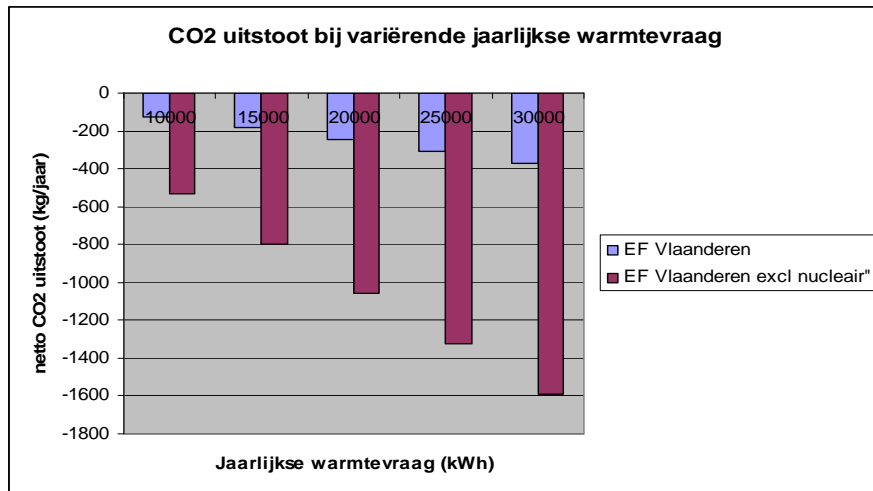
#### 4.3.6 Jaarlijkse warmtevraag

Tot slot wordt er voor de standaardinputparameters nog eens nagegaan wat de invloed van de jaarlijkse warmtevraag is op de haalbaarheid, ervan uitgaand dat het elektrisch rendement in alle gevallen 8 % blijft en een buffervat van 300 liter voorzien is. De analyse is met andere woorden statisch: wat gebeurt er wanneer de jaarlijkse warmtevraag varieert maar alle andere parameters gelijk gehouden worden. Merk op dat in de grafieken een jaarlijkse warmtevraag van 30 000 kWh meegenomen wordt, hoewel uit simulaties met het rekenmodel eerder gebleken is dat bij een dergelijke warmtevraag de  $\mu$ WKK hoogstwaarschijnlijk niet altijd in voldoende mate aan de warmtevraag kan beantwoorden<sup>26</sup>.

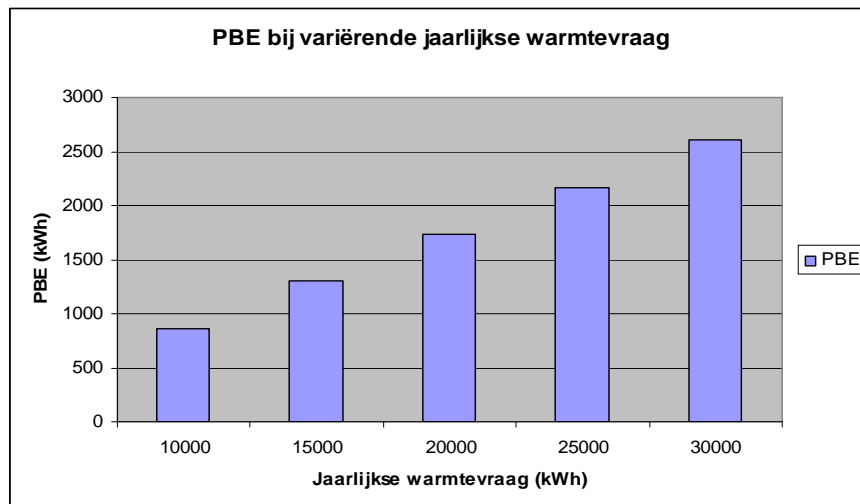
Vanuit ecologisch standpunt zijn Figuur 38 en Figuur 39 van belang. In Figuur 38 wordt de CO2 reductie aangegeven wanneer de emissiefactor inclusief de nucleaire centrales aangenomen wordt en exclusief de nucleaire centrales. In dat tweede geval zijn de besparingen veel groter, vanaf een jaarlijkse warmtevraag van meer dan 20 000 kWh meer dan een ton per geïnstalleerde  $\mu$ WKK. De primaire energiebesparing (Figuur 39) hangt samen met de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit en dus ook van de hoogte van de jaarlijkse warmtevraag.

<sup>26</sup> Andere  $\mu$ WKK producenten hebben een krachtiger bijbrander waardoor het risico op warmtetekorten beperkt wordt. Voor hele grote woningen (kleine kastelen of woningen met verwarmd zwembad e.d.) raadt de fabrikant een extra verwarmingsketel aan voor de piekmomenten hoewel de meeste  $\mu$ WKK fabricanten bij commerciële lancering cascade opstellingen niet gaan aanmoedigen gezien de complexiteit van de regeling van 1  $\mu$ WKK eenheid al hoog is.

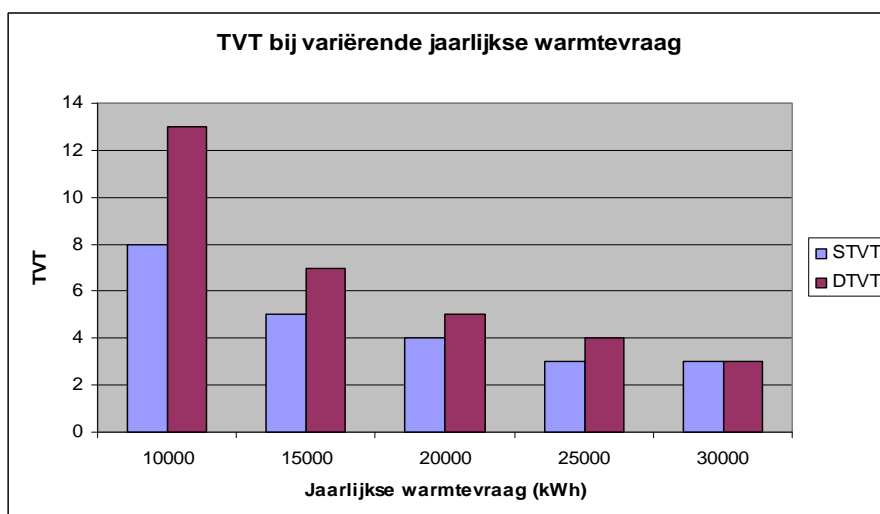
Figuur 38: CO2 uitstoot bij variërende jaarlijkse warmtevraag



Figuur 39: PBE bij variërende jaarlijkse warmtevraag

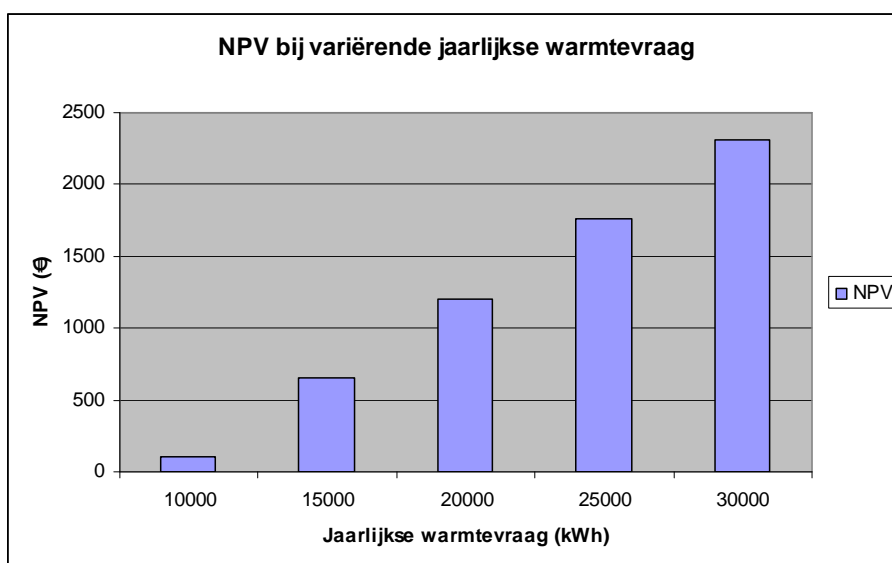


Figuur 40: TVT bij variërende jaarlijkse warmtevraag

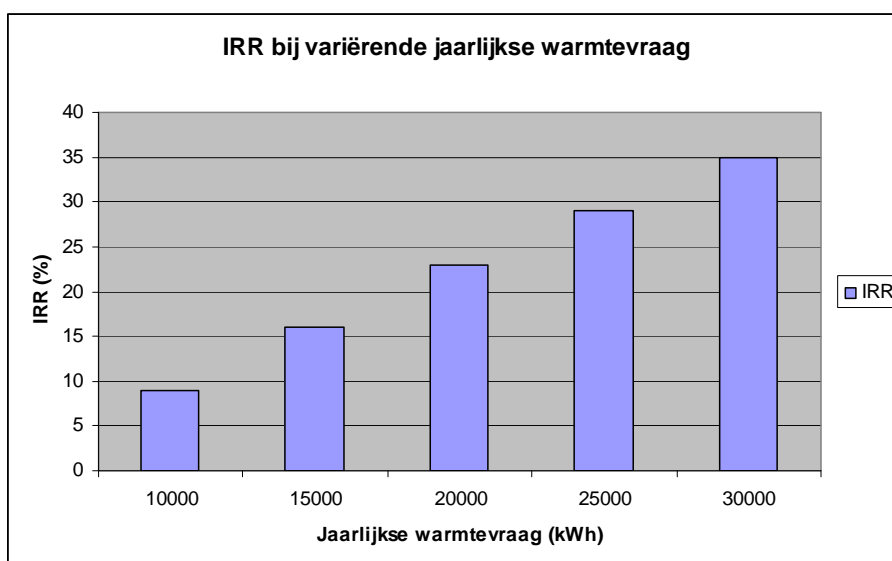


Voor de economische haalbaarheid zijn volgende figuren van belang: Figuur 40, Figuur 41 en Figuur 42. Uit die figuren blijkt dat onder de gegeven aannames ongeveer een jaarlijkse minimum warmtevraag van 15 000 kWh nodig is om te kunnen spreken van economische haalbaarheid (en dit reeds in de veronderstelling van een eenheidskost van 3 500 € in plaats van de huidige 8 000 €). De NPV bij een warmtevraag van 13 600 kWh en een globaal jaarlijks rendement van 8 % bedraagt nog ongeveer 500 €. Bij een warmtevraag van 10 000 kWh bedraagt die nog amper 106 €. De dynamische terugverdientijd voor een warmtevraag onder 15 000 kWh bedraagt meer dan 7 jaar (bij 10 000 kWh zelfs 13 jaar). De economische haalbaarheid verbetert alnaargelang een grotere jaarlijkse warmtevraag waarbij de kritische bedenking dat boven een jaarlijkse warmtevraag van 25 000 kWh het effectief voldoen aan de warmtebehoefte met de huidige karakteristieken van de gebruikte  $\mu$ WKK eenheid problemen kan geven, onderstreept wordt.

Figuur 41: NPV bij variërende jaarlijkse warmtevraag



Figuur 42: IRR bij variërende jaarlijkse warmtevraag





## HOOFDSTUK 5 RANDVOORWAARDEN, BARRIÈRES EN RISICO'S

---

In dit hoofdstuk worden kort de randvoorwaarden geschetst die nodig zijn voor een introductie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen. Uit die randvoorwaarden volgen meteen ook mogelijke risico's bij de introductie en een overzicht van mogelijke barrières (obstakels).

De aansluiting van decentrale productie-eenheden op het elektriciteitsnet zorgt in toenemende mate voor kleine en grote problemen. Vanuit die optiek en op vraag van de opdrachtgever wordt hier extra aandacht aan besteed.

De randvoorwaarden, barrières en risico's worden 5 verschillende secties onderverdeeld:

- 1) de mogelijke impact van een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK op het elektriciteitsnet,
- 2) de mogelijke impact van een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK op het gasnet,
- 3) technische,
- 4) economische,
- 5) en regelgevende randvoorwaarden, barrières en risico's

Er dient meteen aan toegevoegd te worden dat sommige van de randvoorwaarden, barrières en risico's niet enkel specifiek voor de technologie van  $\mu$ WKK geldig zijn maar ook bijvoorbeeld bij reeds bestaande technologieën zoals de huidige condensatieketels of warmtepompen.

### 5.1 Impact op het elektriciteitsnet

#### 5.1.1 Het elektriciteitsnet in Vlaanderen

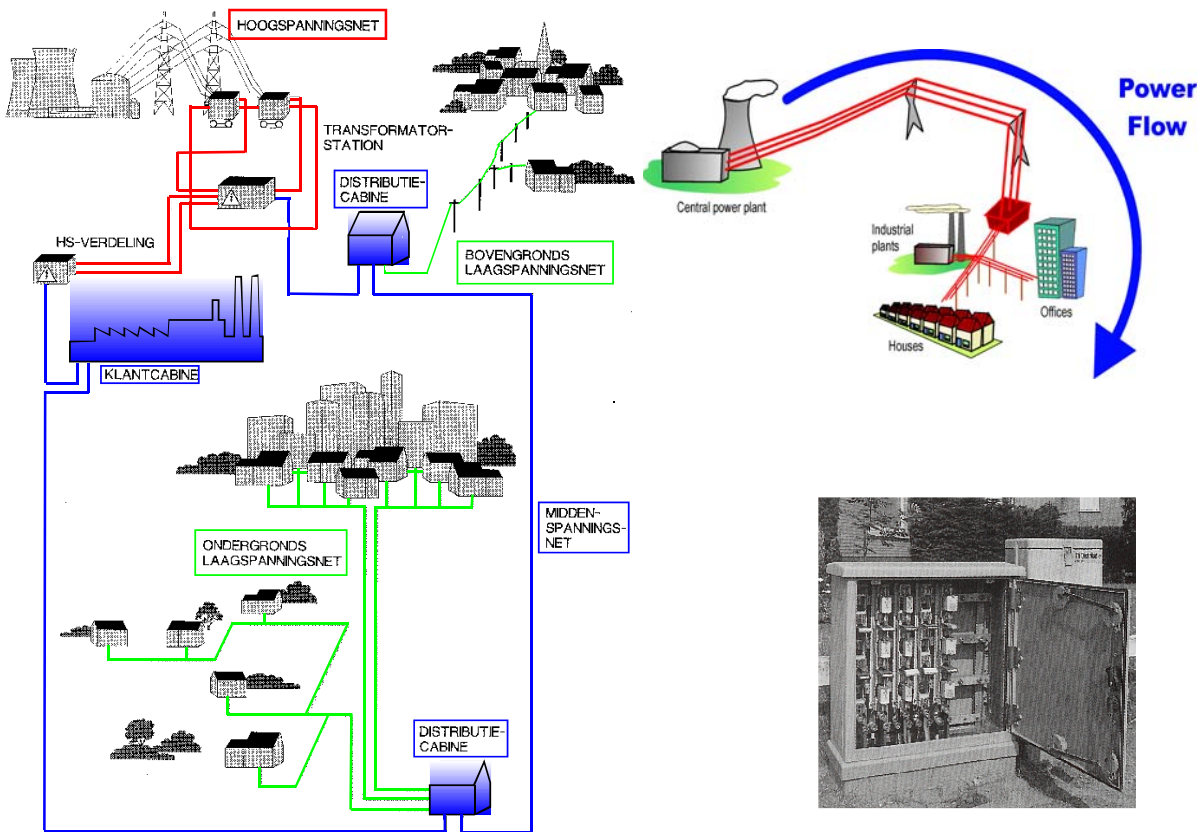
Het LS-net wordt beheerd door INFRAX en EANDIS. Beide organisaties overkoepelen enerzijds de zuivere en anderzijds de gemengde intercommunales in Vlaanderen. Zij hebben de verplichting alle decentrale productie-eenheden op hun netten te koppelen. INFRAX en EANDIS beheren beiden stedelijke en meer rurale gebieden. **In een ruraal gebied kunnen de kosten hoger oplopen omdat de problematiek gekoppeld is aan afstanden.**

Al van oudsher is ons elektriciteitsnet opgebouwd voor een top down flow van de elektrische energie met name van de grote bulkcentrales naar de kleinste verbruikers in een sterk vertakt elektriciteitsnet. Opbouw, uitbating en beveiliging van ons elektriciteitsnet werden door de tijd heen op basis van dit gegeven geoptimaliseerd.

Enkele kenmerken van de LS-netten beheerd door INFRAX en EANDIS vindt men in onderstaande tabel. Het LS-net vertrekt in de MS/LS-cabine vanaf de secundaire van distributietransfo's met vermogens tussen de 250 en 630 kVA. Van hieruit vertrekken een aantal kabels naar de afzonderlijke straten. Aan weerskanten van de straat bevindt

zich een kabel. Men ziet duidelijk de standaardisatie naar 150 mm<sup>2</sup> ALU-kabel bij INFRAx en EANDIS. De aftakkingen via kabelmoffen naar de verbruikers gebeurt via een driefasige 10, 16 of 25 mm<sup>2</sup> CU-kabel die niet langer dan 40 m mag zijn. Dit conform de C107. Voor verbruiken > 56 kVA wordt er rechstreeks afgetakt in de MS/LS-cabine met een 150/95/70 mm<sup>2</sup> ALU-kabel afhankelijk van het gevraagde vermogen en spanningsprofiel.

Figuur 43: Schematisch overzicht van de opbouw van het elektriciteitsnet zonder DG



Tabel 17: Kenmerken van de LS-netten beheerd door INFRAx en EANDIS

	INFRAx		EANDIS	
MS-LS Transformatoren	250 - 630 kVA	5 - 16 MVA kortsluitvermogen	250 - 400 kVA 28.000 cabines	4% kortsluitspanning
Ondergrondse kabels	8000 km	150 mm <sup>2</sup> ALU	53.600 km	150 mm <sup>2</sup> ALU
Bovengrondse kabelbundels	2150 km	70 mm <sup>2</sup> ALU + 54 mm <sup>2</sup>	....	<b>95 mm<sup>2</sup> ALu + 54 mm<sup>2</sup></b>
Bovengrondse Blanke lijnen	850 km		....	
Gemiddelde kabellengte	1000 m		335m (1800max)	
Aansluiting < 56 kVA Aangesloten op LS-kabel m.b.v.:	10 mm <sup>2</sup> CU 16 mm <sup>2</sup> CU 25 mm <sup>2</sup> CU	C107-reglement	10 mm <sup>2</sup> CU 16 mm <sup>2</sup> CU 25 mm <sup>2</sup> CU	C107-reglement
Aansluiting > 56 kVA	70 mm <sup>2</sup> ALU 95 mm <sup>2</sup> ALU		...	

aangesloten op MS-LS-transfo m.b.v.:	150 mm <sup>2</sup> ALU			
Aantal huizen per kabel	40		15	
	Gelijktijdigheidsfactor 0,1 Gemiddelde piek per aansluiting 3 A		2 kVA appart. / 3 kVA woonst 0,8 gebruiksfactor 0,75 simultaneiteitsfactor lintbewoning	
Gemiddelde afstand tss 2 aansluitingen	25 m		22 m	

Tabel 18: R en X-waarden van de gebruikelijke ondergrondse kabels.

20 ° C	R ( Ω/km)	X( mH/km)
4 x 50 mm <sup>2</sup> ALU	0,641	0,259
4 x 70 mm <sup>2</sup> ALU	0,458	0,259
4 x 95 mm <sup>2</sup> ALU	0,320	0,248
4 x 150 mm <sup>2</sup> ALU	0,206	0,248
4 x 10 mm <sup>2</sup> CU	1,830	0,255
4 x 16 mm <sup>2</sup> CU	1,150	0,241
4 x 25 mm <sup>2</sup> CU	0,727	0,242

De connecties van alsmaar meer decentrale generatoren (DG's) veroorzaakt problemen die de netwerkkoperatoren dwingen een andere koers te varen. Zo kunnen er inverse vermogenflows ontstaan. Dit kan problemen veroorzaken met o.a. de spanningsprofielen en de beveiliging tegen overstroom. De netontkoppelingrelais moeten ervoor zorgen dat bij fout op het net de DG afgeschakeld wordt. Dit gebeurt liefst zo snel mogelijk opdat het LS-net terug in zijn oorspronkelijke staat komt en de netwerkbeveiligen gelijk van oudsher hun werk kunnen doen. Wanneer het net herstelt, moet het in eerste instantie alle lasten voeden en vervolgens worden de DG's weer gesynchroniseerd. Bij een vergaande penetratie van DG's zal het elektriciteitsnet dit niet meer alleen kunnen. Naar aanleiding van enkele serieuze incidenten worden grotere DG's reeds verplicht een bijdrage te leveren om de stabiliteit van de netten te garanderen. [Synergrid: C10/11].

### 5.1.2 Voorschriften en reglementen bij aansluiting van decentrale productie-eenheden

Wanneer een decentrale generator aan het elektriciteitsnet wordt gekoppeld moet voldaan worden aan de volgende voorschriften en reglementen. Deze zijn terug te vinden op de websides van Synergrid en VREG.

- C10/11 Aansluitvoorwaarden voor decentrale productie-eenheden die in parallel werken met het distributienet.
- C1/107 Algemene technische voorschriften voor de aansluiting van een gebruiker op het LS- distributienet.
- C2/112 Technische voorschriften voor aansluiting op het HS-distributienet.
- De aanvullende aansluitvoorwaarden van Infrac bij C2/112.
- C10/17 Power Quality voorschriften voor netgebruikers aangesloten op hoogspanningsnetten.
- C10/19 Aansluiten van storende belastingen in laagspanning.
- Algemeen Reglement op de Elektrische Installaties (AREI)
- Technisch Reglement voor de Distributie van Elektriciteit.

Synergrid heeft voorstellen gedaan om de C10/11 te wijzigen conform de Europese aanbevelingen. De belangrijkste knelpunten hierbij zijn:

- het verplicht werken van de generatoren groter dan 1MW in de frequentieband van 47,5 Hz tot 51,5 Hz om zo de stabiliteit van het elektriciteitsnet te verhogen en mogelijke ineenstorting te voorkomen.
- het verplichten van driefasige aansluiting voor generatoren > 16 A / 3680 kV.
- de invoering van de telecontrolekast hetgeen de DNB moet toelaten het actief vermogen van de betreffende generator te regelen om de spanning binnen de voorgeschreven grenzen te houden. Dit is verplicht voor generatoren > 1 MW.

Afspaken betreffende deze knelpunten staan nog steeds ter discussie. CREG, VREG, CWAPE en IBGE-BIM proberen een gemeenschappelijk akkoord te vinden. Intussen heeft INFRAX het voorstel van de VREG om kleine generatoren eerst vanaf 5 kVA te verplichten driefasig aan te sluiten, aanvaard, zij het met de nodige bedenkingen:

- *"De spanningsstijging over fase+nulgeleider mag samen maximaal 1% bedragen in de binneninstallatie.*
- *De spanningsstijging over fase+nulgeleider mag samen maximaal 1% bedragen op de aansluitkabel. Mogelijk dient de aansluitkabel vervangen te worden.*
- *Indien het piekvermogen van de omvormer groter is dan 5000 VA dienen de aansluiting en de aansluitautomaat driefasig uitgevoerd te zijn. Eventuele aanpassing van de bestaande aansluiting dient apart aangevraagd te worden door de DNG. De productie moet dan gespreid worden over twee of drie fasen met een maximum verschil tussen de fasen van 3680VA. Ook onder de 5000VA wordt aangeraden in de mate van het mogelijke een meerfasige teruglevering toe te passen, dit kan zelfs geëist worden door de DNB indien aan bovenstaande voorwaarden niet voldaan is.*  
*Opmerking: voor installaties tussen 5000 en 10.000VA die in dienst komen vóór 01/07/09 kan hierop een uitzondering aangevraagd worden. Dit dient aangevraagd te worden vóór de indienststelling per E-mail op [aanvragen.eenfasig@infrax.be](mailto:aanvragen.eenfasig@infrax.be).*

### 5.1.3 Impact van decentrale productie-eenheden op het LS- distributienet

#### 5.1.3.1 Inleiding

Eén enkele microgenerator heeft geen impact op het distributienet, maar, wanneer een groot aantal van deze generatoren geïnstalleerd worden in mekaars geografische nabijheid kan hun collectieve impact wel degelijk significant zijn. [Murray Thomson, 2008]

De belangrijkste impact op het distributienet zijn de spanningsprofielen. Andere factoren die beïnvloed worden zijn Power Quality, de belasting van transformatoren en kabels, de netverliezen en de stijging van de kortsluit- en foutstromen door de bijdrage van de microgeneratoren. Veel van deze factoren werden onderzocht voor  $\mu$ WKK's tijdens de zogenaamde "Weilandproef" in Nederland. We beperken ons hier tot de spanningsprofielen en kortsluitstromen.

### 5.1.3.2 Spanningsprofiel

De spanning voor LS-verbruikers mag volgens de Europese standaard EN 50 160 +/- 10% afwijken van de nominale spanning van 230 V. Dit betekent een range van 207 V tot 253 V.

95 % van de tijd moet de spanning zich tussen 207 Volt en 253 Volt bevinden, 100 % van de tijd tussen 196 Volt en 253 Volt.

Terwijl dit een genereus regelgebied lijkt op papier wordt dit praktisch voor een groot stuk opgebruikt in de dagdagelijkse uitbating van het LS-net, zelfs zonder de aankoppeling van microgeneratoren.

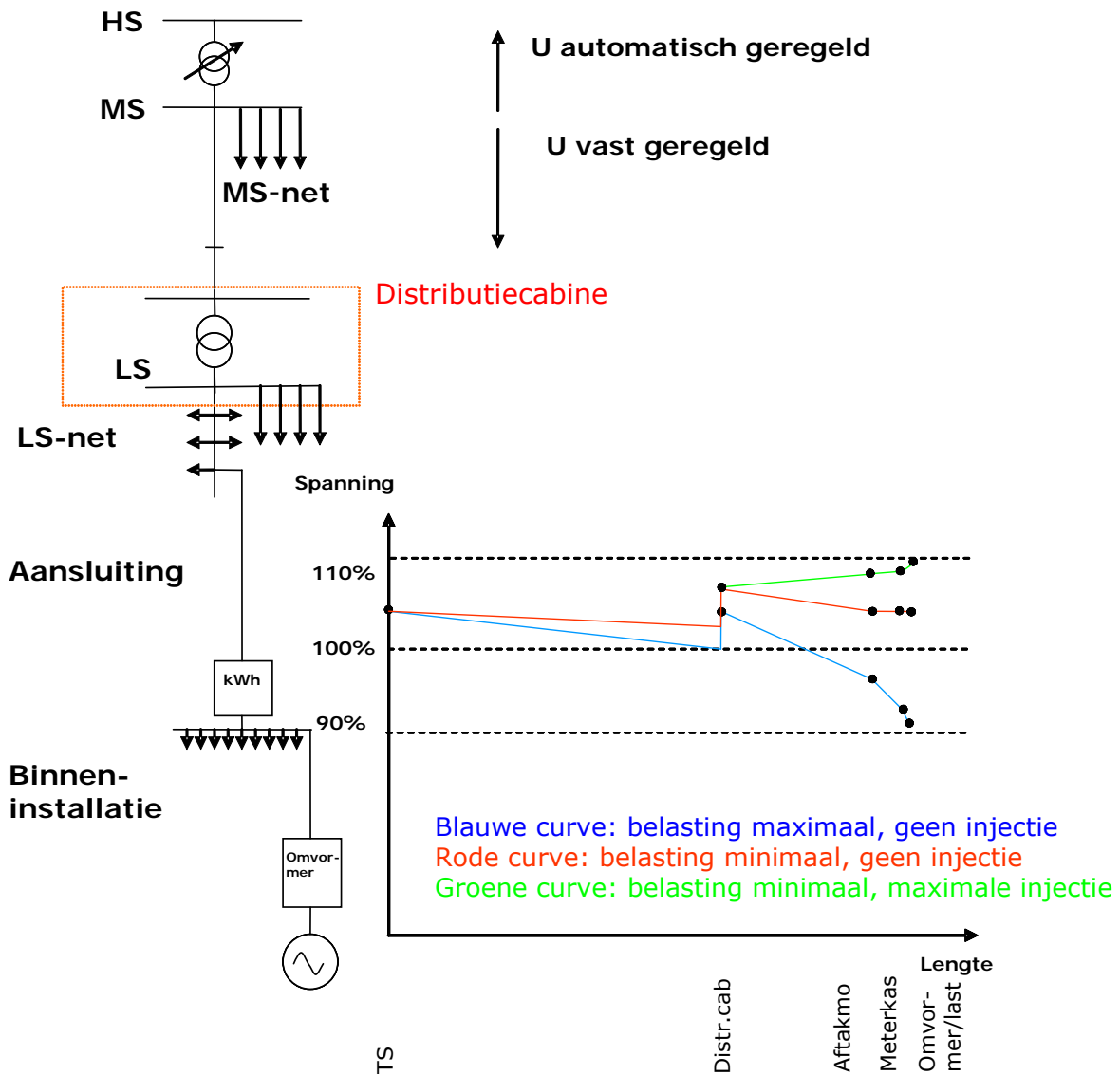
#### 5.1.3.2.1 Spanningshuishouding

Het distributienet is historisch opgebouwd voor de elektriciteitsdistributie naar de verschillende afnemers van elektriciteit. Concreet houdt dit in dat er enkel in het transformatorstation (HS/MS) een automatische spanningsregeling is. In de distributiecabines (MS/LS) is er meestal de mogelijkheid om via een manuele, spanningsloze omschakeling van een tapstand de lokale spanning in discrete stappen bij te stellen (-5%, -2,5%, 0%, +2,5%, +5%). Hierbij wordt er naar gestreefd om een voldoende hoge spanning te verkrijgen in de distributiecabine om aan het einde van het distributienet een spanning aan te bieden die binnen de spanningsnorm EN50160 gelegen is.

Op de momenten van lage afname zal de spanning in de distributiecabine nog hoger zijn gezien de lagere spanningsval in het MS-net en over de transformator. Toch ligt deze spanning ook binnen de toegelaten grenzen van genoemde spanningsnorm, al is de geleverde spanning kort bij de distributiecabine hoger dan de nominale spanning.

Praktijkwaarden voor de spanning op het LS-bord in de distributiecabine schommelen rond  $U_n + 5\%$ .

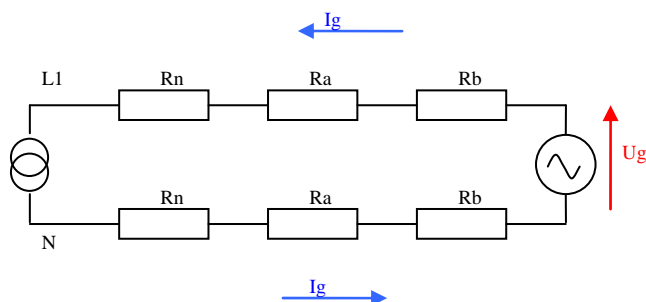
Figuur 44: Schematisch overzicht van de opbouw van een standaard distributienet en spanningsverloop op verschillende momenten van netbelasting op dezelfde plaats in een distributienet. Bron: Infracx.



5.1.3.2.2 Berekening van de spanningsstijging bij decentrale productie

We berekenen voor verschillende scenario's de spanningsstijging die veroorzaakt wordt door de teruglevering van elektriciteit aan het LS-distributienet. Wij merken op dat geen rekening wordt gehouden met eventuele overgangsweerstanden. De spanningsstijging wordt dus gunstiger berekend (kleiner) dan in werkelijkheid.

**Eenfasige injectie**



Veronderstellingen

<u>L1-N</u> : Fasespanning in distributiecabine	230V +5% = 241V
<u>R<sub>n</sub></u> : Impedantie distributienet	0,17 Ohm
Dit is de 75-percentiel waarde van de berekende impedanties van het distributienet per LS-vertrek, 25% van de LS-vertrekken heeft dus een grotere ohmse weerstand. Als we deze waarde omrekenen naar de overeenstemmende lengte bij een kabelbundel komen we aan ca 350 m en bij een ondergrondse kabel aan 750 m.	
<u>R<sub>a</sub></u> : Impedantie aansluiting	0,06 Ohm
Dit is de impedantie van een standaard aansluitkabel 10mm <sup>2</sup> van 30m.	
<u>R<sub>b</sub></u> : Impedantie binneninstallatie	0,28 Ohm/0,18 Ohm
Dit is de impedantie van een 3G2,5 van 35m/3G4 van 35m	
<u>I<sub>g</sub></u> = stroom door de generator geïnjecteerd	16A (generator 3680 VA) /20A (generator 5000 VA)
bron: INFRAx	

Berekeningen

$$U_g = U_{L1-N} + 2x(R_n + R_a + R_b)xI_g$$

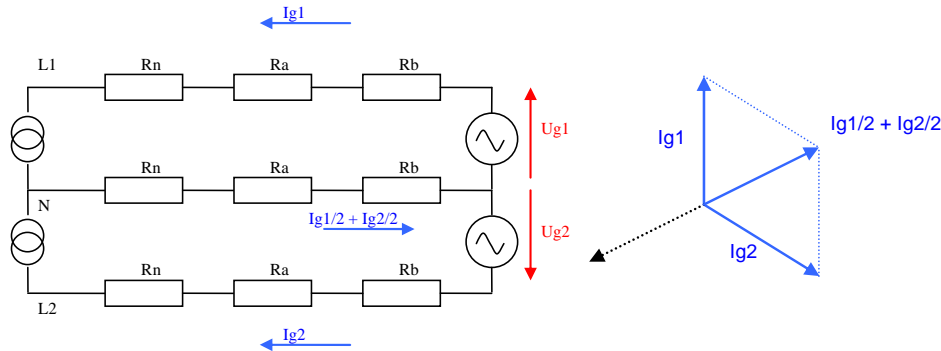
Tabel 19: Spanningsstijging bij eenfasige injectie van een decentrale productie-eenheid.

$U_{L1-N}$	$R_n$	$R_a$	$R_b$	$I_g$	$U_g$	$U_g$
(V)	( $\Omega$ )	( $\Omega$ )	( $\Omega$ )	(A)	(V)	(%)
241	0,17	0,06	0,28	16	257	112
241	0,17	0,06	0,18	16	253	110
241	0,17	0,06	0,28	20	261	114
241	0,17	0,06	0,18	20	257	112

**Besluit**

Deze berekeningstabel laat duidelijk zien dat bij *eenfasige aansluiting de sectie van de draad in de binnenhuisinstallatie*, waarmee de microgenerator met het elektriciteitsbord van de gebruiker wordt verbonden, *een grote invloed heeft op de spanningsverhoging*.

***Tweefasige injectie***



De stroom in de nulgeleider is de vectoriële som van de stroom in de fasegeleiders. De resultante heeft als grootte:  $I_{g1}/2 + I_{g2}/2 = I_g$

Veronderstellingen: idem

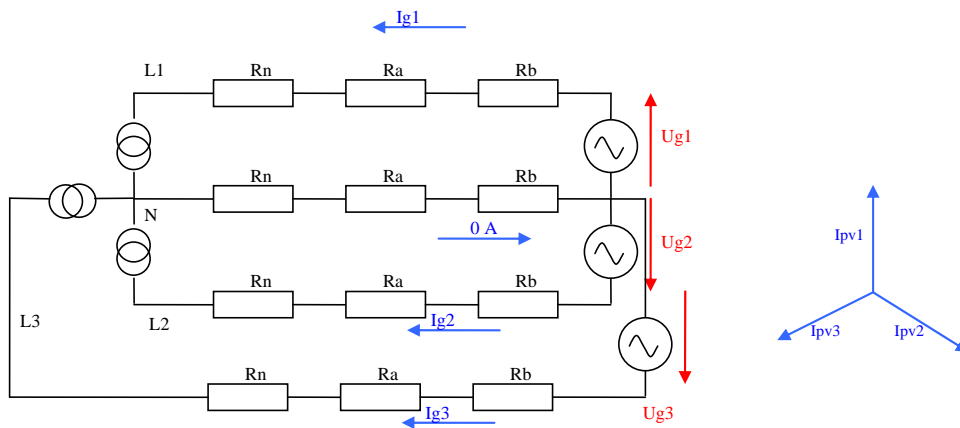
Berekeningen

$$U_g = L1 + 2x(R_n + R_a + R_b) \times I_g$$

Tabel 20: Spanningsstijging bij een tweefasige injectie van decentrale productie-eenheid.

$U_{L1-N/L2-N}$	$R_n$	$R_a$	$R_b$	$I_{g1}, I_{g2}$	$U_{g1}, U_{g2}$	$U_{g1}, U_{g2}$
(V)	( $\Omega$ )	( $\Omega$ )	( $\Omega$ )	(A)	(V)	(%)
241	0,17	0,06	0,28	16	257	112
241	0,17	0,06	0,18	16	253	110
241	0,17	0,06	0,28	20	261	114
241	0,17	0,06	0,18	20	257	112

***Driefasige injectie:***



De stroom in de nulgeleider is de vectoriële som van de stroom in de fasegeleiders. De resultante is bij driefasige aansluiting nul.



Veronderstellingen: idem

Berekeningen

$$U_g = L1 + (R_n + R_a + R_b) \times I_g$$

Tabel 21: Spanningsstijging bij driefasige injectie van een decentrale productie-eenheid.

$U_{L1-N/L2-N}$ (V)	$R_n$ ( $\Omega$ )	$R_a$ ( $\Omega$ )	$R_b$ ( $\Omega$ )	$I_{g1, I_{g2}, I_{g3}}$ (A)	$U_{g1, U_{g2}, U_{g3}}$ (V)	$U_{g1, U_{g2}, U_{g3}}$ (%)
241	0,17	0,06	0,28	16	249	108
241	0,17	0,06	0,18	16	248	108
241	0,17	0,06	0,18	16/3	244	106
241	0,17	0,06	0,18	16/3	243	106
241	0,17	0,06	0,28	20	251	109
241	0,17	0,06	0,18	20	249	108

Besluit

De spanning waarbij omvormers uitschakelen is 110%. In het geval van eenfasige aansluitingen op 16 A betekent dit dat in installaties, verbonden met het laatste kwart van het LS-distributienet, regelmatig uitschakelingen zullen plaats vinden.

De berekeningen tonen duidelijk aan dat *men driefasig 6 keer meer vermogen mag aan- sluiten dan eenfasig om dezelfde spanningsstijging te bekomen.*

Deze berekening is natuurlijk worst case, de generator levert maximum vermogen terwijl er geen afname is. Deze situatie treedt nochtans op in de zomer op het middaguur bij PV-installaties. Een transformator met automatische tapinstelling biedt een oplossing maar is zeer prijzig en verandert de vertrekspanning van alle kabels die aangesloten zijn.

#### 5.1.3.3 Berekening van het maximum DG-vermogen aansluitbaar op een voedingskabel ( EANDIS)

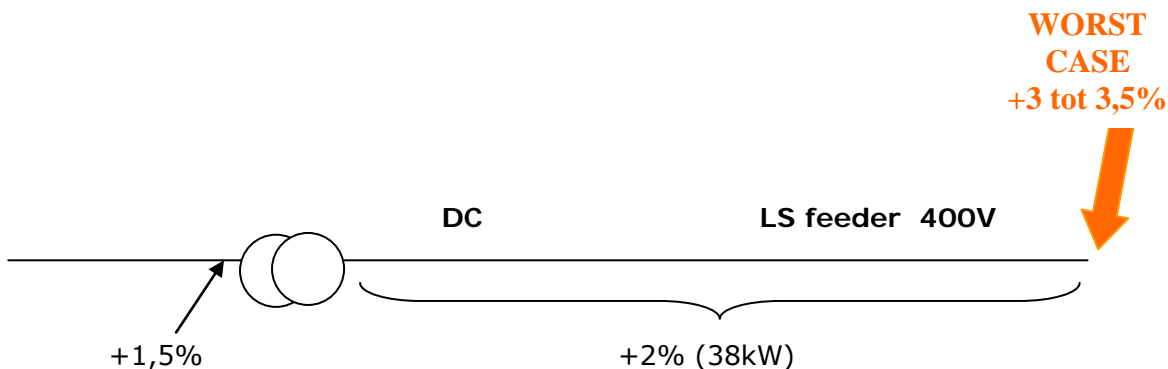
In de veronderstelling dat een transformator van 270 kVA een 335 meter lange kabel van 95 mm<sup>2</sup> ALU voedt met een netspanning van 400V en in de veronderstelling dat de spanningsval op het einde van de kabel maximaal 3,5% hoger dan nominaal mag zijn kan men becijferen dat 38 kW DG aansluitbaar is per feeder of 203 kW per distributiecabine of 2,35 kW per abonnee (15 abonnees per kabel!) Deze berekening is de worst case voor de laatste abonnee in het LS net en perfect gelijke verdeling over de drie fasen .

Deze configuratie is gebaseerd op een gemiddelde lengte en gemiddelde aantallen . In de realiteit zijn er (en zeker in rurale gebieden) langere netten en komt men uit op lagere kW's aansluitbaar per abonnee.

Ook is een perfecte gelijke verdeling over de drie fasen verondersteld (geen onbalans - nulpunstverschuiving).

In de praktijk komen eenfasige producties waardoor de vermelde kW waarde per abonnee met een gevoelige factor verlaagd dient te worden (delen door factor 6 in worst case zoals reeds eerder aangetoond!)

Figuur 45: Overzicht van de spanningsstijging.

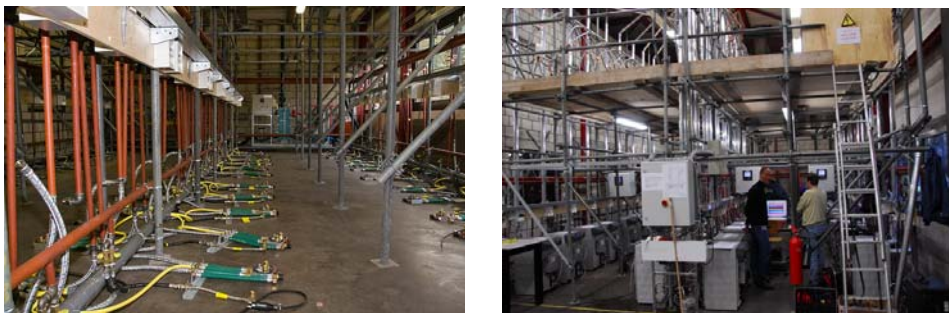


#### 5.1.3.4 De eerste Weilandproef

In de zomer van **2006** werd in een hal bij Kiwa Gastec in Apeldoorn een laagspanningsnet ingericht met 50  $\mu$ WKK's geleverd door **Whispergen** [Weilandproef 2007]. Gasterra en de netbeheerders Continuon, Essent, Nuon en Eneco Netbeheer beoogden hiermee echte ervaring op te doen in de realtime interactie tussen  $\mu$ WKK's en het net.

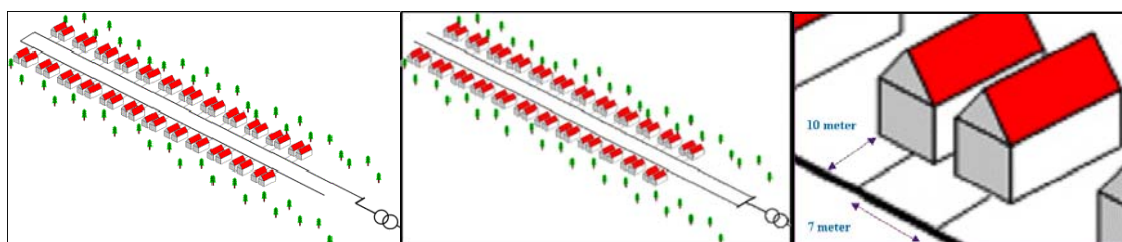
Aspecten zoals spanningshuishouding, power quality, eilandbedrijf, start- en stopkarakteristieken, kortsluitbijdragen van de  $\mu$ WKK's aan het net, aanraakspanning bij uitschakelen en stabiliteit van de apparaten bij spanningsdips werden onderzocht.

Figuur 46: Hal bij Kiwa Gastec in Apeldoorn



De dimensionering van het ingerichte laagspanningsnet is dusdanig gekozen dat het overeenkomt met een doorsnee "Vinexwijk". Het laagspanningsnet wordt gevoed met een transformator van 75 kVA. Aan de laagspanningszijde zijn, via een verdeelkast, twee kabels van 50 mm<sup>2</sup> Alu met ieder een lengte van circa 230 meter (komt overeen met ca 700 meter 150 mm<sup>2</sup> Alu) aangesloten waarop de aftakkingen zijn gemaakt voor 48  $\mu$ WKK's (24 aftakkingen per kabel). De 48 units zijn gelijkmatig over de drie fasen verdeeld. Twee units staan als reserve. De 2 aftakkingen worden ieder gevormd door 10 meter 3x 2,5 mm<sup>2</sup> installatiekabel (komt overeen met ca 10 meter 10 mm<sup>2</sup> Cu en 6 meter huisinstallatie met 2,5 mm<sup>2</sup>) waarop de wandcontactdozen zijn gemonteerd via een 16A beveiligingsautomaat.

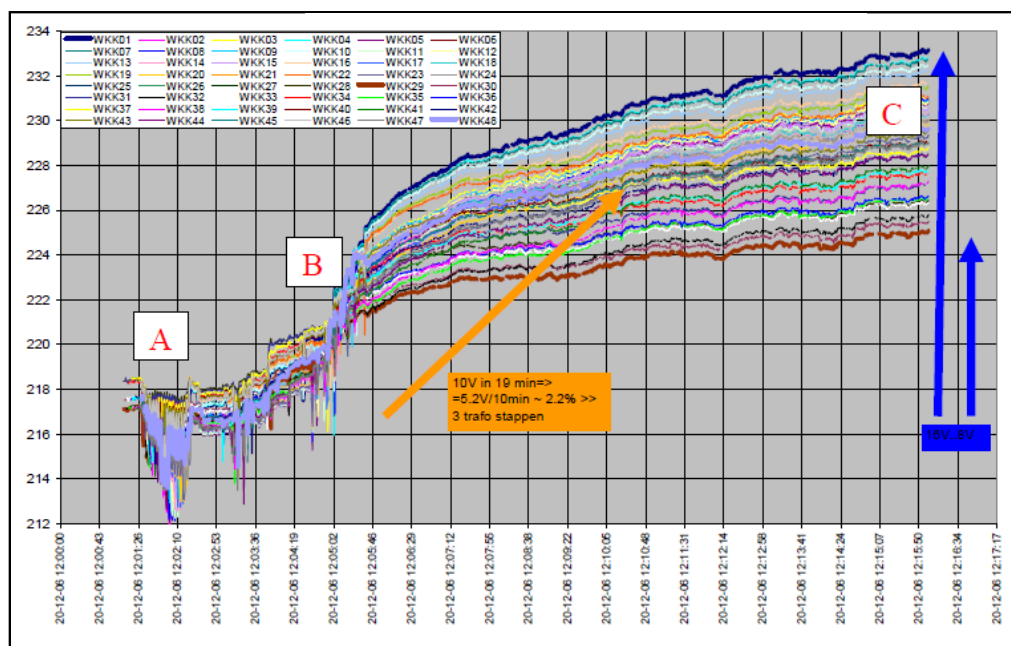
Figuur 47: opbouw van de testopstelling van de "WEILANDPROEF"



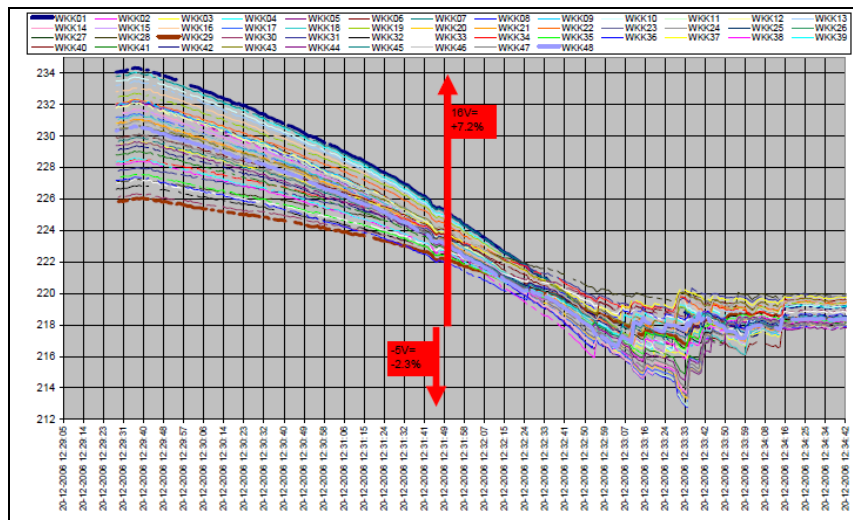
De belangrijkste conclusies en aanbevelingen op basis van de metingen zijn:

1. De  $\mu$ WKK's kunnen zonder meer worden aangesloten achter een 16A veiligheid. Momenteel wordt hiervoor een praktijkrichtlijn toegevoegd aan de NEN1010. Alle soorten bedradingen gebruikt in het woningpark van Nederland werden hiertoe geanalyseerd. Dit moet in België nog gecontroleerd worden.
2. Een startactie gaat gepaard met eerst een elektriciteitsvraag uit het net, waarna ca 5 minuten de productie op gang komt. Dit betekent eerst een spanningsdaling gevolgd door een spanningsstijging. Het omgekeerde geschiedt bij een stop.

Figuur 48: Spanning bij opstart en stop van de  $\mu$ WKK's



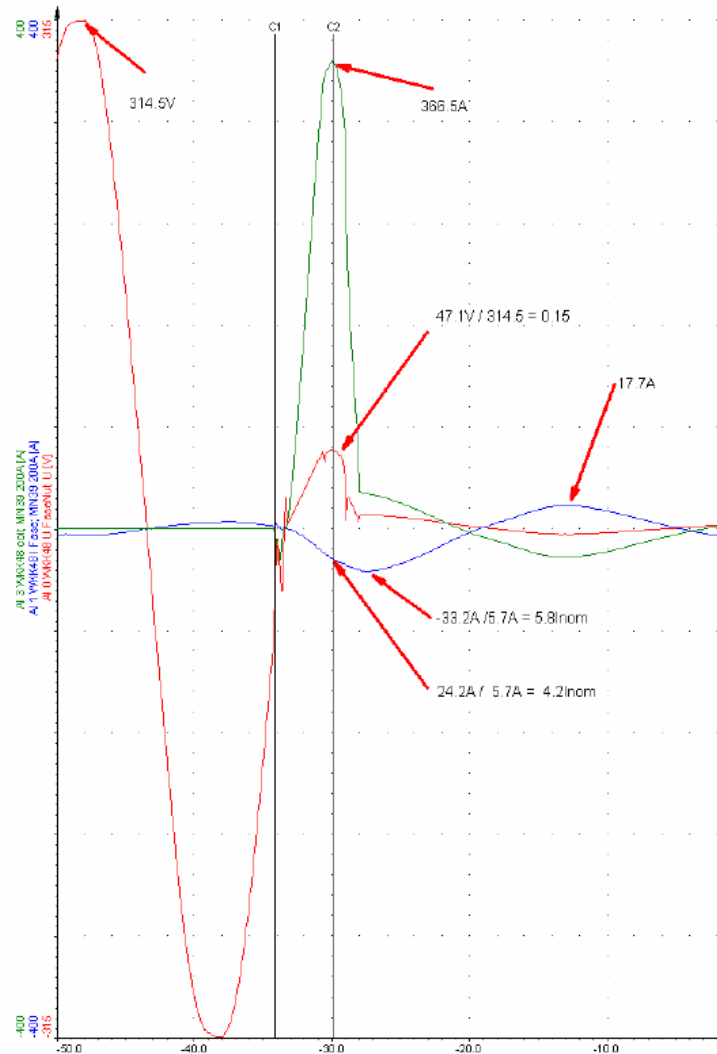
Figuur 49: Spanning bij opstart en stop van de  $\mu$ WKK's



Gelijktijdige starts na een netterugkeer kan best vermeden worden door een random functie in te bouwen. Om te grote snelheden van de generator te vermijden bij het uitschakelen wordt overgeschakeld op motorwerking. Dit geeft een serieuze spanningsdaling als alle eenheden tegelijkertijd gestopt worden mogelijk bij gebruik van de eenheden als virtuele powerplant. Gebruik maken van de elektrische weerstand van een dumpload brengt een oplossing. Wanneer de eenheden warmtegestuurd zijn is de kans op gelijktijdig stoppen zo goed als nihil.

3. Bij over – en onderspanning werden de eenheden afgeschakeld bij 0,85. x Unominaal en 1,15 X Unominaal. Wanneer een eenheid afschakelde ontstond een cascade-effect omdat de daling van geproduceerde energie de spanning extra liet dalen.
4. De  $\mu$ WKK's ondervinden geen last van spanningsdips in het net. Er zijn spanningsdips geïntroduceerd waarbij de restspanning kortstondig slechts 15% bedroeg. Tijdens en na deze dips bleven de units vermogen leveren en werden dus niet afgeschakeld. (Zie figuur 49)
5. Bij kortsluiting in een LS- kabelrichting schakelen alle machines in de getroffen fases van die kabelrichting uit. De machines in de niet getroffen fases en richtingen blijven netjes werken.
6. De kortsluitbijdrage die de  $\mu$ WKK's en het net gezamenlijk leveren is aanmerkelijk lager dan de som van de afzonderlijke bijdragen. De pieken in de bijdrage van de Whispergens en de piek van het net vallen niet samen, maar hebben een tijdsverschuiving. Oorzaak hiervan is het verschil in transiënt en subtransiënt gedrag van het net en dat van de WKK's.
7. De kortsluitbijdrage hangt sterk af van de locatie van de kortsluiting en de locatie van de  $\mu$ WKK's in het net. De kabellengte tussen de generatoren onderling en de kabellengte tot de foutplaats hebben hun invloed. Vuistregels zijn daarom lastig toe te passen.
8. In situaties met hele lage belasting in het net kan meer dan 60% van het transformatorvermogen probleemloos als opwekvermogen teruggeleverd worden.

Figuur 50: Verloop stromen voor en na kortsluiting. Rode lijn = spanning WKK / Blauwe lijn = stroom WKK / Groene lijn = stroom van het net



9. Simulatiepakketten als Gaia, Digsilent en PSSE kunnen nog niet omgaan met eenfasige opwekeenheden. Voorsnog is deze test de eenvoudigste manier om goed inzicht te verkrijgen in het real-time transiënte en subtransiënte gedrag van een specifiek type opwekeenheden in een laagspanningsnet. Metingen leveren belangrijke input voor verfijning van simulatiemodellen.
10. Met de opstelling in Apeldoorn kon men in enige weken tijd het totale scala aan interacties tussen opwekkers en het net bestuderen en vast leggen in de vorm van een benchmarkrapport. Om de betrouwbaarheid van de metingen statistisch te kunnen onderbouwen zijn daarbij voorsnog minimaal 20 units van een bepaald type nodig.

#### 5.1.3.5 De tweede Weilandproef

Op het moment van publicatie van dit rapport waren de resultaten van de tweede Weilandproef nog niet bekendgemaakt.

### 5.1.4 Vergelijk tussen PV en micro-WKK

Op het eerste zicht zijn kleine PV-installaties en  $\mu$ WKK's natuurlijk kleine decentrale generatoren. Er zijn evenwel verschillen.

1. Een PV-veld van 1 kWp produceert in Vlaanderen zo'n 800 kWh op jaarbasis, een  $\mu$ WKK van 1 kWe een 3000 kWh. Men spreekt hier van een productieduur van 800 uren voor PV vergeleken met een productieduur van 3000 uren voor  $\mu$ WKK (voor windturbines rekent men met 2000 uren maximale productie). De netten moeten gedimensioneerd worden in functie van het maximaal vermogen van een installatie niet in functie van hun geproduceerde energie. In dat opzicht hebben  $\mu$ WKK's zeker een streepje voor.
2. Een  $\mu$ WKK levert energie als er warmtevraag is. Uit onderzoek blijkt dat de warmtevraag en elektriciteitsvraag redelijk synchroon lopen. De hoeveelheid elektriciteit die men via het net buffert (zo'n 50 %) [Carbon Trust, 2007] zal niet zo groot zijn als bij PV. PV levert voornamelijk 's middags en in de zomer zijn grootste vermogen als de bewoners niet thuis zijn en het elektriciteitsverbruik eerder beperkt is. WKK's produceren eerder in de wintermaanden wanneer de warmtevraag groot is. Men kan PV en  $\mu$ WKK dus in grote mate als complementair beschouwen.

*Figuur 51: Overzicht van residentiële  $\mu$ WKK's momenteel te koop in Vlaanderen. Anderen zie [Harrison,2008] / Solo(stirling) – EC-power(motor) behoren niet tot de scope van deze studie.*

	Naam Toestel	Pmax (kW) elektrisch	1f of 3f	technologie	Stroom per fase (A)	Generator SM / AM / PMSM	Koppeling /h net omvormer rechtstreeks	Kortsluitstroom (A)	vermogenlevering bij 47,5 Hz
1	Whispergen (Magic Boiler Compagny)	0,85 ...1,2	1	stirling	4	AM	rechtstr	6In	?
2	HRE-ketel (Remeha) (Vaillant)	1	1	stirling	4,4	Lineaire generator	rechtstr	16	neen (G83)
3	Lion (Otag)	2,2	1	Stoom machine	13	Lineaire generator	invertor	13	ja
4	Sunmachine	3	1	stirling	13	AM	invertor	16	nog niet
5	Ecopower (Bulex)	4,7	3	gasmotor	6,8	PMSM	invertor	80(?)	ja
6	Dachs (SENERTEC/Baxi)	5,5	3	motor	8	AM	rechtstr	50(?)	ja
7	Aisin Seiki	6	1	motor	30	PMSM	invertor	?	?

3.  $\mu$ WKK's worden niet altijd via een omvormer aangesloten op het elektriciteitsnet. Er kan ook een rechtstreekse aansluiting zijn via een asynchrone of synchrone generator. Een rondvraag gaf aanleiding tot bovenstaande tabel. Het is evenwel zo dat leveranciers nauwelijks vertrouwd zijn met de elektrische materie van hun toestel. Levering van actief vermogen bij 47.5 Hz vraagt altijd een aanpassing van de generator en/of de aandrijving en/of de werking van de omvormer vergeleken met de systemen die

functioneren tot 49,5 Hz. Een verplichte levering tot 47.5 Hz wordt momenteel alleen onderhandeld voor eenheden groter dan 1 MW. [Synergrid 2006]

4. Wanneer een generator gekoppeld wordt via een omvormer is de kortsluitstroom nauwelijks 1 tot 2 keer de nominale stroom. Asynchrone en synchrone machines die rechtstreeks met het elektriciteitsnet gekoppeld worden zijn wel in staat behoorlijke kortsluitstromen te leveren.
5. Voor vermogens  $\leq 10$  kVA kan, ingeval de generator technisch niet in staat is om in eiland te werken, de ontkoppeling vereenvoudigd worden. In dit geval wordt enkel vereist dat netontkoppeling optreedt bij het overschrijden van een maximale spanning lager dan 110% en een minimale spanning lager dan 85%.

### 5.1.5 Besluit

Wat de impact op het net betreft vertonen  $\mu$ WKK's een gelijkaardige problematiek als PV-installaties. Ze vertonen evenwel een grotere productieduur en een beter synchronisme tussen gevraagde en geleverde elektriciteit.  $\mu$ WKK en PV zijn eerder complementair. Men hoeft dus geen gelijktijdigheidsfactor 1 te hanteren bij de netstudies om te controleren of een decentrale productie-installatie het spanningsprofiel kan verstoren. Gedetailleerder onderzoek is hier evenwel  $\mu$ vereist.

De generatoren van  $\mu$ WKK's kunnen via omvormers maar ook rechtstreeks met het elektriciteitsnet gekoppeld worden. In het eerste geval is er nauwelijks bijdrage aan kortsluitstroom, in het tweede geval kan de bijdrage behoorlijk zijn. De vaststellingen in de eerste Weilandproef zijn niet altijd extrapoleerbaar naar andere types  $\mu$ WKK.

De netproblemen kunnen serieuze dimensies aannemen maar er is nog de tijd om de nodige maatregelen te treffen. Bekijk bv. de aanpassingen van de C10/11: "Specifieke technische voorschriften voor decentrale productie-installaties die in parallel werken met het distributienet" die momenteel ter discussie liggen. Op termijn moeten de kleine producenten ook bijdragen om de toekomstige vereiste hoeveelheden HEB plugbaar te maken. Kleine inspanningen kunnen al veel problemen voorkomen zoals bv. de kabelsectie in de binnenhuisinstallatie en het zo veel mogelijk synchroniseren van de lasten op de productiecurve van de generator. Demand side management en sturing van het actief vermogen van de generatoren zullen nodig worden. Dit impliceert een intelligente sturing en het gebruik van buffervaten bij  $\mu$ WKK's. Zij laten in tegenstelling tot PV- en wind een zekere regelmarge toe op het moment van de elektriciteitsproductie en zijn dan ook geschikt om mee te helpen de spanningsprofielen van de netten te beheersen.

Of een  $\mu$ WKK via eender welk stopcontact met het net gekoppeld mag worden is een probleem dat in België nog moet uitgeklaard worden. Onze stopcontacten worden afgezekerd met automaten van 20 A (draadsectie = 2,5 mm<sup>2</sup>). In Nederland gebeurt dit met automaten van 16 A (draadsectie = 2,5 mm<sup>2</sup>). Onderzoek heeft uitgewezen dat de bekabeling in ieder Nederlands huis voldoende marge heeft om de stroom van een  $\mu$ WKK van 1 kWe zonder gevaren voor overbelasting te transporteren. Hiertoe werd een praktijkrichtlijn uitgeschreven als addendum voor de NEN1010. Deze is momenteel nog niet gepubliceerd.

## 5.2 Impact op het gasnet

Een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK kan een impact hebben op het bestaande gasnet. Een uitgebreid onderzoek van die impact valt buiten het bereik van deze studie.

Een globale inschatting (bijvoorbeeld 10 % meer gasverbruik door implementatie van  $\mu$ WKK) is onvoldoende realistisch om de eventueel toekomstige effecten van grootschalige introductie te kunnen inschatten aangezien er een sterke afhankelijkheid is van de geografische spreiding. Bovendien gebeuren gedetailleerde metingen vandaag voornamelijk in middendruk reduceer stations en niet zozeer op de laagste druknetten. Gezien de hoge investeringskost, de moeilijkheden die momenteel nog opduiken in veldtesten in het buitenland, en de voorlopig beperktere markt door de karakteristieken van de huidige technologie, is een heel geleidelijke marktintroductie waarschijnlijk waardoor negatieve effecten nog onderzocht kunnen worden. Veldtesten in België zouden een beter beeld kunnen geven van concrete (negatieve) effecten van  $\mu$ WKK op het distributienet.

### 5.3 Technische randvoorwaarden, barrières en risico's

#### 5.3.1 Algemene regeling/aansturing van een $\mu$ WKK eenheid

De sturing en regeling van een  $\mu$ WKK eenheid is cruciaal voor het slagen van de technologie: om optimaal te genieten van de voordelen van cogeneratie dient de  $\mu$ WKK eenheid bij voorkeur zo weinig mogelijk starts en stops te kennen zodat de daarmee gepaard gaande verliezen beperkt worden. Uit de veldtesten uitgevoerd door Carbon Trust [Carbon Trust, 2007] blijkt dat "customer awareness" een niet te onderschatten factor is bij implementatie van een  $\mu$ WKK: sommige gebruikers hadden geen begrip van de werking van een  $\mu$ WKK en zijn regeling waardoor het systeem niet optimaal gebruikt werd. Ook de installateurs en fabrikanten zelf kunnen momenteel nog niet terugvallen op jarenlange praktische ervaring waardoor er nog heel wat ruimte voor optimalisatie blijft.

Wat betreft het correct installeren en aansturen van een  $\mu$ WKK kan gesteld worden dat zelfs de regelingen van huidige condensatieketels in de praktijk niet altijd optimaal gebeuren.

#### 5.3.2 Regeling/sturing bijbrander (auxiliary burner)

Aangezien de Stirlingmotor afhankelijk van de fabrikant ongeveer 5 tot 7 kWth kan leveren, is een bijbrander noodzakelijk voor de piekmomenten van warmtevraag. Anderzijds vermindert een veelvuldig gebruik van de bijbrander de voordelen van cogeneratie: bij een minder goede regeling is er zelfs een risico dat de bijbrander constant ingeschakeld wordt en de Stirling over een heel jaar bekeken weinig elektriciteit produceert (zie ook risico ivm sturing en regeling). Het vermogen van de bijbrander die bij simulaties in deze studie gebruikt werd is beperkt: ongeveer 6 kWth. Dit in tegenstelling tot een aantal andere fabrikanten waar de bijbrander tussen 18 en 23 kWth kan bijleveren waardoor risico's op een warmtetekort nagenoeg uitgesloten worden. In het geval van de  $\mu$ WKK eenheid uit deze studie betekent dit dat om enerzijds voldoende draaiuren te kunnen maken en vanuit economisch en ecologisch perspectief voldoende elektriciteit te kunnen opwekken, een voldoende grote jaarlijkse warmtevraag nodig is. Door de grote warmtevraag in de piekmomenten bij dergelijke woningen, is een voldoende groot buffervat onontbeerlijk om aan de warmtevraag te kunnen voldoen. De fabrikant zelf raadt zijn  $\mu$ WKK eenheid aan voor huizen met een referentiegasverbruik van tussen 18 000 en 30 000 kWh en bij voorkeur tussen 23 000 en 28 000 kWh<sup>27</sup>. Uit de simulaties in deze studie blijkt dat economisch gezien een zo

---

<sup>27</sup> Aangenomen dat er met een totaal rendement van 90 % gewerkt wordt, komt dat overeen met een jaarlijkse warmtevraag tussen 20 700 en 25 200 kWh.



hoog mogelijke warmtevraag het meest rendeert hoewel vanaf een jaarlijkse warmtevraag boven 25 000 kWh er momentane problemen met het voldoen van de warmtebehoefte kan optreden. Om het risico op warmtetekorten te beperken, denkt de fabrikant erover in de toekomst een flexibele modulerende bijbrander te voorzien met een bereik tussen 6 en 30 kWth.

Andere fabrikanten van  $\mu$ WKK bekomen in veldtesten naar eigen zeggen vergelijkbare of betere resultaten met die in deze studie qua elektriciteitsproductie maar dan zonder buffervat. Bovendien moduleren die eenheden ook waardoor er flexibeler ingespeeld kan worden op de warmtevraag. Het nadeel bij die laatste fabrikanten is dat de eenheden nog niet commercieel beschikbaar zijn, beperkte technische informatie voor handen is en ook de (geschatte) kostprijs momenteel nog 1,5 tot 3 maal hoger ligt dan bij de in deze studie aangenomen  $\mu$ WKK eenheid.

### 5.3.3 Technische betrouwbaarheid systeem - kinderziektes

Zoals bij elke opkomende technologie het geval is, zal ook de  $\mu$ WKK te kampen hebben zogenaamde kinderziektes. Zo werden tijdens de uitgebreide veldtesten van Carbon Trust bij 25 % van alle eenheden motorfalen of andere problemen<sup>28</sup> gerapporteerd in het eerste jaar van inwerkingstelling. Ter vergelijking: voor gewone ketels worden problemen in het eerste jaar bij 1,5 tot 3 % van de nieuwe eenheden als aanvaardbaar beschouwd.

Bij een nieuwe technologie zijn technische moeilijkheden normaal, hoewel erover gewaakt moet worden dat bij een te vroege commerciële lancering de reputatie van  $\mu$ WKK's niet blijvend beschadigd wordt. Vanuit fabrikantenperspectief kan dit voorkomen worden door een heel geleidelijke introductie en uitgebreidere garanties in het beginstadium van lancering<sup>29</sup>.

### 5.3.4 Technische specificaties $\mu$ WKK versus praktijk - labelling

Tijdens veldtesten is reeds gebleken dat de rendementen in de praktijk soms sterk verschillen van de theoretische rendementen zoals opgegeven in de technische specificaties. Dit is normaal gezien de technische specificaties bepaald worden in standaard (labo-) omstandigheden. Allerhande redenen kunnen aangehaald worden voor de mindere prestaties in reële omstandigheden (slechte sturing/regeling, standby en start/stop verliezen, opslagverliezen, slechte dimensionering, technische problemen, ...). Voor de eindconsument én voor eventuele subsidiëring zou een officieel label waardoor bepaalde minimum rendementseisen gegarandeerd worden een zekerheid inhouden. Momenteel bestaan er voor verwarmingsketels in België bijvoorbeeld het HR+ en HRTop label om de kwaliteit en het rendement van een ketel aan te duiden. Voor  $\mu$ WKK ketels bestaat momenteel nog geen specifiek label. Bijkomend aandachtspunt is het feit dat een  $\mu$ WKK eenheid in feite een combinatie van een Stirling met een klassieke bijbrander is. Het is dan ook belangrijk dat bij het opstellen van specificaties voor het bepalen van een kwaliteitslabel voor  $\mu$ WKK met alle nodige aspecten rekening gehouden wordt. Een heel ogenschijnlijk hoog rendement "in-use" mag niet teniet gedaan worden door andere verliesposten (vb. start-stop verliezen).

De huidige technische specificaties met betrekking tot rendementen zijn bij veel (pré-) commerciële  $\mu$ WKK's onduidelijk.

---

<sup>28</sup> Voorbeelden: interne lekken in de motor, allerhande problemen met brander, geblokkeerde filters, lager dan verwachte elektriciteitsgeneratie, ...

<sup>29</sup> Zo is BAXI met een voorzichtige introductie in het Verenigd Koninkrijk gestart waarbij de helft van de geïnstalleerde units uitgerust worden met een datalogger voor opvolging van kortbij.

In Nederland heeft men inmiddels een Gaskeur HRe label in het leven geroepen dat speciaal ontworpen werd voor  $\mu$ WKK eenheden hoewel de waarde en correctheid ervan nog ter discussie staat. Cogen Europe zou zich momenteel ook richten op het bepalen van minimum vereisten waaraan een  $\mu$ WKK eenheid dient te voldoen.

### 5.3.5 Gevaar voor foutieve implementatie van $\mu$ WKK

Door zijn karakteristieken is de  $\mu$ WKK op basis van de Stirling uitermate geschikt in het geval van lange en consistente warmtevraag zodat het aantal start/stops en inschakeling van de bijbrander beperkt wordt en er op jaarlijkse basis zoveel mogelijk elektriciteit geproduceerd wordt. Door de lage kracht/warmte verhouding is dus een voldoende grote jaarlijkse warmtevraag aangewezen (zie sensitiviteitsanalyse). De fabrikanten mikken met de huidige technologie dan ook op renovatie van bestaande woningmarkt. Anderzijds is een te grote warmtevraag voor de gekozen  $\mu$ WKK eenheid ook absoluut te vermijden vanuit ecologische en comfortoverwegingen (hoewel voor die laatste overweging krachtige bijbranders of grotere buffervaten soelaas kunnen brengen). Meer nog dan bij een condensatieketel is het bij de keuze voor een  $\mu$ WKK dan ook noodzakelijk om een goed zicht te hebben van de warmtevraag én elektriciteitsvraag van een woning wat voor een particuliere bewoner niet altijd evident is.

Wat betreft de elektriciteitsvraag is in deze studie uitgegaan van een jaarlijks verbruik van 3 500 kWh wat met toepassing van de terugdraaiende teller voor installaties onder 10 kW en met de kenmerken van de  $\mu$ WKK eenheden bedoeld voor ééngezinwoningen betekent dat er over een gans jaar bekeken geen nettoproductie voorkomt (geen enkele van de gesimuleerde woningen gaf een jaarlijkse productie boven 3 500 kWh aan<sup>30</sup>). Momentaan kan er uiteraard meer elektriciteit opgewekt worden door de  $\mu$ WKK dan er op dat moment verbruikt wordt.

Zoals uit de sensitiviteitsanalyse blijkt, is een jaarlijkse warmtevraag beneden 15 000 kWh vanuit economisch standpunt minder voordelig. Ook de energetische en CO<sub>2</sub> besparingen zijn dan minder groot. Belangrijk echter te vermelden is het feit dat in het uitgangspunt een buffervat van 300 liter gebruikt wordt, waardoor de Stirling bij inschakelen toch een geruime tijd kan blijven draaien wat het elektrische rendement ten goede komt. Bij foutieve dimensionering of opstelling zoals in een woning met lage warmtevraag en/of een klein of geen buffervat, kan het jaarlijkse elektrische rendement sterk dalen. Uit de sensitiviteitsanalyse blijkt dat bij een te laag jaarlijks elektrisch rendement niet alleen het economische resultaat maar ook het ecologische resultaat (primaire energiebesparing en CO<sub>2</sub> besparing) negatief kan worden. Het valt dus aan te raden in eerste instantie energiebesparende maatregelen te treffen (zoals dubbel beglazing, na-isoleren van dak en muren) en dan eventueel tot het installeren van een  $\mu$ WKK over te gaan, om te vermijden dat bij een initiële warmtevraag die ogenschijnlijk (net) voldoende is voor besparingen dmv  $\mu$ WKK, na energiebesparende maatregelen de  $\mu$ WKK net tot extra uitstoot en verspilling gaat leiden [Peacock et al., 2007] [Dorer et al., 2008] of dat energiebesparende maatregelen uitgesteld (of afgesteld) worden. Dit zou betekenen dat eventuele ondersteuning van  $\mu$ WKK selectief en doordacht dient te gebeuren.

---

<sup>30</sup> Mocht dit wel het geval zijn, dan zou voor de economische berekening daar rekening mee gehouden moeten worden, omdat in het beste geval een terugleververgoeding kan aangenomen worden. Die terugleververgoedingen liggen echter in verhouding tot de elektriciteitsprijzen die door particulieren betaald worden heel erg laag wat voor die situatie dan ook nadelig is voor de economische haalbaarheid [De Paepe et al., 2005].

### 5.3.6 Andere technologieën

Ander beschikbare technologieën voor verwarming en/of opwekking elektriciteit kunnen ook een barrière zijn voor de introductie van  $\mu$ WKK hoewel elke technologie zijn eigen specificaties en karakteristieken heeft. Warmtepompen kunnen in eerste instantie niet echt als concurrenten van  $\mu$ WKK beschouwd worden, doordat zij voornamelijk geschikt zijn voor woningen met een lage warmtevraag (voorbeeld nieuwbouw met goede isolatie of een kleine bestaande woning die voldoende geïsoleerd is). Nieuwere  $\mu$ WKK technologieën met een hogere kracht/warmte verhouding zoals in het geval van brandstofcellen zouden in de toekomst wel concurrentieel kunnen worden met warmtepompen. De commercialisering van  $\mu$ WKK op basis van brandstofcellen wordt in Europa nog niet verwacht binnen de 5 jaar.

Bij bestaande woningen waar eerder bijvoorbeeld al PV geïnstalleerd werd, kan een  $\mu$ WKK eenheid economisch gezien minder interessant worden door het gevaar een netto-producent te worden en een lage terugleververgoeding te krijgen voor op het net geïnjecteerde stroom.

Ook nieuwe technologieën kunnen op termijn concurreren met  $\mu$ WKK. Thermophotovoltaïcs kan daar een voorbeeld van zijn. Bij thermophotovoltaïcs wordt warmte omgezet in elektriciteit: een warmtebron verwarmt een emitter die op zijn beurt elektromagnetische straling produceert die opgevangen wordt door een fotonvoltaïsche cel die op die manier elektriciteit genereert. De vermogens en rendementen die hiermee haalbaar zijn, zijn momenteel nog onduidelijk.

## 5.4 Economische randvoorwaarden, barrières en risico's

### 5.4.1 Hoge investeringskost

In het economische luik van deze studie werd oorspronkelijk uitgegaan van een op dit moment reële investeringskost van iets meer dan 10 000 € inclusief buffervat en BTW voor een  $\mu$ WKK eenheid. De  $\mu$ WKK eenheid zelf werd op 8 000 € ingeschaald. Dit zijn reële prijzen voor een  $\mu$ WKK eenheid die in België commercieel verkocht wordt. Een aantal andere merken geven aan reeds over een commerciële eenheid te beschikken hoewel de prijs in die gevallen 1,5 tot 3 keer hoger ligt.

Zoals in de studie eerder al aangegeven werd (zie 4.3.1), zijn dergelijke prijsniveaus veel te hoog om van economische haalbaarheid te kunnen spreken. Een eenheidskost van 3 500 € geeft een dynamische terugverdientijd van 5 jaar en komt overeen met een totaalkost voor de installatie inclusief BTW van 5 512 €. Bij een eenheidskost van 5 000 € en een bijhorende totale investeringskost van 7 102 € ligt de dynamische terugverdientijd nog net onder de verwachte levensduur van de  $\mu$ WKK. Zoals steeds bij een opkomende technologie, zal hier wellicht de kip-ei problematiek spelen: kosten voor productie zullen pas significant gereduceerd kunnen worden bij hoge productievolumes terwijl een te hoge prijs net klanten zal afschrikken en een rem zal zijn op hoge afnamevolumes. Een (tijdelijke) goed afgewogen (zie andere risico's) investeringssubsidie kan hier soelaas brengen.

### 5.4.2 Evolutie energieprijzen

Over het algemeen kan verwacht worden dat op lange termijn de energieprijzen voor zowel aardgas als elektriciteit zullen stijgen. Voor  $\mu$ WKK speelt echter de spread (het verschil) tussen beide prijzen mee voor de economische haalbaarheid, zie 4.3.3. Uit

deze studie blijkt dat een zelfde procentuele stijging van zowel aardgas als elektriciteit in het voordeel is van  $\mu$ WKK (zie Figuur 30 en Figuur 31). Enkel in het geval de prijs van aardgas sneller zou stijgen dan elektriciteit, zou er een potentieel probleem voor de economische haalbaarheid kunnen optreden. Aardgasprijzen en elektriciteitsprijzen staan echter niet helemaal los van elkaar: gasgestookte elektriciteitscentrales zijn meestal de centrales die de evenwichtsprijs gaan bepalen, zeker op de piekmomenten omdat gasgestookte centrales zich eerder in dat peak load segment bevinden. Bovendien evolueren gas- en elektriciteitsprijzen op de wholesale markten vaak in dezelfde richting waardoor er voor de eindklant in principe altijd een zekere marge zal bestaan. Bij de simulaties die in deze studie uitgevoerd werden, bleek reeds dat enkel bij extreme situaties (vb. elektriciteitsprijs 0,15 €/kWh en aardgasprijs 0,1 €/kWh) de economische haalbaarheid van  $\mu$ WKK in het gedrang komt. Bij een ongelijke procentuele stijging van aardgas- en elektriciteitsprijzen vertrekkende van de huidige situatie en een eenheidskost voor  $\mu$ WKK van 3 500 €, blijkt bovendien dat de terugverdientijden relatief stabiel blijven op 4 (eenvoudige) en 5 (dynamische) jaar voor (bv. 3 % jaarlijkse elektriciteitsprijsstijging bovenop inflatie en tegelijk 8 % aardgasprijsstijging). In die gevallen treedt enkel op heel lange termijn (20 jaar) een probleem op bij een negatieve cashflow mocht die trend zich voortzetten wat heel onwaarschijnlijk is.

### 5.4.3 Teruglevering aan het elektriciteitsnet

Zoals eerder in de studie aangegeven (4.1.5) werd in de economische haalbaarheidsanalyse aangenomen dat alle door de  $\mu$ WKK gegenereerde elektriciteit aan de inkoopprijs gevalideerd kan worden door het principe van de terugdraaiende teller.

Wanneer het elektriciteitsverbruik echter uitzonderlijk lager dan gemiddeld (3 500 kWh) zou liggen of in een voorbeeldsituatie waarbij een dag-nacht teller gebruikt wordt en het verbruik van één van de tellers zo laag ligt dat dit in netto productie resulteert, dient de klant bij voorkeur een teruglevercontract met een leverancier te sluiten, zoniet wordt voor de netto geproduceerde elektriciteit die door de  $\mu$ WKK op het net gezet wordt geen vergoeding ontvangen. De vergoedingen voor teruggeleverde elektriciteit zijn momenteel echter zo laag (lager de eenheidsprijs voor ingekocht aardgas) dat het te betwijfelen valt of dit gunstig kan uitdraaien voor de eindgebruiker. Netto productie zal met andere woorden zeker een negatieve impact hebben op het economische plaatje.

## 5.5 Regelgevende en andere randvoorwaarden, barrières en risico's

### 5.5.1 WKC prijzen

De prijs voor warmtekrachtcertificaten werd in het model aangenomen 41 € per certificaat te zijn. Het is echter heel onzeker dat dergelijke prijzen voor heel kleine (particuliere)  $\mu$ WKK's gehaald zullen worden: sinds maart 2009 zal er wellicht een beurs voor warmtekrachtcertificaten opgestart worden zodat micro-producenten niet verplicht bilateraal hun WKC's moeten verkopen maar ook bij deze beurs zijn de aangekondigde toegangsprijzen te hoog<sup>31</sup> om voor particulieren interessant te zijn. Het is dus wellicht mogelijk dat particuliere  $\mu$ WKK producenten in de praktijk hun WKC's aan de minimumprijs van 27 € per WKC zullen overlaten aan distributienetbeheerders. Voor die laatste kan dit een extra kost zijn of een extra opbrengst wanneer ze erin

---

<sup>31</sup> 500 € entrance fee en 1000 € jaarlijkse fee naast een operationele fee van 0,45 € per certificaat.

slagen die WKC's aan de huidige marktprijzen door te verkopen. Voor de economische haalbaarheid is de impact van dit risico eerder beperkt: uit de sensitiviteitsanalyse (zie 4.3.2) blijkt dat de terugverdientijden op hetzelfde niveau blijven bij lagere WKC prijzen aangezien het meeste financiële voordeel voortvloeit uit de lokale productie van elektriciteit en niet zozeer uit het valoriseren van WKC's.

### 5.5.2 Omslachtige aanvraagprocedure WKK-certificaten

De huidige aanvraagprocedure voor heel kleine  $\mu$ WKK's en het aanvraagformulier is behoorlijk uitgebreid en voor een leek niet altijd eenvoudig in te vullen. Zo beslaat het aanvraagformulier voor WKK installaties met een elektrisch vermogen  $\leq 10$  kW 8 bladzijden waarbij onder andere een keuze gemaakt moet worden uit 11 mogelijke technologieën, een energiestroomdiagram voorzien moet worden, specificaties met betrekking tot de meetapparatuur aangegeven moeten worden, enz. Bij het invullen van het formulier zal de aanvrager wellicht assistentie nodig hebben van de installateur. Bovendien moeten ook rendementen ingevuld worden. Die zijn niet altijd even duidelijk in de technische specificaties van de fabrikanten vermeld: rendementen zijn mogelijk zonder bijbrander of met bijbrander, vermogens kunnen in ranges aangegeven worden, vermogens bij  $\mu$ WKK's voor particulieren worden in kW uitgedrukt terwijl op het formulier soms MW en kW gebruikt wordt... De manier waarop rendementen door de fabrikanten bepaald worden kan ook verwerkt worden in een certificering of labelling van het volledige systeem.

Duidelijke verplichtingen naar de fabrikanten toe wat betreft de manier waarop technische specificaties opgesteld moeten worden en een vereenvoudigd aanvraagformulier zou wellicht handig zijn. Daarnaast zou bij installatie van een  $\mu$ WKK, net zoals bij PV, een geijkte kWh teller voor het meten van de netto-elektriciteitsproductie en als bewijs voor het aanvragen van WKC's aangewezen zijn.

### 5.5.3 Inventiviteit gebruiker

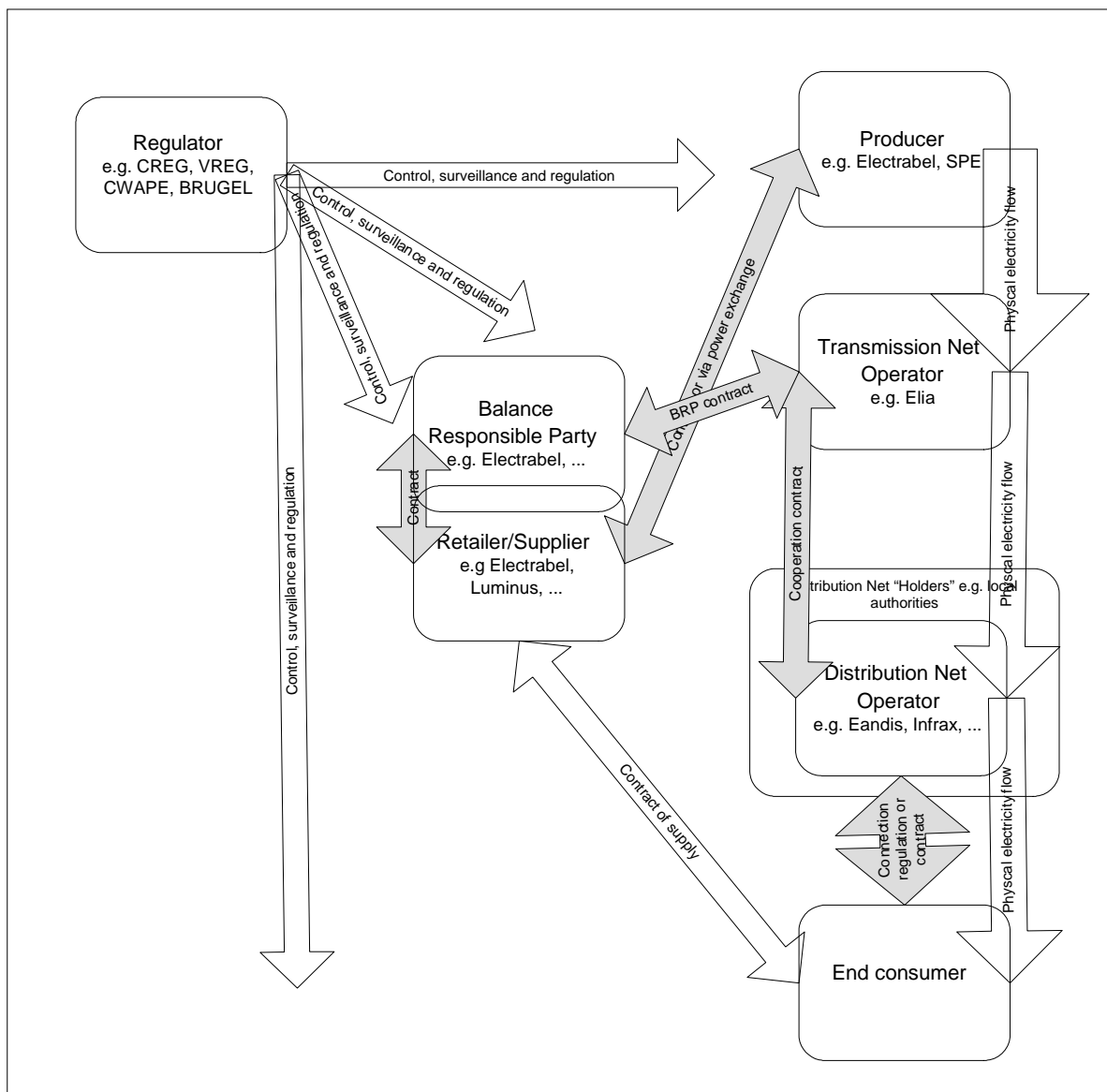
De eigenaar van een WKK installatie en dus ook een  $\mu$ WKK installatie heeft er alle belang bij veel elektriciteit te produceren (in het geval van een terugdraaiende teller: niet meer dan zijn eigen jaarlijks verbruik). Het valt te betwijfelen of particulieren zich gaan bezighouden met een strikte opvolging van de werking van hun  $\mu$ WKK en al dan niet bewust hun gedrag gaan aanpassen in functie van potentiële economische winsten, hoewel het niet uit te sluiten valt. Wanneer door verkeerd dimensioneren een overproductie aan elektriciteit dreigt te ontstaan over de periode, kunnen "slimme (?)"  
 $\mu$ WKK eigenaars ertoe aangezet worden de elektriciteit terug om te zetten in warmte (aan te wenden voor een elektrische boiler) om geen overbodige elektriciteit gratis op het net te plaatsen. De eerder beperkte elektrische efficiënties op deze schaal maken dat dit risico eerder beperkt is. Een eenvoudige manier om met potentiële overproductie om te gaan is een contract afsluiten met een leverancier voor een terugleveringvergoeding voor de op het net geplaatste elektriciteit. Het feit dat die vergoeding heel wat lager ligt dan de aankoopprijs én ook de aardgasprijs die eindafnemer bepaalt of dit al dan niet winstgevend is, maakt deze oefening voor een gewone particulier niet eenvoudig.

## HOOFDSTUK 6 POTENTIËLE VOOR- EN NADELEN MARKTACTOREN

Een uitgebreide kwantitatieve analyse van alle mogelijke voor- en nadelen voor de verschillende marktactoren viel buiten het budget van deze oriënterende studie.

Een sterk vereenvoudigde voorstelling van de verschillende actoren op de Belgisch-Vlaamse energiemarkt is terug te vinden in figuur 52.

*Figuur 52: Actoren op de Belgisch-Vlaamse energiemarkt*



In wat volgt wordt een beknopt overzicht gegeven van de verschillende actoren die potentiële voor- en nadelen van een grootschalige implementatie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen kunnen ondervinden.

### 6.1 (Centrale) Producenten

De productiemarkt van elektriciteit in België en Vlaanderen is sterk geconcentreerd: Electrabel (grote speler) en SPE (een kleine speler) produceren samen ongeveer 90 % van de elektriciteit in België. Verder zijn er nog een groeiend aantal kleine decentrale producenten<sup>32</sup>, de warmtekrachtkoppeling-producenten en de hernieuwbare energieproducenten. Aardgas wordt niet in België ontgonnen maar geïmporteerd uit het buitenland.

De grootschalige introductie van  $\mu$ WKK zou meer decentrale productie van elektriciteit betekenen en minder afname van centraal opgewekte elektriciteit: gezinnen zouden voor een stuk in hun eigen elektriciteitsbehoefte kunnen.

Gezien er bijvoorbeeld in 2007 om en bij 82 TWh door centrale producenten geproduceerd werd en het totale marktpotentieel in deze studie geschat werd op 300 000 tot 600 000 aansluitingen met gemiddeld 2 000 kWh aan lokale elektriciteitsproductie, zou de totale hoeveelheid elektriciteit die jaarlijks door  $\mu$ WKK opgewekt wordt tussen 0,64 TWh en 1,15 TWh liggen. Dit komt overeen met maximaal 1,5 % minder behoefte aan centraal opgewekte elektriciteit, wat heel beperkt is.

### 6.2 Transmissienetbeheerder

Electriciteit van de elektriciteitscentrales wordt via het hoogspanningsnet of transmissienet getransporteerd naar een distributienet, grote industriële verbruikers of naar het buitenland. Het beheer van dit transmissienet is een wettelijk monopolie en in handen van **nv Elia**. Het vervoer van aardgas gebeurt in België via het vervoernet van **nv Fluxys**. Fluxys is verantwoordelijk voor het transport van gas vanuit de voedingspunten en de opslagruimtes via het Belgische vervoernet naar grote afnemers of naar de distributienetten. Daarnaast verzorgt Fluxys enkele systeemdiensten zoals flexibiliteit op het net en aanverwante diensten voor transit en opslag van gas.

De implementatie van  $\mu$ WKK zou een kleine verlaging van transportbehoefte op het net tot gevolg hebben en een verhoging van de aardgasbehoefte. Op het niveau van transmissie zouden die veranderingen wellicht weinig impact hebben

### 6.3 Distributienetbeheerder

De VREG definieert de netbeheerder als volgt: *"De netbeheerder beheert, bouwt en onderhoudt voor een bepaald grondgebied het distributienet voor elektriciteit en/of aardgas en vervoert op vraag van de leverancier de energie tot bij de eindafnemer. ...*

---

<sup>32</sup> Eandis maakt een onderscheid tussen decentrale producenten en autoproducenten. Een elektriciteitsproducent wordt als decentrale producent beschouwd als 1) er een risico is op netto-injectie in het distributienet 2) de netgebruiker/leverancier/producent dit zelf vraagt 3) er sprake is van verschillende leveranciers bij afname/injectie 4) afzonderlijke valorisatie/informatie van de meetgegevens gewenst is. De productie van een decentrale producent kan dus ogenblikkelijk beschouwd groter zijn dan het verbruik. In alle andere gevallen (dus zonder enig risico op netto injectie, aangetoond door klant en klantbeheerder, én indien geen noodzaak aan afzonderlijke valorisatie/meetgegevens, wordt de producent als een autoproducent beschouwd. Bij een autoproducent is het verbruik altijd groter of gelijk aan de productie.

*De netbeheerders mogen niet langer elektriciteit of aardgas verkopen, tenzij ze daartoe wettelijk verplicht zijn, in hun rol van sociale leverancier.”*

Een verdere beschrijving van de verschillende specifieke distributienetbeheerders zou te ver leiden.

De gevolgen van een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK voor het distributienet zijn onzeker (zie ook 5.1 en 5.3 ivm randvoorwaarden, barrières en risico's). Een verhoogd aardgasverbruik zou tot problemen kunnen leiden met het aardgasnet hoewel dit sterk afhankelijk is van de geografische spreiding (zie 5.2<sup>33</sup>). De impact op het lokale elektriciteitsnet is van dezelfde aard als voor kleinschalige PV. Het voordeel van  $\mu$ WKK ten opzichte van fotovoltaïsche zonne-energie, is dat het moment van elektriciteitsproductie vaak samenvalt met het moment van verbruik. Warmtegedreven sturingen zullen de  $\mu$ WKK inschakelen op momenten dat er warmtevraag is, wat normaal samenvalt met het moment dat de bewoners aanwezig zijn en er ook een verhoogde vraag naar elektriciteit is. In de toekomst zou bij intelligente sturing van  $\mu$ WKK's in combinatie met een buffervat en een bepaalde flexibiliteit bij de regeling het totale piekverbruik uitgevlakt kunnen worden: veldtesten met Whispergen  $\mu$ WKK's in Nederland resulteerden in een reductie tussen 30 en 50 % van het piekvermogen [Warmer et al., 2007], wat eventueel noodzakelijke netwerkversterkingen zou kunnen beperken of uitstellen.

### 6.4 Energieleveranciers

De rol die energieleveranciers kunnen spelen bij een grootschalige implementatie van  $\mu$ WKK is momenteel nog onzeker. In sommige landen zijn leveranciers kandidaat om  $\mu$ WKK-eenheden te leasen aan hun klanten en wordt hiermee een mogelijkheid tot klantenbinding gezien. In Nederland investeren energieleveranciers zoals Essent en Nuon mee in de ontwikkelingen van  $\mu$ WKK omdat ze verwachten dat de introductie van  $\mu$ WKK de markt kan doen wijzigen en zij die evolutie van kortbij willen opvolgen om te kunnen inspelen op nieuwe opportuniteiten (diensten ter reductie van de complexiteit voor de klant, leasing, ...)

Voor de energiefactuur zou bij lokale productie door  $\mu$ WKK het onderdeel aardgas stijgen door een hoger verbruik maar zou dit meer dan gecompenseerd worden door de lokaal opgewekte elektriciteit die door de terugdraaiende teller in mindering gebracht wordt. Voor de totale factuur is er dus sprake van een vermindering (dit is uiteraard de basisvereiste voor economische haalbaarheid van  $\mu$ WKK vanuit het standpunt van eindafnemer).

### 6.5 Eindgebruiker

Voor de eindgebruiker zijn de potentiële voordelen economische besparingen die verwezenlijkt kunnen worden onder bepaalde voordelen, zie Hoofdstuk 4 Economische en milieu aspecten. Daarnaast zullen ecologische besparingen in de vorm van CO2 reductie en PEB op lange termijn voordelig zijn voor de hele gemeenschap.

---

<sup>33</sup> Uitgebreid onderzoek in samenwerking met een distributienetbeheerder zou de potentiële impact hiervan in kaart kunnen brengen.



## 6.6 Overheid

De interesse van de overheid in  $\mu$ WKK (en bij uitbreiding WKK in het algemeen) werd eerder al toegelicht in de motivatie voor deze studie: CO<sub>2</sub> besparing en energiebesparingen maken deel uit van het overheidsbeleid en werden in deze oriënterende studie ingeschat (zie 4.2.2 CO<sub>2</sub> besparing en 4.2.3 (Relatieve) primaire energiebesparing).

## 6.7 Fabrikanten

Het feit dat zo goed als alle gekende fabrikanten van verwarmingsketels zich momenteel toeleggen op onderzoek en ontwikkeling van  $\mu$ WKK's voor residentieel gebruik, geeft hun interesse aan. Voor hen is het een mogelijkheid om een nieuw kwalitatief hoogwaardig product op de markt te brengen en concurrentieel voordeel te bekomen door technologische innovatie tegen een haalbare prijs. Per eenheid zal de  $\mu$ WKK meer kosten dan een gewone condenserende verwarmingsketel maar bij een haalbare aankoop prijs en het vooruitzicht op een doenbare terugverdientijd ten opzichte van de condensatieketel, zal er wellicht voldoende interesse zijn op de markt waardoor niet alleen consument maar ook fabrikant er baat bij heeft.

## 6.8 Smart grids

Tot heel recent werd elektriciteit voornamelijk centraal geproduceerd in elektriciteitscentrales. Via het transmissienet (hoogspanning), over het distributienet (laagspanning) kwam het uiteindelijk bij de eindafnemer (in deze studie huishoudens) terecht. Deze traditionele top-down benadering zal in de toekomst geleidelijk aan niet meer opgaan, naarmate er meer en meer decentrale productie-eenheden ontstaan zoals PV, wind en (micro-)WKK.

Op dit moment worden de decentrale productie-eenheden gewoon geconnecteerd op het bestaande elektriciteitsnet volgens het "fit and forget"-principe: ze worden met andere woorden niet actief in rekening gebracht bij de uitbating omdat hun invloed op het net te gering geacht wordt<sup>34</sup>.

Bij toenemende "distributed generation" en hernieuwbare energiebronnen zal de "fit and forget"-filosofie niet meer gevolgd kunnen worden: betrouwbaarheid van het elektriciteitsnet is cruciaal en problemen zoals black outs, verstoorde spanningsprofielen, ongecontroleerde eilandwerking, elektriciteitsflows die niet meer per definitie in 1 richting gaan ... dienen in de hand gehouden te worden. Dit kan door de elektriciteitsnetten niet meer passief (fit and forget) maar actief te maken en te evolueren naar zogenaamde "Smart grids" waarbij toestellen (producerende en consumerende) op een intelligente manier gecontroleerd en gestuurd worden zodat het elektriciteitsnet een intelligent net of "smart grid" wordt. De top-down approach geldt op die manier niet meer aangezien ook bottom-up elektriciteit gegenereerd wordt en het distributienet in de oude betekenis van het woord (distribueren of verdelen van elektriciteit afkomstig van centrale productie-eenheden) evolueert naar een intelligent net met zowel consumptie als productie (genereren) van elektriciteit en nieuwe concepten.

Voor smart grids zijn regelbare/stuurbare decentrale opwekkers heel interessant. Technologieën zoals PV en wind zijn sterk afhankelijk van externe factoren en weinig

---

<sup>34</sup> Opmerking: In de Noorderkempen en rond Merksplas worden momenteel al investeringen in WKK-installaties geweigerd omdat de capaciteit van het distributienet niet voldoende is. Ook grotere PV-installaties vanaf 5 kWp zorgen momenteel soms heel lokaal reeds voor problemen op het distributienet.

tot niet regelbaar. Een  $\mu$ WKK eenheid kan binnen de warmtebehoefte-specificaties en zeker bij gebruik van een voldoende groot buffervat, flexibel ingezet worden op basis van de behoeften van de eindafnemer en het net. Door het thermisch bufferen van de warmte via een buffervat en in de toekomst misschien ook het elektrisch bufferen van de stroom (bv. met behulp van plug in hybrides of batterijen), zouden  $\mu$ WKK's heel flexibel aangestuurd kunnen worden en een rol kunnen spelen in de evolutie naar smart grids (zie ook het eerder vermelde voorbeeld van de veldtesten met  $\mu$ WKK's en intelligente sturing in 6.3).

## HOOFDSTUK 7      BESLUIT

In deze oriënterende studie wordt een eerste inschatting gemaakt van de mogelijkheden van  $\mu$ WKK voor residentiële toepassingen en meerbepaald ééngezinswoningen in Vlaanderen met betrekking tot economische en technische haalbaarheid, marktpotentieel en CO<sub>2</sub> en primaire energiebesparingspotentieel.

Wat technologieën voor  $\mu$ WKK in ééngezinswoningen betreft kan gesteld worden dat met de huidige stand van de technologie de  $\mu$ WKK's gebaseerd op Stirlingmotoren (met een hulpbrander) en met aardgas als brandstof op de drempel van commerciële doorbraak staan. ICE's zijn om allerlei redenen minder toepasbaar in woningen (geluidsniveau, gewicht, volume, trage opstarttijd, ...). De huidige microturbines hebben een te hoog elektrisch vermogen om toegepast te kunnen worden in ééngezinswoningen.  $\mu$ WKK op basis van brandstofcellen kunnen een toekomst hebben in woningen met lagere warmtevraag maar worden niet op commerciële schaal verwacht binnen 5 jaar.  $\mu$ WKK's op basis van een (al dan niet Organische) Rankine cyclus lijken ook op minder dan 5 jaar kans te maken hoewel er minder fabrikanten op deze technologie focussen.

België heeft een relatief oud woningpark en Vlaanderen beschikt over relatief veel open en half open bebouwingen. Bijna de helft van de Vlaamse woningen wordt verwarmd op aardgas, 36 % van alle woningen beschikt over een centrale verwarming op aardgas. In 2001 waren bijna 20 % van alle woningen half open of open én verwarmd op aardgas (+/- 466 000 woningen). Ongeveer 157 000 woningen of 6,5 % waren half open of open en gebouwd voor 1970, dus voor er sprake was van doorgedreven toepassing van isolatie. Op basis van de verbruiksgegevens in 2006 van aardgas bij de grootste DNB's in Vlaanderen kan afgeleid worden dat tussen 21 en 42 % van de huidige aansluitingen (of bij benadering 300 000 tot 600 000 huishoudens) op relatief korte termijn mogelijk in aanmerking komen voor toepassing van  $\mu$ WKK. Gecombineerd met jaarlijkse verkoopcijfers van verwarmingsketels komt bij grootschalige commerciële verkoop van  $\mu$ WKK's op 23 000 tot 46 000 eenheden per jaar voor Vlaanderen.

Bij de beoordeling van de economische haalbaarheid werd uitgegaan van volgende aannames voor het uitgangspunt naast de basisaanname van een terugdraaiende teller en het vermijden van nettoproductie over een facturatieperiode:

Totale investeringskost inclusief $\mu$ WKK eenheid, buffervat 300 liter, installatiekosten en BTW 6%)	10 000 €
Jaarlijkse warmtevraag	20 000 kWh
Elektriciteitsprijs (enkelvoudig)	0,18 €/kWh
Gasprijs (enkelvoudig)	0,06 €/kWh
Prijs WKC	41 €/certificaat
Referentie CO <sub>2</sub> emissiefactor inclusief nucleair	0,349 kg CO <sub>2</sub> /kWh
Referentie CO <sub>2</sub> emissiefactor exclusief nucleair	0,767 kg CO <sub>2</sub> /kWh

Jaarlijks (onderwaarde)	elektrisch	rendement	8 %
Jaarlijks (onderwaarde)	thermisch	rendement	82 %

De aannames in verband met de technische karakteristieken van de  $\mu$ WKK dienen in de juiste context geïnterpreteerd te worden. Gezien de beperkte technische informatie die in de markt beschikbaar is, is de analyse gebaseerd op technische kenmerken van de enige commercieel verkochte  $\mu$ WKK eenheid. De verwachting is dat in de komende jaren nieuwere eenheden van andere fabrikanten op de markt zullen komen die wellicht technisch gezien betere prestaties zullen leveren, hoewel dit nog niet objectief geverifieerd kon worden en er momenteel geen zicht is op de grootte van deze prestatieverbetering. Aan de hand van de sensitiviteitsanalyse in deze studie werd hierop geanticipeerd.

Het referentiepunt is een condenserende gasketel met totale installatiekost all in van ongeveer 4 000 € (eenheidskost condensatieketel van 2 000 €). De NPV van een  $\mu$ WKK eenheid aan die voorwaarden bedraagt bij actualisatievoet van 5 %, inflatie van 2 % en een levensduur van 15 jaar, ongeveer -3 000 €. De IRR is -5 % en de CO2 besparing naargelang de referentie emissie factor 246 kg tot 1061 kg per  $\mu$ WKK installatie en de PEB bedraagt iets meer dan 1 700 kWh. Voor het totale marktpotentieel vertaalt dit zich in een jaarlijkse CO2 reductie van bij benadering 75 000 ton tot 650 000 ton en een totale PEB van ongeveer 500 tot 1000 GWh. De eenvoudige en dynamische terugverdientijd bedraagt meer dan 20 jaar.

Uit een sensitiviteitsanalyse blijkt dat economische haalbaarheid bereikt wordt bij een maximum eenheidskost van de  $\mu$ WKK van 5 000 € (of totale installatiekost all in van ongeveer 7 100 €) maar bij voorkeur een eenheidskost van 3 500 € (ten opzichte van 2000 € voor een klassieke condensatieketel) om een eenvoudige en dynamische terugverdientijd van respectievelijk 4 en 5 jaar te behalen. De NPV bedraagt dan 1 200 € en de IRR 23 %. Stijgende energieprijzen voorzover ze procentueel ongeveer gelijk evolueren voor aardgas en elektriciteit zijn in het voordeel van  $\mu$ WKK wat betreft economische haalbaarheid. Het risico van een te beperkte spread tussen de elektriciteitsprijs en aardgasprijs is beperkt: bij de onderzochte gevallen treedt enkel een probleem op bij 0,1 €/kWh (ipv 0,06 €/kWh vandaag) voor aardgas gecombineerd met een lage elektriciteitsprijs van 0,15 €/kWh (ipv 0,18 €/kWh).

In het geval van de een  $\mu$ WKK zonder modulerende mogelijkheden en een beperkt thermisch vermogen van de bijbrander, is een buffervat absoluut noodzakelijk voor een goede werking van de  $\mu$ WKK eenheid. Voor een jaarlijkse warmtevraag van 20 000 kWh is een buffervat van 50 of 150 liter volgens de gemaakte simulaties te beperkt om warmtetekorten volledig uit te sluiten: een buffervat van 300 liter is aangewezen. Jaarlijkse warmtevragen boven 25 000 kWh geven aanleiding tot risico op momentane warmtetekorten, zelfs met een buffervat van 300 of 500 liter. Reden daarvoor is het beperkt totaal thermisch vermogen van 13 tot 14 kWth van de gebruikte  $\mu$ WKK. Nieuwere eenheden die binnenkort marktrijp zijn beschikken over grotere bijbranders waardoor dit risico gereduceerd wordt.

Vanuit economisch perspectief dient de  $\mu$ WKK zoveel mogelijk draaiuren te maken. Het gemiddelde jaarlijkse elektrische rendement is cruciaal voor zowel ecologische als economische besparingen: een jaarlijks elektrisch rendement van 5 % of lager is nefast. Het gebruik van een voldoende groot buffervat en toepassing van  $\mu$ WKK bij voldoende grote warmtevraag kan dit risico beperken. Op basis van de simulaties en in de veronderstelling van een voldoende groot buffervat rond 300 liter is een jaarlijkse warmtevraag tussen 15 000 en 25 000 kWh aangewezen om het beste resultaat te verkrijgen.

Randvoorwaarden, barrières en risico's kunnen als volgt samengevat worden:

- De impact op het lokale elektriciteitsnet is van dezelfde aard als voor kleinschalige PV met dit verschil dat de gelijktijdigheid tussen elektriciteitsproductie en -consumptie maar ook de gebruiksduur hoger is dan voor PV.
- Onzekere impact op het lokale aardgasnet.
- Technische randvoorwaarden, barrières en risico's
  - Goed begrip van regeling/aansturing door installateur en gebruiker is noodzakelijk
  - Technische betrouwbaarheid systeem moet nog verbeteren - kinderziektes
  - Technische specificaties versus prestaties in realiteit: noodzaak aan labeling (cfr HR+ en HRTop)
  - Goede sturing en regeling van de bijbrander (en bij uitbreiding de hele  $\mu$ WKK eenheid) is cruciaal
  - Gevaar voor foutieve implementatie van een  $\mu$ WKK
  - Andere "concurrerende" technologieën zoals thermophotovoltaïcs
- Economische randvoorwaarden, barrières en risico's
  - Huidige hoge investeringskost
  - Evolutie energieprijzen: de spread tussen elektriciteit- en gasprijs heeft een impact op de economische haalbaarheid
  - Teruglevering aan het elektriciteitsnet
- Ondersteuning, regelgeving en consumentengedrag
  - Onzekerheid over evolutie WKC verkoopprijzen en praktische modaliteiten voor het verkopen van WKC's door particulieren
  - Omslachtige aanvraagprocedure WKC's
  - Dumpen overbodige warmte of andere vormen van misbruik voor economische optimalisatie

Wat betreft de impact van een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen, zullen de voordelen wellicht verdeeld worden over fabrikanten, eindafnemers, overheid en distributienetbeheerders. Fabrikanten kunnen een kwalitatief hoogwaardig product verkopen aan een hogere prijs dan een gewone condensatieketel terwijl de eindafnemer bij een haalbare investeringskost kan besparen, de investering kan terugverdienen en er uiteindelijk ook financieel wel bij kan varen, naast de ecologische besparingen die verwezenlijkt worden door de technologie. Overheid kan  $\mu$ WKK aanwenden tot het reduceren van CO<sub>2</sub> en voor primaire energiebesparingen. Het blind koppelen van decentrale opwekkers op het distributienet kan lokaal problemen met het distributienet veroorzaken maar het intelligent gebruiken van  $\mu$ WKK's door een goede sturing/regeling kan net leiden tot het reduceren van dergelijke problemen. Verder diepgaand onderzoek en veldtesten in de praktijk kunnen deze ingeschatte effecten nog meer onderbouwen.

## LITERATUURLIJST

- [Auditconvenant, 2008] Auditconvenant, 2008, [www.auditconvenant.be](http://www.auditconvenant.be)
- [Bartiaux et al., 2005] Bartiaux, F., Vekemans, G., Gram-Hanssen K., Maes, D., Cantaert, M., Spies, B., Desmedt, J., 2005, Socio-technical factors influencing Residential Energy Consumption (SEREC), blz. 1-222.
- [Belgisch Staatsblad1, 2006] Belgisch Staatsblad, 2006, Besluit van de Vlaamse Regering ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties van 7 juli 2006, 1 december 2006, blz. 66753-66776.
- [Belgisch Staatsblad2, 2006] Belgisch Staatsblad, 2006, ministerieel besluit inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties, 6 oktober 2006, blz. 6687-66790.
- [Biomass Technology Group, 2007] Biomass Technology Group, 2007, Micro gas turbine fact sheet, blz.1-5.
- [BRG Consult, 2008] BRG Consult, 2008, The European Heating Product Markets: Belgium Update 2008, blz. 1-326.
- [Carbon Trust, 2007] Carbon Trust, 2007, Micro-CHP Accelerator Interim Report November 2007, blz. 1-104.
- [CFCL, 2008] Ceramic Fuel Cell Limited, 2008, CFCL hits 50 % electrical efficiency in micro-CHP, Fuel Cells Bulletin, vol. 2008, issue 11, November 2008, blz. 4.
- [Cobben 2007] Cobben, J.,2007, Power Quality Implications at the point of Connection, doctoraatscriptie, TU Eindhoven, ISBN: 978-90-386-1030-6
- [COGEN Vlaanderen, 2006] COGEN Vlaanderen, 2006, Basishandboek warmtekrachtkoppeling, blz. 1-173.
- [de Jong et al., 2006] de Jong Arjen, Bakker Ernst-Jan, Dam Jan, van Wolferen Hans, 2006, Technisch energie- en CO2 besparingspotentieel van micro-WKK in Nederland (2010-2030), [http://www.senternovem.nl/mmfiles/Technisch%20energie%20en%20CO2-besparingspotentieel%20van%20micro-wkk%20in%20Nederland%20\(2010-2030\)\\_tcm24-201008.pdf](http://www.senternovem.nl/mmfiles/Technisch%20energie%20en%20CO2-besparingspotentieel%20van%20micro-wkk%20in%20Nederland%20(2010-2030)_tcm24-201008.pdf)
- [Dentice d'Accadia et al., 2003] M. Dentice d'Accadia, M. Sasso, S. Sibilio, L. Vanoli, 2003, Micro-combined heat and power in residential and light commercial applications, Applied Thermal Engineering, vol. 23, blz. 1247-1259.
- [De Paepe et al., 2005] Michel De Paepe, Peter D'Herdt, David Mertens, Micro-CHP systems for residential applications, Energy Conversion and Management, vol. 47, blz. 3435-3446.
- [Dorer et al., 2008] Dorer Viktor, Weber Andreas, 2008, Energy and CO2 emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation programs, Energy Conversion and Management.

- [Duerinck et al., 2006] Jan Duerinck, Katleen Briffaerts, An Vercalsteren, Wouter Nijs, Ina De Vlieger, Liesbeth Schrooten, Diane Huybrechts, 2006, Energie- en broeikasgasscenario's voor het Vlaamse gewest: referentiescenario tot en met 2012 – Eindrapport, blz. 1-165.
- [ECODATA, 2008] ECODATA, FOD Economie, KMO, Middenstand & Energie, 2008, Gebouwen volgens het kadaster, <http://ecodata.mineco.fgov.be/mdn/Kadaster.jsp>.
- [EMIS, 2008] EMIS, 2008, Onderste en bovenste verbrandingswaarde van aardgas, kencijfers beschikbaar op [www.emis.vito.be](http://www.emis.vito.be).
- [Enatec, 2007] Enatec, 2007, Press release, [http://www.enatec.com/pdf/persn/Persbericht\\_September\\_2007\\_Enatec\\_NL.pdf](http://www.enatec.com/pdf/persn/Persbericht_September_2007_Enatec_NL.pdf).
- [FOD Economie, 2008] FOD Economie, 2008, [http://statbel.fgov.be/census/localres02\\_nl.asp](http://statbel.fgov.be/census/localres02_nl.asp).
- [Harrison, 2008] Harrison Jeremy, 2008, [www.microchap.info](http://www.microchap.info).
- [Honda], Honda press release, <http://world.honda.com/news/2007/c070717Compact-Household-cogeneration-Unit/>
- [Immothekeer, 2009] Immothekeer, 2009, rentebarometer beschikbaar op [www.immothekeer.be](http://www.immothekeer.be).
- [IPCC, 1997] IPCC, Greenhouse gas inventory reference manual (IPCC 1996 Revised Guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 3), s.l., 1997.
- [Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2004] Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2004, Micro turbines: een nieuwe opportuniteit voor WKK, blz. 1-32.
- [Murray Thomson 2008] Murray Thomson, High Density Micro-Generation in UK distribution networks, First International Conference and Workshop on Micro-Cogeneration Technologies and Applications, April 30<sup>th</sup>- May 1<sup>st</sup>, Ottawa.
- [National Board of Housing Sweden et al., 2005] National Board of Housing, Building and planning Sweden, Ministry for Regional Development of the Czech Republic, 2005, Housing Statistics in the European Union 2004, blz. 1-126, <http://www.eukn.org/binaries/eukn/netherlands/research/2006/3/housing-statistics-in-the-european-union-2004.pdf>.
- [Nishizaki, 2008] Nishizaki, K., 2008, The Japanese experience in micro-CHP for residential use, Proceedings Gas Industry Micro-CHP Workshop 2008 Paris, <http://www.marcoqaz.org/>.
- [Omata, 2007] Omata, T., 2007, Current status of the Large-Scale Stationary Fuel Cell Demonstration Project in Japan, Proceedings Fuel Cell Seminar 2007, [http://www.fuelcellseminar.com/2007\\_presentations.asp](http://www.fuelcellseminar.com/2007_presentations.asp).
- [Onovwiona et al., 2006] H.I. Onovwiona, V.I. Ugursal, 2006, Residential cogeneration systems: review of the current technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 10, blz. 389-431.
- [Peacock et al., 2007] Peacock, A.D., Newborough, M., 2007, Effect of heat-saving measures on the CO<sub>2</sub> savings attributable to micro-combined heat and power ( $\mu$ CHP) systems in UK dwellings, Energy 33, blz. 601-612.

[Pilavachi, 2002] Pilavachi PA, 2002, Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power, Applied Thermal Engineering, vol. 22, blz. 2003-2014.

[Senternovem, 2005] Senternovem, <http://www.senternovem.nl/epn/maatregelen/verwarming/warmtekrachtinstallatie.asp#>.

[Synergrid,2006] Synergrid, 2006, C10/11: Specifieke technische voorschriften voor decentrale productie-installaties die in parallel werken met het distributienet" beschikbaar op

[http://www.synergrid.be/Media/C10-11NL2006\\_06.pdf](http://www.synergrid.be/Media/C10-11NL2006_06.pdf) (oude)

<http://www.vreg.be/vreg/documenten/Consultatienota/66208.pdf> (consultatienota)

[Verbeeck et al., 2006] Verbeeck Griet, et al., 2002-2006, IWT GBOU-Project 020212.

[Vlaamse Overheid, 2006] Vlaamse Overheid, 2006, Het Vlaams klimaatbeleidsplan 2006-2012, [http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/toncontract/vkp\\_2006-2012\\_def.pdf](http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/toncontract/vkp_2006-2012_def.pdf), blz. 1-126.

[VREG, 2009] VREG, 2009, Nieuwsbrief over evolutie prijzen groenestroom- en warmtekrachtcertificaten, [http://www.vreg.be/nl/nieuwsbrief/2009/01/Prijzontwikkeling%202008\\_prof.asp](http://www.vreg.be/nl/nieuwsbrief/2009/01/Prijzontwikkeling%202008_prof.asp).

[Weilandproef 2007] Bozelie J., Van Hes M.t, Rensink R., van Riet M., WEILANDPROEF APELDOORN MICRO COMBINED HEAT & POWER  $\mu$  CHP Measurement overview

[Warmer et al., 2007] Warmer, C.J., Hommelberg, M.P.F., Roossien, B., Kok, J.K., Turkstra, J.W., A field test using agents for coordination of residential micro-chp, 14<sup>th</sup> International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, November 4<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> Taiwan.



## BIJLAGE A(De)CENTRALE VERWARMINGSSYSTEMEN IN VLAANDEREN

toestand 2000 centraal										
bouwjaar	type woning	type verwarming						som per type woning		
		stookolie	LPG	aardgas	elektriciteit	hout	steenkool			
< 1945	appartement	11327	198	31741	2568	42	20			45896
	open bebouwing	60809	1653	22670	921	605	277			86935
	gesloten bebouwing	34644	340	100670	1835	202	207			137898
	half open bebouwing	34942	636	33890	784	279	133			70664
	<b>Som &lt; 1945</b>	<b>141722</b>	<b>2827</b>	<b>188971</b>	<b>6108</b>	<b>1128</b>	<b>637</b>	<b>341393</b>		
1946-1970	appartement	60471	294	94677	7382	44	52			162920
	open bebouwing	168373	1423	42886	1981	764	376			215803
	gesloten bebouwing	46457	192	68847	1517	146	124			117283
	half open bebouwing	90909	549	57763	1313	317	205			151056
	<b>som 1946-1970</b>	<b>366210</b>	<b>2458</b>	<b>264173</b>	<b>12193</b>	<b>1271</b>	<b>757</b>	<b>647062</b>		
1971-1990	appartement	21515	168	68290	8729	34	30			98766
	open bebouwing	164837	1366	74337	15226	1035	569			257370
	gesloten bebouwing	12997	55	39975	1683	111	57			54878
	half open bebouwing	38081	151	53373	3425	304	156			95490
	<b>som 1971-1990</b>	<b>237430</b>	<b>1740</b>	<b>235975</b>	<b>29063</b>	<b>1484</b>	<b>812</b>	<b>506504</b>		
>1990	appartement	3379	153	56543	10061	11	11			70158
	open bebouwing	61400	898	66913	3604	406	53			133274
	gesloten bebouwing	1367	33	15130	767	18	9			17324
	half open bebouwing	7284	130	29100	1047	84	16			37661
	<b>som &gt; 1990</b>	<b>73430</b>	<b>1214</b>	<b>167686</b>	<b>15479</b>	<b>519</b>	<b>89</b>	<b>258417</b>		
	som appartementen per type verw	96692	813	251251	28740	131	113			377740
	som open bebouwing per type verw	455419	5340	206806	21732	2810	1275			693382
	som gesloten bebouwing per type verw	95465	620	224622	5802	477	397			327383
	som half-open bebouwing per type verw	171216	1466	174126	6569	984	510			354871
										1753376 totaal verticaal
centraal	som alle gebouwen per type verw	818792	8239	856805	62843	4402	2295	1753376		<b>1753376</b> totaal horizontaal

Bron: eigen bewerking op basis van NIS

Bijlage A(De)centrale verwarmingssystemen in Vlaanderen

toestand 2000 decentraal											
bouwjaar	type woning	type verwarming						som per type woning			
		stookolie	LPG	aardgas	elektriciteit	hout	steenkool				
< 1945	appartement	839	355	21526	4532	163	527				27942
	open bebouwing	24820	6291	12823	5441	6517	14313				70205
	gesloten bebouwing	17398	1850	102984	9723	2454	13654				148063
	half open bebouwing	17564	2814	25502	4568	2871	8906				62225
	<b>Som &lt; 1945</b>		<b>60621</b>	<b>11310</b>	<b>162835</b>	<b>24264</b>	<b>12005</b>	<b>37400</b>		<b>308435</b>	
1946-1970	appartement	1169	281	24787	8013	121	490				34861
	open bebouwing	17158	4095	10815	6043	3436	7001				48548
	gesloten bebouwing	11116	901	45465	6026	947	4589				69044
	half open bebouwing	17758	2568	27047	5895	1625	5834				60727
	<b>som 1946-1970</b>		<b>47201</b>	<b>7845</b>	<b>108114</b>	<b>25977</b>	<b>6129</b>	<b>17914</b>		<b>213180</b>	
1971-1990	appartement	309	81	2236	11741	65	50				14482
	open bebouwing	4141	1194	3187	34315	3441	2345				48623
	gesloten bebouwing	1096	89	3109	3917	324	507				9042
	half open bebouwing	1966	302	3131	9050	865	917				16231
	<b>som 1971-1990</b>		<b>7512</b>	<b>1666</b>	<b>11663</b>	<b>59023</b>	<b>4695</b>	<b>3819</b>		<b>88378</b>	
>1990	appartement	125	31	1759	15435	31	10				17391
	open bebouwing	1345	313	1579	11145	1282	345				16009
	gesloten bebouwing	116	9	687	1803	68	35				2718
	half open bebouwing	322	51	829	3337	268	103				4910
	<b>som &gt; 1990</b>		<b>1908</b>	<b>404</b>	<b>4854</b>	<b>31720</b>	<b>1649</b>	<b>493</b>		<b>41028</b>	
	som appartementen per type verw	2442	748	50308	39721	380	1077				94676
	som open bebouwing per type verw	47464	11893	28404	56944	14676	24004				183385
	som gesloten bebouwing per type verw	29726	2849	152245	21469	3793	18785				228867
	som half-open bebouwing per type verw	37610	5735	56509	22850	5629	15760				144093
											651021 totaal verticaal
decentraal	som alle gebouwen per type verw	117242	21225	287466	140984	24478	59626				651021 totaal horizontaal
<1945	som alles (centraal en decentraal)	202343	14137	351806	30372	13133	38037				649828 <1945
1946-1970	som alles (centraal en decentraal)	413411	10303	372287	38170	7400	18671				860242 1946-1970
1971-1990	som alles (centraal en decentraal)	244942	3406	247638	88086	6179	4631				594882 1971-1990
>1990	som alles (centraal en decentraal)	75338	1618	172540	47199	2168	582				299445 >1990
	som per type verw (centraal en decentraal)	936034	29464	1144271	203827	28880	61921		2404397		2404397 totaal aantal woningen

Bron: eigen bewerking op basis van NIS

**BIJLAGE B VERKOOP VERWARMINGSKETELS BELGIË**

Sector	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
New Build	32 770	32 860	32 110	31 010	33 400	32 640	31 230	34 090	40 360	45 850	53 590	52 000	46 960	48 070	47 760	47 630	47 370
First Time Installation	30 860	32 570	30 110	28 070	27 560	27 980	25 400	28 270	26 310	26 910	29 050	28 150	26 840	26 500	26 280	26 360	26 630
Replacement	63 350	72 240	71 110	71 430	74 350	84 550	83 630	95 820	101 770	104 870	112 300	110 560	117 300	119 150	123 250	128 000	133 380
Non-Housing	9 580	10 360	10 040	9 820	9 870	10 260	8 970	8 230	7 940	7 960	9 610	11 080	12 200	11 710	11 260	10 630	10 920
Total	136 530	148 030	143 370	140 325	145 220	156 430	149 430	164 530	176 380	186 610	204 560	201 790	203 300	205 430	208 540	212 620	218 300

Bron: [BRG Consult, 2008]

**BIJLAGE C TECHNISCH-ECONOMISCHE RESULTATEN STANDAARD SITUATIE  $\mu$ WKK**

Economische analyse												
	invest meerkost	extra belasting- voordeel	invest subsidie	netto investering	vermeden aankoop elektriciteit	opbrengst WKKC	kosten extra gasverbruik	extra werkings- en onderhouds- kosten	netto cash flow	DCF	Sommatie CFs	Sommatie DCFs
0	-6.360		0	-6.360					-6.360	-6.360	-6.360	-6.360
1		1.201	0	1.201	351	71	-143	0	1.480	1.382	-4.880	-4.978
2			0	0	351	71	-143	0	279	243	-4.600	-4.734
3			0	0	351	71	-143	0	279	227	-4.321	-4.507
4			0	0	351	71	-143	0	279	212	-4.042	-4.295
5			0	0	351	60	-143	0	269	191	-3.773	-4.104
6			0	0	351	39	-143	0	247	164	-3.526	-3.940
7			0	0	351	18	-143	0	226	140	-3.300	-3.801
8			0	0	351	0	-143	0	208	120	-3.092	-3.681
9			0	0	351	0	-143	0	208	112	-2.884	-3.568
10			0	0	351	0	-143	0	208	105	-2.676	-3.463
11			0	0	351	0	-143	0	208	98	-2.468	-3.366
12			0	0	351	0	-143	0	208	91	-2.260	-3.274
13			0	0	351	0	-143	0	208	85	-2.052	-3.189
14			0	0	351	0	-143	0	208	80	-1.844	-3.109
15			0	0	351	0	-143	0	208	74	-1.635	-3.035
16			0	0	351	0	-143	0	208	69	-1.427	-2.965
17			0	0	351	0	-143	0	208	65	-1.219	-2.900
18			0	0	351	0	-143	0	208	61	-1.011	-2.840
19			0	0	351	0	-143	0	208	57	-803	-2.783
20			0	0	351	0	-143	0	208	53	-595	-2.731

**BIJLAGE D TECHNISCH-ECONOMISCHE RESULTATEN NIEUW FISCAAL REGIME**

Economische analyse												
	invest meerkost	extra belasting- voordeel	invest subsidie	netto investering	vermeden aankoop elektriciteit	opbrengst WKKC	kosten extra gasverbruik	extra werkings- en onderhouds- kosten	netto cash flow	DCF	Sommatie CFs	Sommatie DCFs
0	-6.360		0	-6.360					-6.360	-6.360	-6.360	-6.360
1		1.201	0	1.201	351	71	-143	0	1.480	1.382	-4.880	-4.978
2		1.343	0	1.343	351	71	-143	0	1.622	1.414	-3.258	-3.564
3		0	0	0	351	71	-143	0	279	227	-2.978	-3.336
4		0	0	0	351	71	-143	0	279	212	-2.699	-3.124
5			0	0	351	60	-143	0	269	191	-2.430	-2.933
6			0	0	351	39	-143	0	247	164	-2.183	-2.770
7			0	0	351	18	-143	0	226	140	-1.958	-2.630
8			0	0	351	0	-143	0	208	120	-1.750	-2.510
9			0	0	351	0	-143	0	208	112	-1.541	-2.398
10			0	0	351	0	-143	0	208	105	-1.333	-2.293
11			0	0	351	0	-143	0	208	98	-1.125	-2.195
12			0	0	351	0	-143	0	208	91	-917	-2.104
13			0	0	351	0	-143	0	208	85	-709	-2.018
14			0	0	351	0	-143	0	208	80	-501	-1.939
15			0	0	351	0	-143	0	208	74	-293	-1.864
16			0	0	351	0	-143	0	208	69	-84	-1.795
17			0	0	351	0	-143	0	208	65	124	-1.730
18			0	0	351	0	-143	0	208	61	332	-1.669
19			0	0	351	0	-143	0	208	57	540	-1.613
20			0	0	351	0	-143	0	208	53	748	-1.560