

## Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling met

Titel: Mogelijkheden voor warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector. Gevalstudie voor een appartementsgebouw

Richting: 3de jaar handelsingenieur - major technologie

Jaar: 2008

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

BECKERS, Yordi

Datum: 5.11.2008

# *Mogelijkheden voor warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector*

## *Gevalstudie voor een appartementsgebouw*

**Yordi BECKERS**

promotor :  
Prof.dr.ir Frans LEMEIRE

## Woord vooraf

Deze eindeverhandeling vormt het sluitstuk van mijn opleiding Handelsingenieur met als afstudeerrichting Technologie aan de Faculteit TEW van de Universiteit Hasselt. Gezien deze opleiding en mijn sterke interesse in het energievraagstuk, heb ik gekozen voor "Warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector" als onderwerp voor deze eindverhandeling. Dit werkstuk is mede kunnen slagen door de medewerking en hulp van een aantal personen. Deze zou ik dan ook graag langs deze weg willen bedanken voor hun tijd en medewerking.

In de eerste plaats wens ik mijn promotor, prof. dr. ir. Frans Lemeire, te bedanken voor zijn uitstekende begeleiding en advies bij het uitwerken van deze eindverhandeling. Zijn deskundigheid en zijn opmerkingen vormden hierbij een extra stimulans om deze opdracht tot een goed einde te brengen. Verder wens ik ook COGEN Vlaanderen te bedanken voor het aanreiken van de interessante gevalstudie en voor het verschaffen van informatie. Aangezien ik voor de uitwerking van de gevalstudie heb kunnen samenwerken met twee studenten Industrieel ingenieur van de XIOS Hogeschool Limburg, wens ik ook graag Zuriye Yakili en Ibrahim Yamak te bedanken voor hun goede samenwerking. Ook de firma Ineltra Systems te Genk zou ik willen bedanken voor hun tijd en raadgevingen. Tenslotte wens ik ook mijn ouders te bedanken voor hun uitgebreide steun gedurende mijn studies.

Diepenbeek, mei 2008

Yordi Beckers

## Samenvatting

Duurzame ontwikkeling is een belangrijk aandachtspunt geworden in onze maatschappij. Het betekent dat we een bepaald welvaartsniveau willen bereiken waarbij we het welvaartsniveau van de toekomstige generaties zo weinig mogelijk hypothekeren. Dit kunnen we onder meer doen door onze energie duurzaam te produceren. Naast hernieuwbare energie, zoals zonne-energie, windenergie of waterkracht, kan ook warmtekrachtkoppeling (WKK) bijdragen aan een duurzamere energieproductie. WKK is een technologie waarbij warmte en elektriciteit gelijktijdig opgewerkt worden door één machine.

Een warmtekrachtkoppeling kan verschillende voordelen hebben op energetisch en ecologisch gebied. Het belangrijkste voordeel is de mogelijkheid om brandstof te besparen in vergelijking met een referentietechnologie. Als referentie kiest men meestal voor een stoom en gas centrale (STEG) en een hoogrendementsketel (Hr-ketel). Deze brandstofbesparing heeft ook als gevolg dat er minder schadelijke uitlaatgassen (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, roet,...) en minder CO<sub>2</sub> uitstoot (Kyoto, opwarming van de aarde) in de atmosfeer terecht komen. Daarnaast presteert een warmtekrachtkoppeling in termen van exergetisch rendement steeds beter dan een Hr-ketel. Bij een Hr-ketel wordt warmte op hoge temperatuur enkel gebruikt om ruimtes te verwarmen op 22°C, waardoor er grote exergie verliezen optreden. Bij een WKK wordt tijdens deze degradatie echter ook mechanische energie geproduceerd die via een alternator wordt omgezet in elektrische energie.

Naast deze voordelen zijn er nog redenen die pleiten voor het gebruik van warmtekrachtkoppeling. Onder meer door de reeds aangehaalde brandstofbesparing, maar ook door de vermindering van transportverliezen op het elektriciteitsnet (8 à 10%), kan een WKK een vermindering van de externe kosten bewerkstelligen. Deze mogelijke vermeden externe kosten hangen echter sterk af van de gehanteerde referentietechnologie. Vergeleken met een klassieke steenkoolcentrale zonder rookgasreiniging kunnen de vermeden externe kosten oplopen tot ongeveer 90 EUR/MWhe. In vergelijking met de klassieke steenkoolcentrales met rookgasreiniging bedragen de vermeden externe kosten maximaal 24 EUR/MWhe. Interessanter wordt het wanneer we een STEG installatie beschouwen. Hier speelt de gekozen WKK technologie namelijk een belangrijke rol. Een warmtekrachtkoppeling met turbines kan nog steeds externe kosten vermijden tot een bedrag van 3 EUR/MWhe. Dit in tegenstelling tot een warmtekrachtkoppeling met motoren die zelfs meer externe kosten veroorzaakt dan een STEG.

Een volgende reden om WKK aan te moedigen is de toekomstvisie. We kunnen verwachten dat de WKK technologie in de toekomst door ontwikkeling goedkoper zal worden en de energieprijzen duurder zullen worden. Daarnaast is er ook de transgenerationele solidariteit.

Dankzij de brandstofbesparing moeten we nu minder primaire energie gebruiken en verbranden, waardoor de atmosfeer minder vervuild geraakt voor toekomstige generaties. Ook zullen zij langer van de eindige fossiele reserves kunnen genieten wat hun comfortniveau ten goed komt. Er zijn ook nog multiplicator effecten die het gebruik van WKK aanmoedigen. Een eerste is het economisch multiplicatoreffect: het gebruik van WKK kan bijkomende economische activiteit doen ontstaan (bv onderhoudsfirma's). Wanneer er meer geïnvesteerd wordt in WKK technologieën kunnen ook andere technologieën zich sneller ontwikkelen. Dit is het technologisch multiplicator effect. Een derde effect is het sociaal multiplicator effect. Dit betekent onder andere dat de bijkomende economische activiteit extra werkgelegenheid en dus ook 'arbeidsgeluk' zal creëren. Omdat WKK een decentrale manier is van energieproductie, betekent het gebruik ervan ook nog een gedeeltelijke ontlasting van het elektriciteitsnet.

Warmtekrachtkoppeling kent ook een aantal nadelen en belemmeringen. Zo zijn de investeringskosten van een WKK veel hoger dan deze van een Hr-ketel. Ook de bedrijfszekerheid, de geluidshinder en de synchroniteit tussen warmtevraag en elektriciteitsvraag zijn nadelen die zeker ook in de residentiële sector een rol spelen. Daarbij komt ook de onzekerheid over de evolutie van de energieprijzen. En onzekerheid is niet bevorderlijk voor de implementatie van WKK.

Er bestaan verschillende technologieën die gebruikt kunnen worden voor een warmtekrachtkoppeling. Voor de grotere installaties wordt meestal gekozen voor de turbinetechnologie. Dit zijn dan stoomturbines, gasturbines of een gecombineerde cyclus van een stoom- en gasturbine (STEG). Deze worden vooral in de industrie toegepast. De meest aangewende technologie voor kleinere vermogens is de interne verbrandingsmotor. Dit is voorlopig ook de enige technologie die gebruikt kan worden in residentiële toepassingen. Er zijn ook een aantal beloftevolle technologieën. Zo zijn er de microturbines, de Stirlingmotoren en de brandstofcellen waarvan men verwacht dat ze binnen enkele jaren kunnen doorbreken.

Om het gebruik van WKK te bevorderen kunnen de overheden op verschillende niveaus diverse methoden toepassen. Een eerste mogelijkheid is informeren. Hierbij denken we aan de overheidsfinanciering voor COGEN Vlaanderen. Een tweede manier is het financieel steunen van onderzoek en ontwikkeling. Een derde mogelijkheid is het invoeren van een systeem van benchmarking met betrekking tot het energieverbruik. Een vierde mogelijkheid is het opstellen van wettelijke verplichtingen met betrekking tot de energieproductie. Hier denken we aan de warmtekrachtcertificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers. Een vijfde methode is het financieel stimuleren van WKK door eigenaars de mogelijkheid te bieden om hun warmtekrachtcertificaten te verkopen. In 2007 bedroeg deze steun ongeveer 41,55 EUR/MWhe. De brandstofbesparing ligt aan de basis van deze certificatensteun. Het is hierbij belangrijk om

op te merken dat deze steun zowel beperkt is in de tijd als degressief daalt in de tijd, dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld de steun aan zonne-energie.

Uit de gevalstudie van een appartementsgebouw blijkt dat onder de huidige omstandigheden het gebruik van warmtekrachtkoppeling met gasmotoren economisch interessant kan zijn. Aangezien de toekomstige energieprijzen moeilijk te voorspellen zijn, wordt er gewerkt met verschillende scenario's voor de energieprijzen. Ook voor de WKC prijzen worden er scenario's opgesteld. Dit maakt de economische analyse wel interessanter, maar ook complexer. Zo blijkt dat een dimensionering op elektriciteitsvraag minder gevoelig is voor deze scenario's van een dimensionering op warmte. Een eerste oorzaak hiervoor is dat een warmtegedimensioneerde installatie teveel elektriciteit produceert waardoor dit overschot verkocht moet worden tegen relatief lage prijzen. Een tweede reden is het relatief lage aantal draaiuren van deze installatie in vergelijking met een op elektriciteitsvraag gedimensioneerd systeem.

Vanuit ecologisch oogpunt (CO<sub>2</sub>-emissies) is een warmtegedimensioneerd systeem echter voordeliger. We kunnen de totale CO<sub>2</sub> uitstoot namelijk meer reduceren door op warmte te dimensioneren. Dit is het gevolg van het feit dat een dimensionering op warmte een groter vermogen van de WKK vraagt in vergelijking met een dimensionering op elektriciteit, waar de gekozen vermogens lager liggen.

De implementatie van warmtekrachtkoppeling in appartementsgebouwen kent echter ook enkele belangrijke en specifieke moeilijkheden. Aangezien er een vrije keuze van energieleverancier bestaat heerst er onzekerheid over de afname van elektriciteit door de bewoners. Dit is echter een noodzakelijke voorwaarde aangezien verkopen aan het niet financieel interessant is. Daarnaast bestaat er ook een complexe situatie rondom de eigendom en het beheer van de (gemeenschappelijke) WKK installatie.

## Inhoudsopgave

Woord vooraf .....	I
Samenvatting.....	II
Inhoudsopgave.....	V
Lijst van figuren .....	IX
Lijst van tabellen .....	XI
<b>1 Probleemstelling .....</b>	<b>1</b>
1.1    Situering van het praktijkprobleem .....	1
1.2    De centrale onderzoeksvraag en de deelvragen .....	3
<b>2 Principes van warmtekrachtkoppeling.....</b>	<b>5</b>
2.1    Energie.....	5
2.1.1    Kinetische energie.....	5
2.1.2    Potentiële energie .....	6
2.2    Eerste hoofdwet van de thermodynamica.....	7
2.3    Tweede hoofdwet van de thermodynamica .....	7
2.4    Isentropische processen .....	7
2.5    Exergie: de 'kwaliteit' van energie en anergie: de hoeveelheid 'nutteloze' energie.....	9
2.6    Prestatiemaatstaven van een warmtekrachtkoppeling .....	10
2.6.1    Elektrisch en thermisch rendement.....	10
2.6.2    Kracht-warmteverhouding .....	11
2.6.3    Primaire energiebesparing .....	11
2.6.4    Totaal energetisch rendement en brandstofbenuttigingsgraad.....	13
2.6.5    Exergetisch rendement .....	14
<b>3 Technologieën voor warmtekrachtkoppeling.....</b>	<b>16</b>
3.1    Stoomturbines .....	16
3.1.1    Tegendrukstoomturbine .....	18
3.1.2    Condensatieturbine met stoomaftap.....	18

3.2	Gasturbines.....	18
3.2.1	De aeroderivative gasturbine.....	21
3.2.2	De heavy duty gasturbine.....	21
3.3	Gecombineerde cyclus (STEG).....	21
3.4	Motoren.....	22
3.4.1	Ottomotoren of gasmotoren.....	24
3.4.2	Dieselmotoren.....	25
3.5	Microturbines.....	25
3.6	Stirlingmotoren.....	28
3.7	Brandstofcellen.....	31
3.8	Overzicht van de verschillende technologieën.....	33
<b>4</b>	<b>Redenen om het gebruik van warmtekrachtkoppeling te bevorderen.....</b>	<b>37</b>
4.1	Vermeden externe kosten.....	37
4.2	Economische toekomstvisie.....	42
4.3	Transgenerationele solidariteit.....	44
4.4	Technologisch multiplicator effect.....	46
4.5	Economisch multiplicator effect.....	47
4.6	Sociaal multiplicatoreffect effect.....	47
4.7	Sociaal effect.....	48
4.8	Voordelen voor nutsbedrijven.....	48
4.9	Netontlasting.....	49
<b>5</b>	<b>Methoden voor de overheid om het gebruik van warmtekrachtkoppeling aan te moedigen.....</b>	<b>50</b>
5.1	Informatie verstrekken.....	50
5.2	Financiële steun voor onderzoek en ontwikkeling.....	51
5.3	Benchmarking.....	51
5.4	Wettelijke verplichtingen.....	53
5.4.1	Warmtekrachtcertificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers.....	53
5.4.2	Verplicht haalbaarheidsonderzoek voor warmtekrachtkoppeling bij gebouwen groter dan 1000 m <sup>2</sup> .....	54
5.5	Financiële stimulansen.....	55
5.5.1	De verhoogde investeringsaftrek.....	55
5.5.2	De ecologiepremie.....	56
5.5.3	Steun voor demonstratieprojecten.....	57
5.5.4	Warmtekrachtcertificaten (WKC).....	58



5.5.5	Vergelijking van de certificatensteun voor warmtekrachtkoppeling en voor hernieuwbare energie .....	67
5.5.6	Combinatie van warmtekrachtcertificaten (WKC) en groenestroom-certificaten (GSC) voor een warmtekrachtkoppeling.....	69
5.6	Wallonië en Brussel .....	70
<b>6</b>	<b>Mogelijkheden voor warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector .....</b>	<b>72</b>
6.1	Aandeel van de residentiële toepassingen in België.....	72
6.2	De residentiële sector .....	74
6.2.1	Trias energetica .....	74
6.2.2	Technologieën .....	75
6.2.3	Haalbaarheid .....	75
6.2.4	Lawaai en trillingen .....	76
6.2.5	Synchroniteit tussen elektriciteits- en warmtebehoefte: buffering.....	77
6.2.6	Netkoppeling .....	79
6.3	Vergelijking van de residentiële sector met de tertiaire sector .....	80
6.4	Toekomst.....	81
<b>7</b>	<b>Gevalstudie voor een appartementsgebouw.....</b>	<b>82</b>
7.1	Omschrijving van de gevalstudie .....	82
7.2	Aanpak van de haalbaarheidsstudie .....	82
7.3	Technische dimensionering .....	83
7.3.1	Warmtevraag .....	83
7.3.2	Elektriciteitsvraag .....	84
7.3.3	Jaarbelastingsduurcurve van de warmtevraag (jbd) .....	84
7.3.4	Keuze van de geschikte technologie.....	85
7.4	Dimensionering op warmtevraag .....	86
7.4.1	Keuze van de geschikte warmtekrachtkoppeling .....	87
7.4.2	Keuze van het alternatief .....	89
7.4.3	Reductie van de CO <sub>2</sub> -uitstoot .....	90
7.5	Dimensionering op elektriciteitsvraag .....	91
7.5.1	Keuze van de geschikte warmtekrachtkoppeling .....	91
7.5.2	Keuze van het alternatief .....	93
7.5.3	Reductie van de CO <sub>2</sub> -uitstoot .....	94
7.6	Opstellen van het economisch model.....	94
7.7	Keuze van de scenario's voor de diverse parameters .....	95
7.7.1	Gas- en elektriciteitsprijzen .....	95
7.7.2	Warmtekrachtcertificaten .....	97

7.8	Economische haalbaarheidsanalyse .....	97
7.8.1	Dimensionering op warmte .....	97
7.8.2	Dimensionering op elektriciteit .....	101
7.8.3	Bemerkingen bij de economische analyse .....	104
<b>8</b>	<b>Conclusies .....</b>	<b>105</b>
8.1	Inhoudelijke conclusies .....	105
8.2	Aanbevelingen .....	109
8.3	Mogelijkheden voor verder onderzoek.....	109
	<b>Lijst van geraadpleegde werken .....</b>	<b>111</b>
	<b>Lijst van bijlagen .....</b>	<b>116</b>

## Lijst van figuren

Figuur 1:	Schema van een thermische arbeidsmachine .....	8
Figuur 2:	Energetische balans van een warmtekrachtkoppeling en gescheiden productie.....	11
Figuur 3:	Principeschema van een warmtekrachtkoppeling met een stoomturbine.....	17
Figuur 4:	Schema van een warmtekrachtkoppeling met een gasturbine.....	19
Figuur 5:	Schema van een warmtekrachtkoppeling met een gasturbine met gesloten cyclus.	20
Figuur 6:	Principeschema van een warmtekrachtkoppeling met een gecombineerde cyclus...	22
Figuur 7:	Schema van een zuigermotor met warmteterugwinning .....	23
Figuur 8:	Schema van een microturbine met recuperator .....	26
Figuur 9:	Principeschema van een Stirlingmotor .....	28
Figuur 10:	Thermodynamische processen in een ideale Stirling-cyclus (A) Druk-Volume diagram (B) Temperatuur-Entropie diagram .....	29
Figuur 11:	Schema van een brandstofcel.....	31
Figuur 12:	Indicatieve leercurves met verschillende leerpercentages .....	43
Figuur 13:	Frequentieverdeling E-peil .....	52
Figuur 14:	Evolutie van het minimum aandeel elektriciteit uit kwalitatieve warmtekrachtkoppeling voor elektriciteitsleveranciers .....	53
Figuur 15:	Verloop van het aantal WKC in de tijd, voorbeeld 1 .....	62
Figuur 16:	Verloop van het aantal WKC in de tijd, voorbeeld 2 .....	62
Figuur 17:	Invloed van de RPE in de tijd op het aantal WKC (in %) ten opzichte van de eerste 4 jaar.....	63
Figuur 18:	Aantal en gemiddelde marktprijs van de verhandelde WKC.....	64
Figuur 19:	Vergelijking van de maximale vermeden externe kosten en de minumprijs van de certificaten voor HE en WKK .....	68
Figuur 20:	Vergelijking van de vermeden externe kosten ten opzichte van een STEG en de minumprijs van de certificaten voor HE en WKK.....	69
Figuur 21:	Verdeling volgens elektrisch vermogen van motoren over de verschillende sectoren in 2006 .....	73
Figuur 22:	Verdeling volgens elektrisch vermogen van STEG's en gasturbines over de verschillende sectoren in 2006 .....	73
Figuur 23:	Voorbeeld van een thermisch profiel voor een schoolgebouw .....	77
Figuur 24:	Voorbeeld van een elektrisch profiel voor een schoolgebouw .....	78
Figuur 25:	Voorbeeld configuratie van een buffer.....	79
Figuur 26:	Structuur van een haalbaarheidsstudie .....	83
Figuur 27:	Maandelijkse warmtevraag voor verwarming (blok A + B) .....	84
Figuur 28:	Jaarbelastingsduurcurve voor de warmtevraag.....	85
Figuur 29:	Productiecurve (warmte) .....	86

Figuur 30: JBDC en totale warmteproductie .....	87
Figuur 31: Dimensionering op elektriciteit met 4 WKK's .....	92
Figuur 32: Mogelijke evoluties van de energieprijzen .....	96
Figuur 33: NCW voor de dimensionering op warmte .....	99
Figuur 34: Matching van het model voor de dimensionering op warmte .....	101
Figuur 35: NCW voor de dimensionering op elektriciteit .....	102
Figuur 36: Matching van het model voor de dimensionering op elektriciteit.....	103

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Exergetische rendementen van WKK, STEG en Hr-ketel bij veranderende temperatuur .....	15
Tabel 2: Emissies van microturbinen en motoren .....	27
Tabel 3: Voornaamste karakteristieken van de verschillende types brandstofcellen.....	32
Tabel 4: Voor- en nadelen van de technologieën voor warmtekrachtkoppeling .....	33
Tabel 5: Technische eigenschappen van de technologieën voor WKK .....	34
Tabel 6: Overzicht van de typische kosten en prestatie karakteristieken .....	35
Tabel 7: Aandeel van de verschillende technologieën in de totale elektriciteitsproductie voor Vlaanderen.....	38
Tabel 8: Externe kosten voor verschillende technologieën, kengetallen voor 2002.....	40
Tabel 9: Vermeden externe kosten.....	41
Tabel 10: Overzicht van de wereldvoorraden en aantal jaren van beschikbaarheid aan fossiele en nucleaire energiebronnen .....	45
Tabel 11: Vlaamse referentierendementen .....	59
Tabel 12: Vermeden externe kosten.....	65
Tabel 13: Minimumprijzen voor de certificaten van HE en WKK .....	67
Tabel 14: Vermindering van de jaarlijkse CO <sub>2</sub> -uitstoot (warmtegedimensioneerd) .....	90
Tabel 15: Vermindering van de jaarlijkse CO <sub>2</sub> -uitstoot (elektriciteitsgedimensioneerd).....	94
Tabel 16: Historische evolutie van de energieprijzen.....	95
Tabel 17: 10 scenario's voor de evoluties van de energieprijzen .....	97
Tabel 18: 5 scenario's voor de prijzen van de WKC.....	97

# 1 Probleemstelling

## 1.1 *Situering van het praktijkprobleem*

Duurzame ontwikkeling is niet meer weg te denken uit onze hedendaagse maatschappij. Sinds het Brundtland rapport ('Our Common Future') in 1987 opriep tot duurzame ontwikkeling, is de aandacht ervoor alleen maar toegenomen. Duurzame ontwikkeling betekent dat we een bepaald welvaartniveau willen bereiken waarbij we het welvaartsniveau van de toekomstige generaties zo weinig mogelijk hypothekeren. Tien jaar na dit rapport werd het Kyoto protocol opgesteld. Dit is een klimaatverdrag dat voorziet in een engagement om de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Het doel is om tegen 2012 een vermindering van 5,2% te realiseren ten opzichte van het niveau van 1990. Voor elk land verschilt dit percentage, zo moet bijvoorbeeld België een reductie van 7,5% halen. De menselijke activiteiten zorgen ervoor dat het niveau van broeikasgassen (voornamelijk koolstofdioxide) in de atmosfeer sterk toeneemt en zo het broeikaseffect versterkt. Hierdoor gaat de aarde langzaam opwarmen. Het effect van de opwarming van de aarde kreeg in 2006 wereldwijd veel aandacht door de film 'An Inconvenient Truth' van de voormalige Amerikaanse vice-president Al Gore. Hiervoor kreeg hij in 2007 zelfs de Nobelprijs voor de vrede.

Duurzame energieproductie kan bijdragen aan deze duurzame ontwikkeling en de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen. Hierbij wordt meestal gedacht aan allerlei vormen van hernieuwbare technologie, zoals zonne-energie, windenergie of waterkracht. Naast deze technologieën is er ook nog een andere technologie die tegemoet *kan* komen aan het verbeteren van de toekomstige en ecologische belangen, namelijk *warmtekrachtkoppeling* (WKK). Deze techniek, die ook bekend staat onder de naam *cogeneratie*, converteert de (al dan niet fossiele) brandstof gelijktijdig in twee bruikbare energievormen, namelijk microscopische bewegings-energie (warmte) en macroscopische bewegingsenergie. De macroscopische bewegingsenergie komt meestal voor in de vorm van mechanische rotatie-energie die omgezet wordt in elektrische energie. Aangezien beweging een gevolg is van kracht spreken we dan ook van *warmtekrachtkoppeling*.

Het grote voordeel van een warmtekrachtkoppeling is de mogelijkheid om een primaire energiebesparing te realiseren. Dit wil zeggen dat er een energetisch voordeel kan worden gerealiseerd. Een warmtekrachtkoppeling kan minder brandstof nodig hebben dan een gescheiden opwekking van warmte (met een Hr-ketel) en elektriciteit (bv met een STEG) nodig hebben voor dezelfde output. Hiermee komt deze technologie dus tegemoet aan de

aangehaalde problemen. Door minder (fossiele) brandstof nodig te hebben kunnen de eindige fossiele reserves langer meegaan. Er bestaat ook de mogelijkheid om in plaats van fossiele brandstoffen, biobrandstoffen te gebruiken zoals biomassa en biogas. Dit levert zelfs een dubbel voordeel op. We gebruiken milieuvriendelijke brandstof die we dan ook nog eens optimaal gaan benutten. De primaire brandstofbesparing betekent ook dat er minder schadelijke uitlaatgassen (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, roet,...) en minder CO<sub>2</sub> uitstoot (broeikasewffect, Kyoto) in de atmosfeer terecht komen. De impact van deze stoffen op ons leefmilieu, de atmosfeer en het klimaat zijn aanzienlijk. Warmtekrachtkoppeling kan dus ecologische voordelen met zich meebrengen.

De hierboven vermelde argumenten pleiten allemaal voor een toepassing van warmtekrachtkoppeling. Maar er zijn zeker ook belemmeringen. De drie belangrijkste zijn de volgende: de hoge installatiekosten en onderhoudskosten, de bedrijfszekerheid en de geluidshinder. Zeker voor residentiële toepassingen zijn dit grote nadelen. Naast deze moeilijkheden zijn er nog anderen. Zo is er onzekerheid over de evolutie van de energieprijzen. Deze gegevens zijn echter essentieel om de rendabiliteit van een warmtekrachtkoppeling goed in te schatten. Ook de evolutie van de prijs van de warmtekrachtcertificaten heeft een invloed op de economische rendabiliteit. Onder bepaalde omstandigheden kan een warmtekrachtkoppeling dus economische rendabel worden.

Het *Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006 – 2012* stelt dat in 2010 de totale broeikasgasuitstoot die vrijkomt bij de energievoorziening nog maximaal 9 Mton CO<sub>2</sub>-eq mag bedragen. In 2004 bedroeg deze waarde nog liefst 18,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq. Om deze ambitieuze doelstelling te bereiken, moet tegen 2010 19% van de elektriciteitsleveringen voortkomen uit een opwekking met warmtekrachtkoppeling. In 2005 bedroeg dit aandeel ongeveer 12% (Energiesparen, 2008a). Om de implementatie van warmtekrachtkoppeling te bevorderen heeft de Vlaamse overheid een aantal subsidie-instrumenten ingevoerd. Zo zijn er bijvoorbeeld sinds 1 januari 2005 warmtekrachtcertificaten voor de productie van elektriciteit uit kwalitatieve warmtekrachtinstallaties.

In het kader van de evolutie naar een decentrale energieproductie en (in de toekomst) Smart Grids (Slimme Netten) biedt warmtekrachtkoppeling ook de mogelijkheid om het elektriciteitsnet gedeeltelijk te ontlasten. Zeker bij grote industriële afnemers van elektriciteit voorkomt zulke decentrale productie ook dat er grote transportverliezen optreden. Daarenboven kan op die manier het net gedimensioneerd worden op een kleinere elektriciteitsvraag, wat voor de netbeheerder economisch voordeliger is.

## **1.2 De centrale onderzoeksvraag en de deelvragen**

Warmtekrachtkoppeling kan in zeer veel sectoren worden toegepast. In de primaire sector worden deze installaties vooral gebruikt in de tuinbouw ter verwarming van de kasten en serres. Ook de secundaire sector vele toepassingen. Denken we maar aan onder meer de papierindustrie en de steenfabrieken. In de tertiaire sector zijn verschillende ziekenhuizen met een warmtekrachtkoppeling uitgerust. Naast deze toepassing zijn er ook mogelijkheden voor zwembaden, scholen en hotels. In de residentiële sector (appartementengebouwen en woningen) wordt warmtekrachtkoppeling voorlopig nog niet veel toegepast. Hier zal de doorbraak van nieuwe technologieën (Stirlingmotoren, brandstofcellen en microturbines) waarschijnlijk voor meer mogelijkheden zorgen. Aangezien er voor deze sector blijkbaar meer belemmeringen zijn voor de implementatie van warmtekrachtkoppeling, is het zeer interessant om hier dieper op in te gaan.

In deze eindverhandeling wordt dan ook de volgende centrale onderzoeksvraag vooropgesteld:

*Wat zijn de resultaten van een economische, ecologische en energetische analyse van warmtekrachtkoppeling voor de residentiële sector, met als voorbeeld een appartementsgebouw?*

Om deze centrale onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden worden in deze eindverhandeling antwoorden gezocht op de volgende deelvragen.

1. Wat zijn de voordelen en nadelen van een warmtekrachtkoppeling in vergelijking met een gescheiden energieproductie? (Hoofdstuk 2)
2. Welke zijn de verschillende technologieën die nu en in de nabije toekomst beschikbaar (zullen) zijn voor warmtekrachtkoppeling? Wat zijn de voor- en nadelen van elke technologie? (Hoofdstuk 3)
3. Welke redenen kunnen aangehaald worden om het gebruik van warmtekrachtkoppeling te bevorderen? (Hoofdstuk 4)
4. Wat zijn de stimulansen die de verschillende overheden kunnen gebruiken om de implementatie van warmtekrachtkoppeling te bevorderen? Zijn deze stimulansen gerechtvaardigd? (Hoofdstuk 5)
5. Welke aandachtspunten bestaan er specifiek voor de residentiële sector? Hoe ziet de huidige situatie voor de residentiële sector eruit? (Hoofdstuk 6)
6. Wat zijn de huidige mogelijkheden voor een concrete gevalstudie van een appartementsgebouw? Welke parameters hebben hierbij een grote invloed op de rendabiliteit van het project? (Hoofdstuk 7)



Deze deelvragen worden in deze eindverhandeling behandeld. Daarvoor wordt er eerst een uitgebreide literatuurstudie uitgevoerd om antwoorden te zoeken op de gestelde vragen. Hierna wordt de gevalstudie behandeld. Hierbij wordt onderzocht of een warmtekrachtkoppeling rendabel kan zijn in een appartementsgebouw van 100 wooneenheden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van vele scenario's zodat de invloed van de diverse parameters (energieprijzen, certificatensteun) op de rendabiliteit kan worden ingeschat.

Voor de gevalstudie wordt er samengewerkt met studenten van de XIOS Hogeschool Limburg. Twee studenten Industrieel ingenieur concentreren zich hierbij vooral op het technische aspect van het project zoals de warmtevraagberekeningen (gebaseerd op de bouwplannen) en de technische dimensionering. In deze eindverhandeling wordt er hoofdzakelijk het economische aspect (rendabiliteit) van de gevalstudie bestudeerd.

## 2 Principes van warmtekrachtkoppeling

### 2.1 Energie

Wanneer we een warmtekrachtkoppeling beschouwen is het belangrijk om inzicht te hebben in de verschillende vormen van energie. We kunnen twee hoofdvormen van energie onderscheiden, namelijk kinetische energie en potentiële energie. Beide vormen worden hieronder kort toegelicht.

#### 2.1.1 Kinetische energie

In de klassieke mechanica (Newton) wordt de kinetische energie van materie met massa  $m$  en snelheid  $v$  gedefinieerd als:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

met  $m$  = massa (snelheidsafhankelijk in de klassieke mechanica)  
 $v$  = snelheid

Einstein heeft deze formule veralgemeend tot (relativistische mechanica):

$$E = mc^2$$

met  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  (snelheidsafhankelijk in de relativistische mechanica)

$m_0$  = rustmassa, bij  $v = 0$

$v$  = snelheid

$c$  = lichtsnelheid

Als  $v \ll c$ , dan kunnen we deze formule ook (benaderd) schrijven op de volgende manier<sup>1</sup>:

---

$$^1 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \left(-\frac{1}{2}\right)\left(-\frac{v^2}{c^2}\right) + \left(\frac{-1/2}{2}\right)\left(-\frac{v^2}{c^2}\right)^2 + \dots \cong 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

$$E \cong \underbrace{m_0 c^2}_{\text{kernenergie}} + \underbrace{\frac{1}{2} m_0 v^2}_{\text{kinetische energie}}$$

Hier zien we dat de energie kan opgesplitst worden in enerzijds rustenergie (kernenergie) en anderzijds kinetische energie. We kunnen twee vormen van kinetische energie onderscheiden:

- 1) Macroscopische bewegingsenergie of globale bewegingsenergie waarbij alle atomaire deeltjes gezamenlijk bewegen. Deze vorm van bewegingsenergie is dan ook een geordende vorm van energie. Macroscopische bewegingsenergie kan verder opgesplitst worden in:

a) *translatie* energie:  $E_k = \frac{1}{2} m v^2$  met  $m = \text{globale massa}$

$v = \text{snelheid}$

b) en *rotatie* energie:  $E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$  met  $\omega = \text{hoeksnelheid om de as}$

$I = \text{traagheidsmoment van het lichaam}$   
 $\text{t.o.v. die as}$

Elke ogenblikkelijke beweging van een onvervormbaar lichaam kan opgesplitst worden in een ogenblikkelijke translatie en een ogenblikkelijke rotatie.

- 2) Microscopische bewegingsenergie of warmte waarbij de atomaire deeltjes in willekeurige richtingen bewegen. Warmte is een ongeordende vorm van energie omdat eenzelfde warmte-energietoestand het gevolg kan zijn van vele mogelijke verdelingen van de energiekwanta over de atomaire deeltjes.

$$Q = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2$$

met  $v_i = \text{snelheid van het atomaire deeltje}$

$m_i = \text{massa van het atomaire deeltje}$

### 2.1.2 Potentiële energie

De potentiële energie van een materie is de (kinetische) energie die het kan krijgen door zijn specifieke eigenschappen. Deze energie in potentie is ook een geordende vorm. De bijzondere eigenschappen kunnen de volgende vormen zijn: gravitatie eigenschappen, elektrische

eigenschappen, sterke of zwakke kern interactie eigenschappen. Afhankelijk van hun eigenschappen kunnen we dus de volgende drie vormen van potentiële energie onderscheiden: gravitatie energie, elektrische energie en kernenergie.

## **2.2 Eerste hoofdwet van de thermodynamica**

De eerste hoofdwet van de thermodynamica stelt dat de totale hoeveelheid energie in een gesloten systeem constant blijft. Dit betekent dus dat de som van de kinetische energie en de potentiële energie in de tijd gelijk blijft. Er kan dus geen energie verloren gaan en er kan geen energie gecreëerd worden. Deze wet staat ook bekend als *de wet van het behoud van energie*. In formulevorm kunnen we de eerste hoofdwet als volgt voorstellen:  $dE_{\text{tot}}/dt = 0$ .

## **2.3 Tweede hoofdwet van de thermodynamica**

Wanneer we een warm object in contact brengen met een kouder object, dan zal er warmte stromen van het warme object naar het koude object. Alhoewel het omgekeerde niet in tegenspraak zou zijn met de eerste hoofdwet, zal er nooit spontaan warmte van het koude object naar het warme object stromen. Dit gebrek aan omkeerbaarheid wordt verklaard door de tweede hoofdwet.

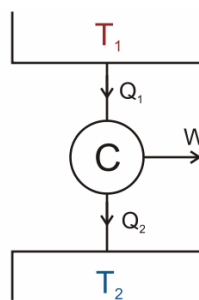
De tweede hoofdwet van de thermodynamica wordt ook *de wet van de toenemende entropie of de toenemende wanorde* genoemd. Deze stelt algemeen dat in een gesloten systeem, de entropie (S) voortdurend stijgt:  $dS/dt > 0$ . Het begrip 'entropie' (S) wordt gedefinieerd als de maat voor wanorde. Hoewel dus de hoeveelheid energie constant blijft (eerste wet), verslechtert de kwaliteit van energie voortdurend met het verstrijken van de tijd. Bruikbare (geordende) energie wordt omgezet in onbruikbare (ongeordende) energie. Wanneer de entropie toeneemt, betekent dit dat de bruikbaarheid of geordendheid van de energie afneemt.

## **2.4 Isentropische processen**

Aangezien de tweede hoofdwet stelt dat de entropie of wanorde in een gesloten systeem steeds stijgt, is elk proces in een gesloten systeem onomkeerbaar. Een vorige toestand kan nooit een tweede maal voorkomen. Men kan wel proberen om die toename van entropie zo laag mogelijk te houden. Het beste wat men (theoretisch) zou kunnen bereiken is het constant houden van de entropie ( $dS/dt = 0$ ). Een isentropisch proces is nu zo een *theoretisch* proces waarbij de

entropie gelijk blijft. Dit wil dus zeggen dat dit proces wel een omkeerbaar proces is. In werkelijk kan dit proces dus enkel benaderd worden.

Om het rendement van een omkeerbaar proces (het Carnotrendement genoemd) te bepalen, beschouwen we een thermische arbeidsmachine waarin warmte (ongeordende energie) omgezet wordt in geordende energie (zie Figuur 1). Hierbij vertrekken we vanuit een warmtetoevoer  $Q_1$  uit het hoge temperatuursreservoir  $T_1$ . Naast de verkregen arbeid  $W$  (geordende energie) bekomen we ook een restwarmte  $Q_2$  (ongeordende energie) op de lage temperatuur  $T_2$ . Deze temperatuur kan ook de omgevingstemperatuur  $T_0$  zijn. Naarmate de temperatuur van het hoge temperatuursreservoir hoger is, zal ook de verkregen arbeid  $W$  groter zijn.



**Figuur 1: Schema van een thermische arbeidsmachine**

Wanneer we enkel geïnteresseerd zijn in de verkregen arbeid, kunnen we het mechanische rendement bepalen aan de hand van volgende formule:

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

met  $W$  = bruikbare arbeid,  
 $Q_1$  = ter beschikking gestelde warmte

Het Carnotrendement is het theoretisch maximale rendement voor een thermische arbeidsmachine (bijvoorbeeld een motor). In de praktijk kan men deze benaderen. De volgende formule geeft Carnotrendement aan.

$$\eta = \frac{T_1 - T_0}{T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

met  $T_1$  = de temperatuur van de hoge temperatuursbron (in K)  
 $T_0$  = de omgevingstemperatuur (in K)

Beide temperaturen moeten steeds worden uitgedrukt in een absolute temperatuurschaal (b.v. de Kelvin-schaal). Nemen we als rekenvoorbeeld  $T_1 = 500^\circ\text{C}$  (= 773 K) en  $T_0 = 15^\circ\text{C}$  (= 288 K) dan levert dit een Carnotrendement op van 62,7%. Laten we  $T_1$  toenemen tot bijvoorbeeld  $T_1 = 1000^\circ\text{C}$  (= 1273 K), dan bekomen we een Carnotrendement van 77,4%. Hierbij moet worden opgemerkt dat in de praktijk deze rendementen nog een stuk lager zullen liggen.

## **2.5 Exergie: de 'kwaliteit' van energie en anergie: de hoeveelheid 'nutteloze' energie**

De 'kwaliteit' van verschillende energievormen is niet altijd gelijk. Zo zijn macroscopische kinetische energie en potentiële energie totaal *geordende* vormen van energie. Deze energievormen kunnen theoretisch gezien *volledig* omgezet worden in elkaar. Warmte of microscopische kinetische energie is daarentegen een *ongeordende* energievorm. Met een thermische motor kan ook warmte omgezet worden in een geordende energievorm. Maar hier zal de omzetting slechts gedeeltelijk mogelijk zijn. Als een gedeelte van de warmte geordend wordt, zorgt dit ervoor dat de wanorde in het andere gedeelte van de warmte sterk moet toenemen zodat het geheel nog meer wanorde krijgt (zie tweede hoofdwet thermodynamica).

De exergie van warmte  $Q$  is gedefinieerd als de *maximale* hoeveelheid geordende energie die men uit deze hoeveelheid warmte kan halen. Deze exergie hangt af van twee factoren:

- 1)  $T$ : de absolute temperatuur van de warmte
- 2)  $T_0$ : de absolute temperatuur tot dewelke men de warmte kan afkoelen (meestal de omgevingstemperatuur)

Deze exergie is de maximale hoeveelheid geordende energie die langs een *omkeerbaar of isentropisch proces* uit een warmte  $Q$  kan gehaald worden. Het gedeelte dat bij de omzetting nutteloos wordt, noemt men de anergie. Er kan nu bewezen worden met behulp van het Carnotrendement dat de exergie ( $E_x$ ) van warmte  $Q$  gelijk is aan:

$$E_x = \frac{T - T_0}{T} Q$$

met  $T$  = de temperatuur van de hoge temperatuursbron (in K)  
 $T_0$  = de omgevingstemperatuur (in K)

De anergie is dus het gedeelte dat niet meer omzetbaar is en dus ook nutteloos is. De anergie ( $E_a$ ) kan als volgt gedefinieerd worden:

$$E_a = Q - E_x = Q - \frac{T - T_0}{T} Q = \left( \frac{T}{T} - \frac{T - T_0}{T} \right) Q = \frac{T_0}{T} Q$$

We kunnen dankzij deze formules enkele opmerkingen maken. Zo kunnen we uit de formule van exergie afleiden dat een hoeveelheid warmte  $Q$  op omgevingstemperatuur nutteloze warmte is, aangezien ze geen exergie bevat ( $T = T_0 \rightarrow E_x = 0$ ).

Hiernaast zien we ook dat de exergie steeds een positieve waarde kent. Nemen we een thermische motor waarbij warmte op hoge temperatuur  $T$  wordt overgebracht naar een lagere omgevingstemperatuur  $T_0$ . Hier is dan  $T > T_0$  en is  $Q > 0$ . Bijgevolg is de exergie hier positief. Bij een koelingsproces wordt warmte op een lage temperatuur  $T$  overgebracht naar de hogere omgevingstemperatuur  $T_0$  door middel van een hoeveelheid geordende energie  $W$ . Hier is  $T < T_0$  en  $Q < 0$  waardoor de exergie ook hier positief is.

## **2.6 Prestatiemaatstaven van een warmtekrachtkoppeling**

Vooraleer we de verschillende technologieën voor warmtekrachtkoppeling in het volgende hoofdstuk beschouwen, is het belangrijk om inzicht te hebben in hun thermodynamische prestaties om op die manier een vergelijking te vergemakkelijken. In deze paragraaf worden enkele van deze prestatimaatstaven en parameters aangehaald. Ook kunnen we met deze parameters aan de slag om de productie van warmte en elektriciteit met een warmtekrachtkoppeling energetisch te vergelijken met een gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit.

### **2.6.1 Elektrisch en thermisch rendement**

Het *elektrische rendement*  $\alpha_e$  van een (warmtekrachtkoppeling)installatie wordt berekend aan de hand van de verhouding tussen de nuttig geleverde elektrisch energie  $E$  (in J) en de potentiële energie  $F$  (in J) van de hiervoor benodigde hoeveelheid brandstof:

$$\alpha_e = \frac{E}{F}$$

Het *thermische rendement*  $\alpha_q$  wordt gelijkaardig berekend en geeft de verhouding tussen de nuttig geproduceerde warmte Q (in J) en de potentiële energie F (in J) van de hiervoor benodigde hoeveelheid brandstof:

$$\alpha_q = \frac{Q}{F}$$

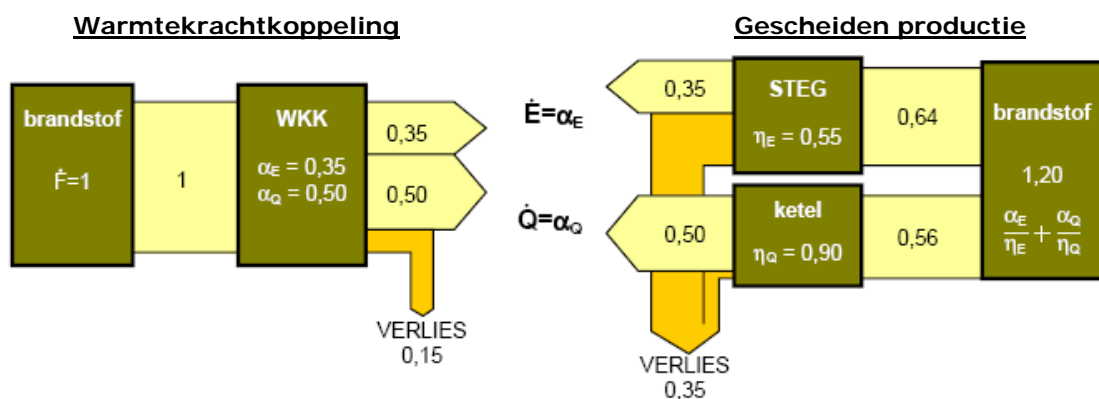
### 2.6.2 Kracht-warmteverhouding

Een belangrijke parameter bij het dimensioneren van een warmtekrachtkoppeling is de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit en de geproduceerde hoeveelheid warmte. Dit noemt men de *kracht-warmteverhouding* of *PHR* (power to heat ratio):

$$PHR = \frac{E}{Q}$$

### 2.6.3 Primaire energiebesparing

De primaire energiebesparing (of brandstofbesparing) die een warmtekrachtkoppeling kan opleveren ten opzichte van een gescheiden opwekking wordt bepaald door de referentierendementen van de referentietechnologie. Het belang van deze referentierendementen is zeer groot. Deze bepalen namelijk of er al dan niet energiebesparing mogelijk is. Deze primaire energiebesparing is de basis voor het toekennen van de warmtekrachtcertificaten die in het volgende hoofdstuk behandeld zullen worden. In dit voorbeeld wordt de STEG centrale als best beschikbare referentietechnologie gekozen voor de centrale elektriciteitsproductie in België. Als referentietechnologie voor warmte wordt de hoogrendement verwarmingsketel gekozen. De volgende figuur beschouwt deze vergelijkende situatie. (COGEN, 2006)



Figuur 2: Energetische balans van een WKK en gescheiden productie (Ampere, 2000)



Het elektrische referentierendement van de STEG in dit voorbeeld bedraagt  $\eta_{e-ref} = 0,55$ , het thermisch referentierendement van de hoog rendement ketel bedraagt hier  $\eta_{q-ref} = 0,90$ . Stellen we één eenheid brandstof ter beschikking van de warmtekrachtkoppeling ( $F_{wkk} = 1$ ), dan verkrijgen we de volgende vermogensopbrengsten:  $E = 0,35 = \alpha_e$  en  $Q = 0,50 = \alpha_q$ .

Om dezelfde vermogens E en Q te verkrijgen via gescheiden productie (= referentie) hebben we

$$F_{ref} = \frac{\alpha_e}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\eta_q} = \frac{0,35}{0,55} + \frac{0,50}{0,90} = 1,19 \approx 1,20 \text{ eenheden brandstof nodig. Dit levert ons in dit}$$

voorbeeld dus een of een *absolute primaire energiebesparing (PEB)* op van  $F_{ref} - F_{wkk}$ :

$$PEB = \frac{\alpha_e}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\eta_q} - F_{wkk} = 1,20 - 1 = 0,20 \text{ eenheden.}$$

Om de *relatieve primaire energiebesparing (RPE)* van een warmtekrachtkoppeling te kennen moeten we de PEB delen door het energieverbruik bij een gescheiden productie. We bekommen dan de volgende formule:

$$RPE = \frac{F_{ref} - F_{wkk}}{F_{ref}} = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_e}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\eta_q}}$$

In dit voorbeeld geeft dit de volgende waarde voor de RPE:

$$RPE = 1 - \frac{1}{\frac{0,35}{0,55} + \frac{0,50}{0,90}} = 0,161 = 16,1\%$$

We kunnen de relatieve primaire brandstofbesparing ook berekenen op basis van de kracht-warmteverhouding (PHR). Daarvoor herschikken we de voorgaande formule zoals hierna aangegeven.

$$RPE = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_e}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\eta_q}} = 1 - \frac{\frac{\alpha_e}{\alpha_q} + 1}{(\alpha_e + \alpha_q) \left( \frac{\alpha_e}{\alpha_q \eta_e} + \frac{1}{\eta_q} \right)}$$

$$RPE = 1 - \frac{PHR + 1}{\alpha_{tot} \left( \frac{PHR}{\eta_e} + \frac{1}{\eta_q} \right)}$$

Hanteren we in deze formule de referentiewaardes  $\eta_e = 0,55$  en  $\eta_q = 0,90$ , dan bekomen we de *kwaliteitsindex (KI)* van een warmtekrachtkoppeling:

$$KI = 1 - \frac{1}{1,82\alpha_e + 1,11\alpha_q}$$

Om het label 'kwaliteitswarmtekrachtkoppeling' te verkrijgen moet een warmtekrachtkoppeling een relatieve brandstofbesparing (= kwaliteitsindex) van 0% halen indien de installatie kleiner is dan 1 MW, en moet ze minstens 10% brandstof besparen indien ze groter of gelijk is aan 1 MW. In het volgend hoofdstuk wordt hier dieper op ingegaan bij de warmtekrachtcertificaten.

#### 2.6.4 Totaal energetisch rendement en brandstofbenuttigingsgraad

Bij het beoordelen van warmtekrachtkoppelinginstallaties wordt er vaak gesproken over het *totaal (energetisch) rendement* van de installatie. Dit rendement wordt berekend als de verhouding tussen het totaal geproduceerd bruikbaar vermogen en de hiervoor benodigde brandstof:

$$\alpha_{tot} = \frac{E + Q}{F} = \alpha_e + \alpha_q$$

Aangezien dit een energetisch rendement is, kan deze een waarde aannemen van meer dan 100%. Bij Agfa-Gevaert te Mortsel is in 2007 een warmtekrachtinstallatie geplaatst met een totaal rendement van 103%, dit dankzij het gebruik van bijstookinstallatie op gasmotoren van 2 MW. (Somers, 2007)

Hierbij moet wel bemerkt worden dat men dit totaal (energetisch) rendement van een warmtekrachtkoppeling niet zomaar kan vergelijken met het rendement van bijvoorbeeld een STEG of hoogrendementsketel. Gebruiken we de waarden uit Figuur 2 dan geeft dit voor de warmtekrachtkoppeling een totaal rendement van  $\alpha_{tot} = 0,35 + 0,50 = 0,85$  en voor de STEG bekomen we dan een rendement van  $\eta_e = 0,55$ . Dit zou dus betekenen dat een warmtekrachtkoppeling veel efficiënter zou zijn. Beschouwen we tevens een hoogrendementsketel voor centrale verwarming met een rendement van  $\eta_q = 0,90$ , dan lijkt deze weer veel efficiënter te zijn.

Deze verkeerde conclusie is te wijten aan de gehanteerde definitie voor *totaal rendement*. De bovenstaande formule is namelijk *geen volwaardig rendement* in de thermodynamische zin. Er worden namelijk twee soorten energiehoeveelheden (E en Q) opgeteld die een verschillende kwaliteit hebben. Het is dus beter om te spreken van  $\alpha_{tot}$  = de *brandstofbenuttigingsgraad* in plaats van te spreken over  $\alpha_{tot}$  = het totaal rendement van een warmtekrachtkoppeling wanneer we bovenstaande formule hanteren. (Ampere, 2000)

#### 2.6.5 Exergetisch rendement

Zoals hierboven werd aangehaald, zijn het totaal rendement of de brandstofbenuttigingsgraad geen juiste maatstaven om installaties te vergelijken met elkaar. Een juiste maatstaf om de prestaties te evalueren is het *exergetisch rendement* waarbij rekening wordt gehouden met de kwaliteit van de energievormen. Deze kan worden berekend aan de hand van de volgende formule:

$$\alpha_{ex} = \alpha_e + \alpha_q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

met T = de temperatuur van de geleverde warmte (in K)

T<sub>0</sub> = de omgevingstemperatuur (in K)

Gebruiken we nu het exergetisch rendement om de prestaties te vergelijken tussen een warmtekrachtkoppeling, een STEG en een hoogrendementsketel, dan krijgen we de volgende resultaten in Tabel 1.

**Tabel 1: Exergetische rendementen van een WKK, een STEG en een Hr-ketel bij veranderende temperatuur**

	WKK	STEG	Hr-ketel
Omgevingstemperatuur	$T_0 = 288\text{K}$		
Elektrische rendement	$\alpha_e = 0,35$	$\eta_e = 0,55$	/
Thermisch rendement	$\alpha_q = 0,50$	/	$\eta_q = 0,90$

Temperatuur T		Exergetisch rendement		
°C	K	WKK	STEG	Hr-ketel
15	288	0,350	0,550	0,000
50	323	0,404	0,550	0,098
100	373	0,464	0,550	0,205
200	473	0,546	0,550	0,352
300	573	0,599	0,550	0,448

De tabel laat zien dat het exergetisch rendement van een warmtekrachtkoppeling stijgt met toenemende procestemperatuur T. Ook zien we dat een warmtekrachtkoppeling in termen van exergetisch rendement steeds beter presteert dan een Hr-ketel. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat een Hr-ketel de hoog kwalitatieve brandstof (met relatieve exergie-inhoud = 1) gebruikt om een ruimte op slechts ongeveer 22°C te verwarmen waardoor er grote exergieverliezen optreden. Ruimteverwarming met Hr-ketels is dus vanuit exergetisch oogpunt inefficiënt. Bij een warmtekrachtkoppeling degradeert de hoogwaardige (fossiele) brandstof ook tot warmte op een lagere temperatuur, maar tijdens de degradatie produceert deze ook mechanische energie die via een alternator wordt omgezet in elektrische energie. Op deze wijze verkrijgt men dus elektriciteit als bijproduct waardoor het exergetisch rendement toeneemt. (Ampere, 2000; COGEN, 2006)

### **3 Technologieën voor warmtekrachtkoppeling**

Er bestaan verschillende technologieën die gebruikt kunnen worden voor een warmtekrachtkoppeling. Voor grote (industriële) warmtekrachtkoppelinginstallaties wordt meestal gekozen voor turbintechologie. Dit zijn dan stoomturbines, gasturbines of een gecombineerde cyclus van een stoom- en gasturbine.

De meest aangewende technologie voor kleinere vermogens is de verbrandingsmotor. Ook hier bestaan er verschillende types, maar voor WKK-toepassingen worden bijna uitsluitend zuigermotoren met een inwendige verbranding gebruikt, namelijk Dieselmotoren en Ottomotoren of gasmotoren.

Naast de turbines en motoren zijn er ook een aantal nieuwere technologieën. Zo zijn er de microturbines die veel gelijkenissen vertonen met de grotere turbines maar geschikt zijn voor de kleinere vermogens. De Stirlingmotor en de brandstofcel zijn twee andere nieuwe technologieën die binnen enkele jaren kunnen doorbreken.

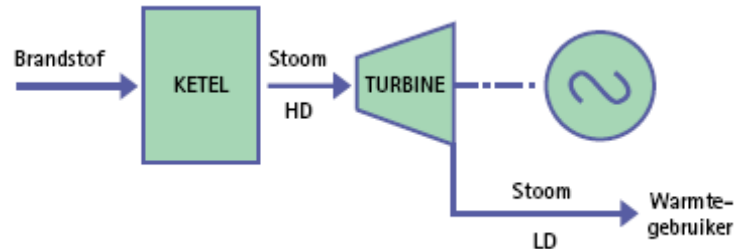
In dit hoofdstuk worden de hierboven genoemde technologieën besproken, evenals de voor- en nadelen van elke technologie. Ook worden de specifieke toepassingen van elke technologie beschreven.

#### **3.1 Stoomturbines**

Eén van de meest verspreide technologieën om generatoren of machines aan te drijven is door gebruik te maken van een stoomturbine. In het verleden werd er dan ook veelvuldig gebruik van gemaakt in de industrie. Tegenwoordig wordt een stoomturbine ook vaak toegepast in de elektriciteitsproductie.

Om tegemoet te komen aan een groot aantal specifieke behoeften en toepassingen bestaan stoomturbines in diverse uitvoeringsvormen. De thermodynamische cyclus van een stoomturbine is gebaseerd op de Rankine-cyclus. De warmte die vrijkomt bij de verbranding van een brandstof wordt gebruikt om stoom op hoge druk te produceren in een ketel. Deze op hoge druk gebrachte stoom wordt dan door een turbine gestuurd waar deze stoom kan expanderen en de turbine aandrijft. De draaiende beweging van de turbine (arbeid) wordt vervolgens met behulp van een generator omgezet in elektrische energie. De stoom die uit de turbine komt

wordt gecondenseerd om hierna teruggebracht te worden naar de ketel. Deze cyclus wordt steeds herhaald. Figuur 3 geeft een schematisch overzicht van de opbouw van een stoomturbine.



**Figuur 3: Principeschema van een warmtekrachtkoppeling met een stoomturbine**

Aangezien de verbranding bij een stoomturbine uitwendig gebeurt, is er geen rechtstreeks contact tussen de vuurhaard en de stoom. Dit heeft als grote voordeel dat de brandstof niet aan specifieke kwaliteitseisen moet voldoen en er dus brandstofflexibiliteit is. Het is dus toegelaten om bijna elke brandstof te verstoffen. Zo kan er hernieuwbare energie gebruikt worden, zoals biomassa of geconcentreerde zonne-energie. Zelfs afvalproducten kunnen worden verbrand op voorwaarde dat de vervuilende emissies binnen de normen blijven. De onderhouds- en inspectiebeurten kunnen meer dan een jaar uit elkaar liggen. Hierdoor haalt de stoomturbine zelf een erg hoge beschikbaarheid van 90% en meer, is ze zeer betrouwbaar en heeft ze een levensduur van 25 tot 35 jaar. (COGEN, 2004)

Een stoomturbine voor warmtekrachtkoppeling heeft een lage kracht-warmte-verhouding of power-to-heat ratio (PHR). De nadruk ligt dan ook vooral op de warmteproductie. Het thermisch rendement haalt hierbij waarden van ongeveer 45% - 65% terwijl het elektrisch rendement eerder laag is (tussen de 15% en 20%). (COGEN, 2004)

Als warmtekrachtkoppeling zijn stoomturbines vooral geschikt voor industriële toepassingen waar er een grote vraag is naar hoge druk stoom, waar er een hoog aantal draaiuren vereist zijn of waar afval mogelijk verbrandt kan worden als brandstof. (Mertens, 2005)

Er bestaan twee grote types van stoomturbines die gebruikt worden voor warmtekrachtkoppelingen, namelijk de tegendrukstoomturbine en de condensatie-turbine met stoomaftap.

### **3.1.1 Tegendrukstoomturbine**

In een tegendrukstoomturbine zorgt een nageschakeld proces ervoor dat de stoom de turbine verlaat op een bepaalde druk. Hierdoor heeft de warmtegebruiker steeds stoom van een bepaalde kwaliteit tot zijn beschikking. De stoom in de turbine wordt slechts ontspannen tot een druk die groter is dan atmosferische druk.

Het tegendrukstoom principe heeft verschillende voordelen. Het is een gemakkelijke configuratie met weinig componenten, de hoge kosten voor lage druk trappen in de turbine worden vermeden, er is een verminderde vraag naar koelwater en het haalt een hoog rendement omdat er geen warmteverlies naar de omgeving is in de condensor. (COGEN, 2004)

Er zijn ook enkele nadelen verbonden aan dit principe. Voor hetzelfde vermogen moet een stoomturbine groter zijn aangezien ze met een lager enthalpie-verschil in de stoom werkt. (COGEN, 2006)

### **3.1.2 Condensatieturbine met stoomaftap**

In een condensatieturbine met stoomaftap wordt tijdens het expansieproces in de turbine een hoeveelheid stoom op de gewenste druk afgetapt. Deze afgetapte stoom wordt vervolgens gebruikt om te voldoen aan de warmtebehoefte. In tegenstelling met een tegendrukstoomturbine gaat hier de expansie van de overige stoom door tot een druk die lager is dan de atmosferische druk. Vervolgens condenseert de stoom in een condensor en wordt er water gevormd. Dit water wordt opnieuw naar de ketel gestuurd waar het weer opgewarmd wordt tot stoom.

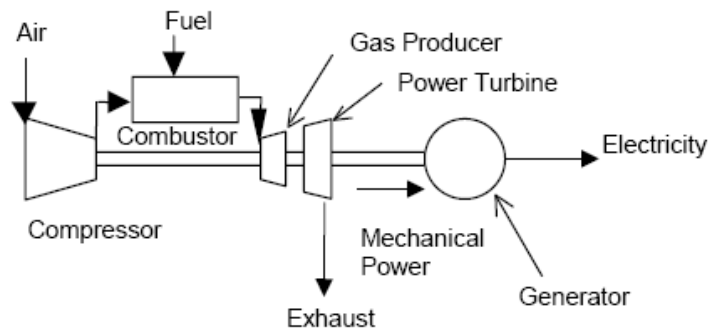
Het voordeel bij een condensatieturbine met stoomaftap is de mogelijkheid om flexibiliteit in te bouwen door het plaatsen van meerdere stoomaftappen. Op deze manier kunnen de aftapdrukken of de aftapdebieten variëren en ligt de verhouding tussen geproduceerde hoeveelheid warmte en elektriciteit niet vast. (COGEN, 2004)

## **3.2 Gasturbines**

Het thermodynamisch proces van een gasturbine is gebaseerd op de Brayton-cyclus. In tegenstelling tot stoomturbines, treedt bij deze cyclus geen uitwendige maar een inwendige verbranding op. De keuze voor een geschikte brandstof is hier dus minder vrij. De meest

gebruikte brandstof bij turbines is aardgas, maar ook lichte petroleum distillaten (bijvoorbeeld dieselolie of benzine) of producten verkregen uit koolvergassing kunnen gebruikt worden. (COGEN, 2006)

De werking van de cyclus verloopt als volgt. De turbine zuigt atmosferische lucht aan en deze lucht wordt samengedrukt in de compressor. In de verbrandingskamer wordt aan deze gecomprimeerde lucht brandstof toegevoegd, waarna dit mengsel wordt ontstoken. De hierdoor ontstane hete rookgassen op hoge druk worden vervolgens over een turbine ontspannen. Dit doet de turbine draaien en er wordt arbeid geproduceerd. Een generator zet vervolgens deze arbeid om in elektrische energie. De rookgassen die de turbine verlaten hebben echter nog een aanzienlijke warmte-inhoud (tussen 450°C en 600°C). Om deze warmte te recupereren worden deze rookgassen naar een afgassenketel gestuurd. Hier wordt de warmte gebruikt om stoom te produceren of om rechtstreeks gebruikt te worden in thermische toepassingen, zoals bijvoorbeeld drogen of verwarming tot hogere temperaturen. Om aan grotere warmtebehoefes te voldoen dan de rookgassen van de turbine kunnen leveren, is het mogelijk om bij te stoken in de ketel. Dit betekent wel dat een extra hoeveelheid brandstof moet verbrand worden. Figuur 4 schetst de configuratie van een gasturbine. (COGEN, 2004; COGEN, 2006; Emis, 2001)



**Figuur 4: Schema van een warmtekrachtkoppeling met een gasturbine**

Het (nominale) elektrisch rendement van een warmtekrachtkoppeling met gasturbine varieert tussen 25% en 40%, afhankelijk van het opgestelde vermogen. Dit relatief lage elektrische rendement is te wijten aan de compressor die bijna de helft van het nuttige vermogen opgebruikt voor zijn aandrijving. Ook van invloed is de mate van bijstook in de ketel. Het thermisch rendement bedraagt meestal 55% tot 60%. De kracht-warmteverhouding bedraagt ongeveer 0,5 – 0,8. (COGEN, 2004; COGEN, 2006)

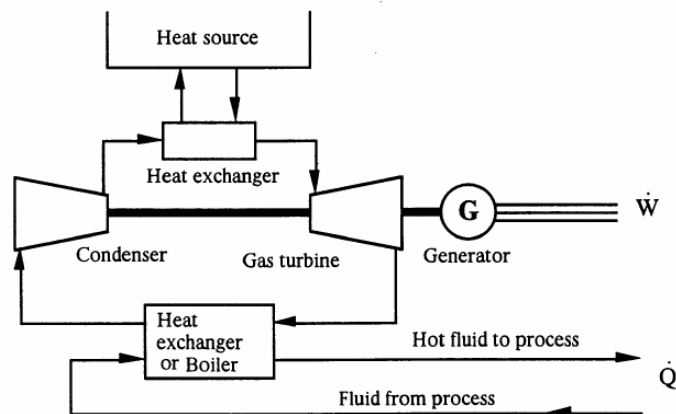
Gasturbines zijn reeds veelvuldig toegepast als warmtekrachtkoppelinginstallatie met als grootste voordelen hun lage installatiekosten, hun hoge beschikbaarheid (85% en meer is mogelijk) dankzij snel en goedkoop onderhoud en de hoge kwaliteit van warmte die gemakkelijk



kan worden opgevangen. Ook de commerciële beschikbaarheid van volledige gasturbine pakketten is een troef voor deze technologie. De levensduur van gasturbines bedraagt ongeveer 15 tot 20 jaar, maar kan sterk worden ingekort wanneer er brandstof van slechte kwaliteit wordt gebruikt of wanneer er gebrekkig onderhoud is. (COGEN, 2006)

De gasturbine wordt meestal toegepast voor industriële warmtekrachtkoppeling-installaties van middelgrote tot grote vermogens (vanaf ongeveer 1 MWe). Vooral wanneer er een grote behoefte is aan hoge druk stoom of hete rookgassen is een gasturbine aangewezen. Ook wanneer er een continue behoefte is aan warmte en elektriciteit, en er dus een groot aantal draaiuren gewenst is, kan een gasturbine geschikt zijn. In Vlaanderen zijn de meeste warmtekrachtkoppelinginstallaties met gasturbine van het type LM 6000 van General Electric. Deze installatie heeft een elektrisch vermogen van ongeveer 40 MW. (Mertens, 2005)

De hierboven beschreven gasturbine technologie is deze van een gasturbine met open cyclus. Dit is ook de meest voorkomende technologie. Hiernaast is er echter ook een andere, minder gebruikte technologie, namelijk de gasturbine met gesloten cyclus. Het principeschema wordt weergegeven in Figuur 5 onder deze alinea. Bij deze technologie circuleert het werkfluidum, meestal lucht of helium, in een gesloten circuit. Een warmtewisselaar zorgt er hierbij voor dat het werkfluidum wordt opgewarmd voordat het over de turbine expandeert. Vervolgens wordt het werkfluidum in een andere warmtewisselaar afgekoeld om daarna, via de compressor, weer te worden opgewarmd. De warmte die in de tweede warmtewisselaar vrij komt kan nuttig worden aangewend. Op deze manier blijft het werkfluidum vrij van pollutie en kan het geen erosie of corrosie veroorzaken. Omwille van de externe verbranding kan er om het even welke brandstof worden gebruikt, van industrieel afval tot zonne-energie. (COGEN, 2006)



**Figuur 5: Schema van een warmtekrachtkoppeling met een gasturbine met een gesloten cyclus**

Net als bij stoomturbines zijn er bij gasturbines ook twee belangrijke types: de heavy duty gasturbine en de aeroderivative gasturbine.

### **3.2.1 De aeroderivative gasturbine**

De aeroderivative gasturbine is afgeleid van de vliegtuigmotoren. Dit type wordt gekenmerkt door zijn hogere rendement omdat het meerassig uitgevoerd wordt. De hogedrukturbine drijft er de hogedrukcompressor aan, de lagedrukturbine drijft de lagedrukcompressor en de generator aan. Het hogedrukgedeelte kan hierdoor op een hogere snelheid draaien. De aeroderivative gasturbines zijn bovendien erg licht, maar hun vermogensgrootte is beperkt.

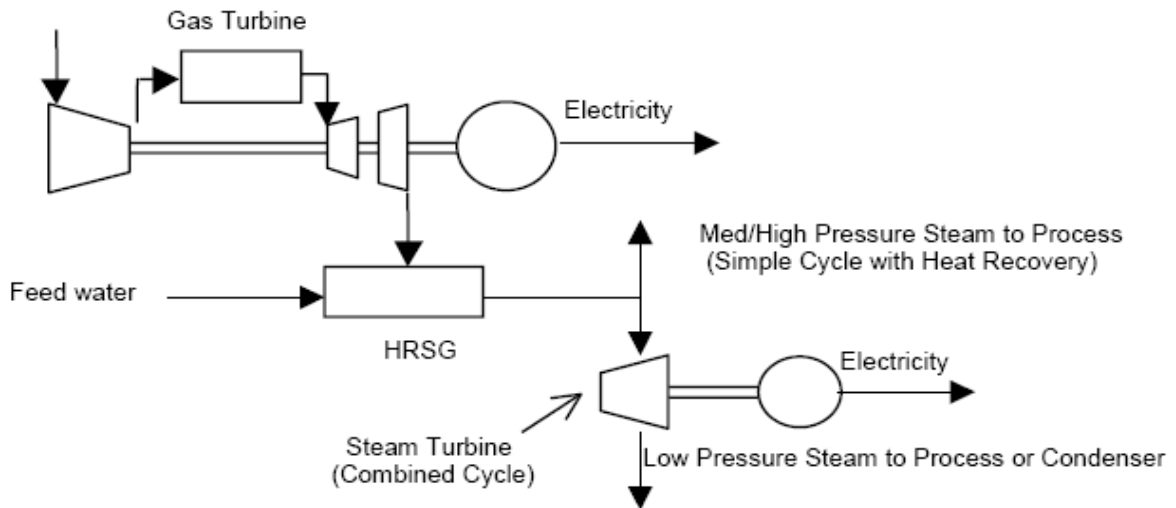
### **3.2.2 De heavy duty gasturbine**

De grotere gasturbines zijn meestal heavy duty gasturbines. Dit type is in vergelijking met de aeroderivative gasturbine zwaarder maar is ook robuuster. Het tijdsinterval tussen de verschillende onderhoudsbeurten is ook langer, wat dit type ook meer geschikt maakt voor baseload-toepassingen.

## **3.3 *Gecombineerde cyclus (STEG)***

De hierboven beschreven gas- en stoomturbines kunnen ook gecombineerd worden. Op deze manier verkrijgen we een installatie die werkt met twee thermodynamische cycli. Een gasturbine wekt stoom op in een afgassenketel, eventueel geholpen met een bijstook. Deze stoom wordt bij een gecombineerde cyclus gebruikt om eerst een stoomturbine aan te drijven, in plaats van de stoom direct te gebruiken als warmte voor procesdoeleinden. Deze stoomturbine kan dan een tweede generator aandrijven om op die manier extra elektriciteit te produceren.

Het is duidelijk dat een gecombineerde configuratie van een gas- en stoomturbine een hoog elektrisch rendement kan halen. Deze waarde ligt tussen de 35% en 45%. Dit brengt natuurlijk met zich mee dat het thermisch rendement wat lager is. De totale brandstofbenuttigingsgraad van de installatie bedraagt ongeveer 70% - 88% met een warmte-krachtverhouding (PHR) die ligt tussen 0,6 en 2,0. Figuur 6 geeft een schematisch overzicht van een warmtekrachtkoppeling met een gecombineerde cyclus. (COGEN, 2006)

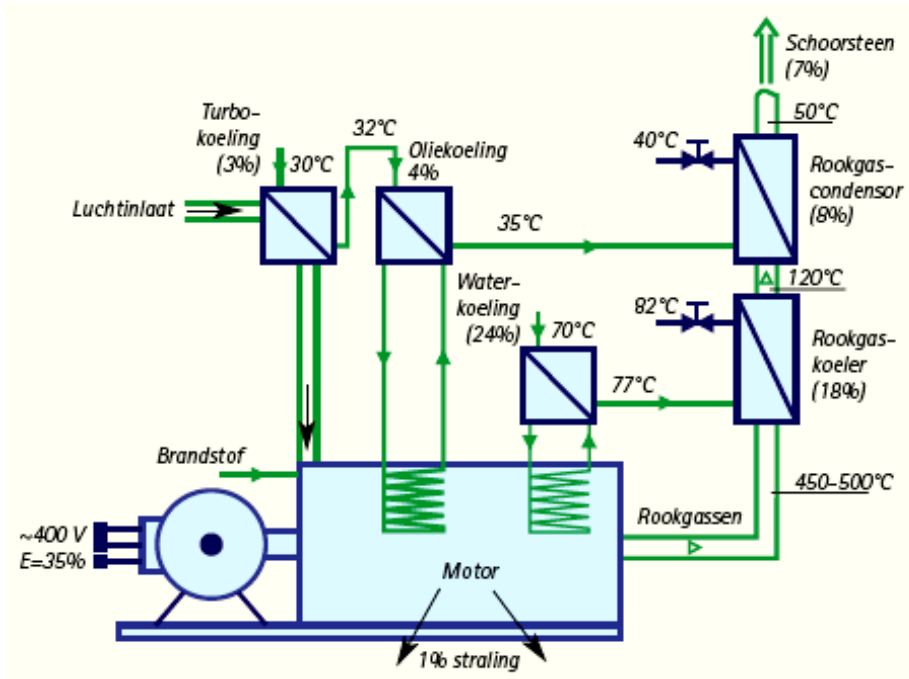


**Figuur 6: Principeschema van een warmtekrachtkoppeling met een gecombineerde cyclus**

De betrouwbaarheid van een gecombineerde installatie bedraagt 80% tot 85%. De installatie heeft een levensduur van 15 tot 25 jaar met een gemiddelde jaarlijkse beschikbaarheid van 77% - 85%.

### 3.4 Motoren

Motoren bestaan uit cilindervormige verbrandingskamers waarin zuigers op en neer bewegen. Deze zuigers zijn verbonden met een roterende as, waarbij de lineaire beweging van de zuigers omgezet wordt in een roterende beweging. Deze roterende as drijft een generator aan die vervolgens elektriciteit produceert. Bij de werking komt er ook heel wat warmte vrij. Dit gebeurt echter op diverse plaatsen en bij diverse temperaturen. De belangrijkste warmtebronnen van een motor zijn de rookgassen en de motorblokkoeling. Daarnaast komt er ook nog veel warmte vrij bij de oliekoeling en eventueel bij de intercooler. Gezien de verschillende temperatuurniveaus is het nuttig aanwenden van de warmte hier een moeilijke opgave. Bijkomende moeilijkheid is dat de vrijgekomen warmte beschikbaar is op relatief lage temperaturen. Dit heeft als gevolg dat er meestal slechts warm water kan worden geproduceerd in plaats van stoom. Stoomproductie is bij motoren wel niet uitgesloten, maar hierdoor daalt de totale brandstofbenutting. Figuur 7 geeft de warmteterugwinning bij een zuigermotor weer. (Emis, 2001; COGEN, 2004)



Figuur 7: Schema van een zuigermotor met warmteterugwinning

Motoren zijn te verkrijgen met vermogens vanaf enkele kW tot ongeveer 10 MW. Het elektrisch rendement is afhankelijk van het type motor en situeert zich tussen 30% en 42%. Moderne grote installaties (tientallen MW) halen zelfs rendementen tot 50%. Dieselmotoren halen meestal een hoger elektrisch rendement dan Ottomotoren. Ook de vermogensgrootte van de motor heeft een invloed op het elektrisch rendement: grotere motoren maken meestal gebruik van cilinders met een grotere diameter, waardoor het rendement hoger is. (COGEN, 2006)

Het thermisch rendement is afhankelijk van de gewenste temperatuur voor het warm water en van de retourtemperatuur van het water. Deze twee factoren bepalen immers welke warmtebronnen er gebruikt kunnen worden en in welke volgorde ze dan geschakeld moeten worden. Het thermisch rendement is in staat waarden te behalen van 40% tot 50%. De warmtekrachtverhouding (PHR) situeert zich bij deze technologie tussen 0,8 – 2,4. Waar men bij motoren wel de nodige aandacht aan moet besteden, zijn de emissies. Om te voldoen aan de strenge emissie-eisen is een rookgasreiniging met behulp van katalysatoren noodzakelijk. Bij de Dieselmotoren moet de uitstoot van roetdeeltjes worden beperkt. (COGEN, 2006)

Motoren hebben het grote voordeel dat het een zeer gekende technologie is. Er zijn dan ook diverse uitvoeringen van diverse fabrikanten op de markt. Dit grote aanbod zorgt ervoor dat een bedrijf een motor kan kiezen die past bij zijn behoeften. In vergelijking met andere technologieën van dezelfde vermogensgrootte zijn motoren ook niet zo duur. Pluspunten zijn

ook hun hoge beschikbaarheid (80% - 90%) en de lange levensduur (tot 100 000 draaiuren). Een grote revisie halfweg is echter wel noodzakelijk. Bovendien kunnen ze op een groot aantal vloeibare en gasvormige brandstoffen werken. Motoren hebben ook het voordeel dat ze vrij snel kunnen opstarten en dus ook elektriciteit kunnen produceren. Dit verklaart ook gebruik van Dieselmotoren als noodaggregaten. (COGEN, 2004)

Een belangrijk nadeel van motoren is dat het veel bewegende onderdelen bevat zoals kleppen, zuigers ... . Hierdoor maakt een motor niet alleen vrij veel lawaai, maar hij vergt bovendien ook veel onderhoud. De onderhoudskosten liggen dan ook hoger dan bij andere technologieën met dezelfde vermogensgrootte. Bij motoren moet ook de nodige aandacht besteedt worden aan de polluerende emissies van  $\text{NO}_x$  en  $\text{SO}_x$ . Rookgasreiniging met behulp van katalysatoren is dan ook noodzakelijk om te voldoen aan de strenge eisen. Bij Dieselmotoren moet men bovendien extra letten op het beperken van de uitstoot van roetdeeltjes. (COGEN, 2006)

Een warmtekrachtkoppeling met motoren kan gebruikt worden voor de verwarming van gebouwen. Het geproduceerde lawaai vormt hier een probleem en vereist dus wel de nodige aandacht. Ook industriële toepassingen waar er vooral een vraag naar warm water of een beperkte vraag naar lagedrukstoom is, zijn geschikt. Motoren zijn tevens geschikt wanneer er een variërende behoefte aan energie aanwezig is in een bedrijf. (Mertens, 2005)

Het onderscheid tussen de verschillende soorten motoren wordt gemaakt op basis van de ontstekingswijze: ofwel gebeurt dit door middel van een extern opgewekte vonk zoals bij de Otto- en gasmotoren, ofwel gebeurt dit door een spontane ontbranding (als gevolg van de hoge temperatuur) zoals bij de Dieselmotoren.

#### **3.4.1 Ottomotoren of gasmotoren**

Ottomotoren kunnen werken met verschillende soorten brandstof zoals benzine, aardgas, propaan, biogas (van waterzuiveringsinstallaties) en stortgas (methaan). Ze worden ook wel gasmotoren genoemd wanneer ze werken met een gasvormige brandstof. Ze werken volgens het principe van de viertaktmotor. Dit wil zeggen dat er vier fasen zijn in de cyclus, namelijk de inlaatfase, de compressiefase, de expansiefase en de uitlaatfase. Tijdens de inlaatfase wordt er een mengsel van brandstof en lucht aangezogen in de cilinder. Vervolgens wordt dit mengsel gecomprimeerd en volgt de ontsteking door een extern opgewekte vonk. Als gevolg van de verbranding neemt de druk in de cilinder toe en wordt de zuiger teruggedrongen. Dit noemt men de expansiefase. Op dit moment wordt er arbeid geleverd. Tijdens de laatste fase van de cyclus worden de hete rookgassen uit de cilinder gedreven. (COGEN, 2006)

Gasmotoren zijn beschikbaar met vermogens die variëren van enkele kW tot ongeveer 10 MW. Het elektrisch rendement van een gasmotor bedraagt ongeveer 30% tot 40%. Het is belangrijk dat het mengsel niet te veel lucht (arm mengsel) bevat, maar ook dat het niet te weinig lucht (rijk mengsel) bevat opdat het brandstofmengsel zou kunnen ontstoken worden. Om het rendement te optimaliseren is een arm mengsel gewenst. Eens de verbranding goed op gang is wordt daarom geprobeerd om op een armer mengsel te werken. (COGEN, 2004)

### **3.4.2 Dieselmotoren**

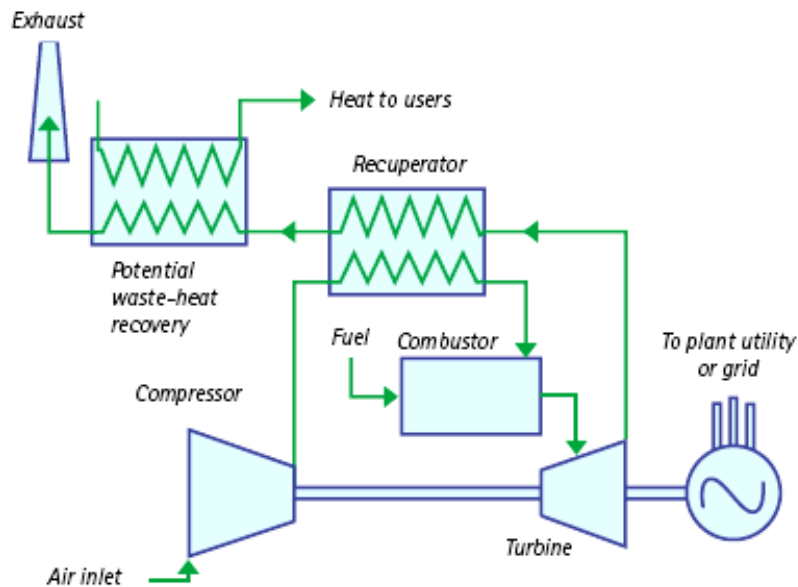
Dieselmotoren werken in vergelijking met Ottomotoren op hogere temperaturen en hogere drukken. Daarom gebruiken ze ook zwaardere brandstoffen zoals dieselolie. De dieselmotor werkt volgens het principe van de Diesel-cyclus die vier slagen per cyclus heeft. Het verschil met de Ottomotor of gasmotor zit, zoals eerder vernoemd, in de wijze waarop het mengsel wordt ontstoken. Bij dit type motor wordt enkel lucht samengedrukt in de cilinder in de compressiefase. Dit zorgt ervoor dat de temperatuur in de cilinders gaat stijgen tot een temperatuur die hoger is dan de ontstekings temperatuur van de brandstof. Pas hierna wordt de brandstof in de cilinder gespoten en ontsteekt ze spontaan, zonder extern opgewekte vonk zoals bij de Ottomotor of gasmotor. De rest van de cyclus is gelijkaardig aan die van de Ottomotor of gasmotor. De verbranding van het mengsel leidt ook hier tot een drukstijging waardoor de zuiger wordt teruggedrongen. Arbeid wordt geleverd. In de laatste fase worden de rookgassen opnieuw uit de cilinder gedreven. (COGEN, 2004; COGEN, 2006)

Dieselmotoren zijn verkrijgbaar met grotere vermogens dan gasmotoren, meestal met waardes van 100 kW tot enkele tientallen MW. Het elektrisch rendement van Dieselmotoren ligt dan ook hoger dan het elektrisch rendement van gasmotoren. Dit in tegenstelling tot het thermisch rendement, dat hier lager is. Dit komt omdat een rookgascondensatie bij een dieselmotor niet mogelijk is vanwege de zwavelinhoud van de brandstof.

### **3.5 Microturbines**

Microturbines verschillen in feite weinig van de grotere gasturbines die reeds beschreven werden. Hun werkingsprincipe is dan ook gelijkaardig. Het vermogen van microturbines ligt uiteraard een stuk lager dan dat van de grotere turbines. Microturbines zijn verkrijgbaar met elektrische vermogens van 25 kW tot 250 kW. Het grote verschil is de aanwezigheid van een recuperator. In deze recuperator wordt de gecomprimeerde lucht, voordat hij naar de verbrandingskamer stroomt, opgewarmd door de hete rookgassen die de turbine verlaten.

Figuur 8 toont dit principe aan. De ontstane rookgassen worden vervolgens geëxpandeerd over de turbine. Op deze wijze wordt arbeid geleverd die zowel wordt aangewend voor de aandrijving van de compressor als voor de aandrijving van de generator die de elektriciteit produceert. Als brandstof voor een microturbine wordt meestal gas gebruikt. (COGEN, 2004)



**Figuur 8: Schema van een microturbine met recuperator**

De recuperator zorgt ervoor dat de microturbine voldoende elektrisch rendement behaalt. Voor de productie van een bepaalde hoeveelheid elektrisch vermogen is er dankzij deze recuperator slechts de helft brandstof nodig. Hierdoor komt het elektrische rendement van een microturbine met recuperator uit op ongeveer 25% tot 30%. Zonder recuperator zou een microturbine slechts in staat zijn om een elektrisch rendement te behalen van 15%. Op deze manier komt het elektrische rendement van microturbines in de buurt van de grote gasturbines. (Vito, 2004)

De microturbine biedt in vergelijking met de kleine gasmotor enkele voordelen. Zo wordt alle vrijgekomen warmte uitsluitend via de rookgassen vrijgegeven, waardoor slechts één warmtewisselaar nodig is. Dit in tegenstelling tot de gasmotor waar de warmte op verschillende plaatsen en op verschillende temperaturniveaus beschikbaar is. Dit maakt het efficiënt benutten van de warmte bij een microturbine veel eenvoudiger en kan de warmte ook worden aangewend om stoom te produceren. Aangezien het verbrandingsproces hier een continu proces is, voldoet een microturbine ook gemakkelijker aan de emissienormen dan een gasmotor.

In Tabel 2 worden de emissies van een microturbine vergeleken met de emissies van motoren. De strengste emissiegrenzen van Vlare-II worden voor de motoren gehanteerd. De gegevens van de microturbine zijn meetgegevens van de Turbec T-100 microturbine met 100 kW<sub>el</sub> vermogen. (Vito, 2004)

**Tabel 2: Emissies van microturbines en motoren (Vito, 2004)**

<i>Emissie</i>	<i>Microturbine</i>	<i>Gasmotor Vlare</i>	<i>Dieselmotor Vlare</i>
Elektrisch rendement	30%	30%	40%
CO <sub>2</sub>	673 g/kWh <sub>el</sub>	673 g/kWh <sub>el</sub>	666 g/kWh <sub>el</sub>
NO <sub>x</sub> @ 5% O <sub>2</sub>	< 80 mg/Nm <sup>3</sup>	500 mg/Nm <sup>3</sup>	4000 mg/Nm <sup>3</sup>
CO @ 5% O <sub>2</sub>	< 50 mg/Nm <sup>3</sup>	650 mg/Nm <sup>3</sup>	650 mg/Nm <sup>3</sup>

Bijkomend voordeel is de flexibiliteit op het gebied van brandstof. Zo kan de microturbine goed overweg met brandstoffen die een lagere of niet-constante energie-inhoud hebben. Gassen met een methaangehalte vanaf 30% vormen bijvoorbeeld geen problemen. Ook op het gebied van biogastoepassingen kunnen microturbines interessant zijn. Een laatste voordeel van microturbines is de lagere onderhoudskost als gevolg van minder bewegende onderdelen. Dit heeft ook het voordeel dat er weinig trillingen optreden, wat op haar beurt positief is voor de geluidsproductie. (COGEN, 2006)

Een microturbine heeft echter ook enkele minpunten. Zo ligt het elektrisch rendement en ook het totaal rendement lager dan dat van een gasmotor met hetzelfde vermogen. Dit is vooral te wijten aan de compressor die de brandstof eerst nog moet comprimeren voordat ze naar de brandstofkamer gaat. Ook zijn microturbines een relatief nieuwe technologie, waardoor ze minder bekend zijn dan de gasmotoren. De investeringskost van de microturbine is zeker niet gering maar heeft toch het niveau van de gasmotor bereikt. (COGEN, 2004)

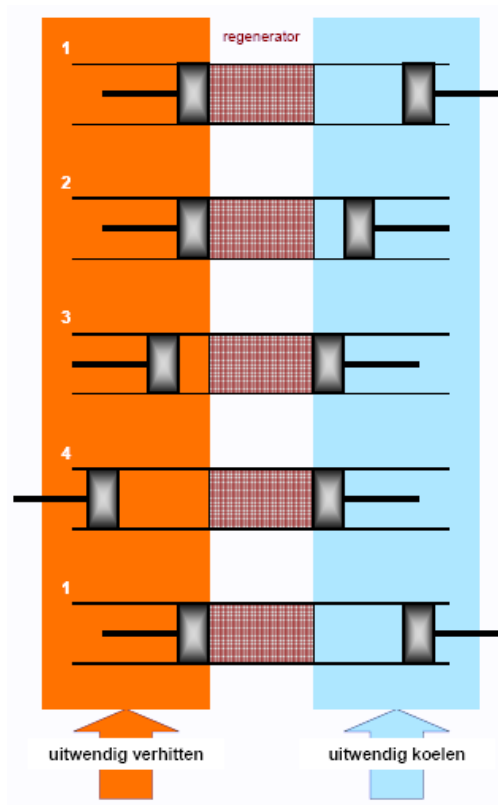
Toepassingen voor microturbines situeren zich voornamelijk bij de verbranding van biogas, de exploitatie van stortplaatsen, de toepassingen met rookgasreiniging in de tuinbouw, en in bedrijven met een vraag naar stoom op relatief hoge druk. In deze situaties is het ook mogelijk om de microturbine voor een ketel te schakelen. Microturbines zijn ook geschikt voor die situaties in een eilandbedrijf waar normaal gekozen wordt voor kleinschalige gasmotoren. Ook zijn ze geschikt als voorverwarming bij grote industriële ovens. (Mertens, 2005)



### 3.6 Stirlingmotoren

Warmtekrachtkoppeling is ook mogelijk met Stirlingmotoren. Deze technologie is nog niet volledig ontwikkeld en wordt nog niet vaak toegepast, maar er is een stijgende interesse omwille van een aantal voordelen. In tegenstelling tot de verbrandingsmotor waar de verbranding inwendig plaats vindt, gebeurt de verbranding bij de Stirlingmotor uitwendig. Dit betekent dat de gassen die zich in de motor bevinden, de installatie niet zullen verlaten. De Stirlingmotor werkt hierbij volgens het principe dat verwarmd gas uitzet en gekoeld gas krimpt. Het uitzetten en krimpen van een gas in een cilinder zal ervoor zorgen dat een zuiger op en neer zal bewegen.

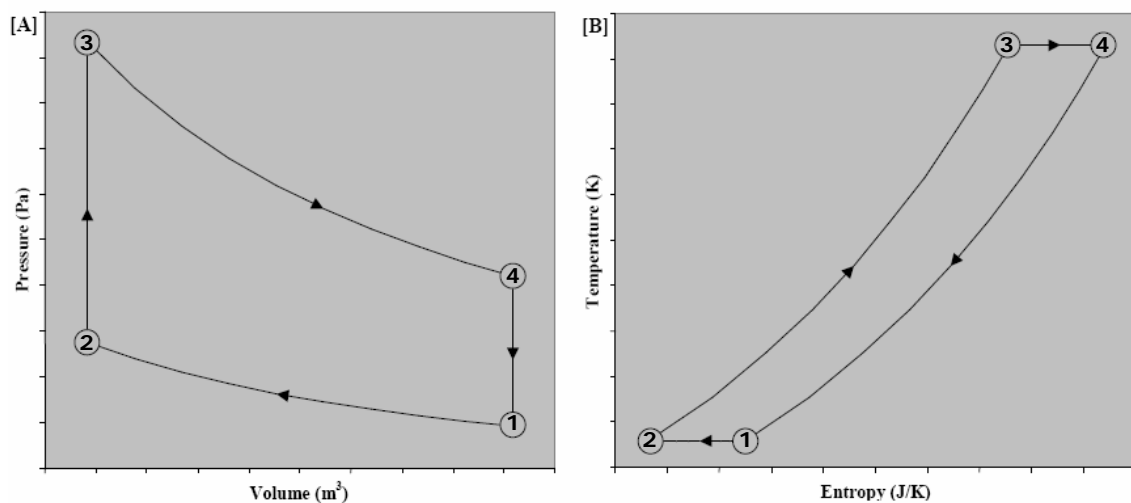
De Stirlingcyclus, die omkeerbaar is, bestaat uit twee isochoren (constant volume) en twee isothermen (constante temperatuur). Een werkfluïdum, meestal lucht of helium, doorloopt dit deze cyclus. Er bestaan verschillende manieren om deze motor op te bouwen. Figuur 9 illustreert hier een mogelijkheid met twee cilinders en daartussen een regenerator.



Figuur 9: Principeschema van een Stirlingmotor

De warme cilinder wordt uitwendig verhit door een warmtebron en de koude cilinder wordt uitwendig gekoeld. Dit koelen van de koude cilinder gebeurt meestal met leidingwater. De regenerator doet dienst als een tijdelijke opslag voor warmte. Deze regenerator bestaat uit een fijnmazige matrix met poreus metaal of uit metalen oppervlakten die een ringvormige opening omsluiten. (COGEN, 2006)

De werking van de opstelling in Figuur 9 is aan de hand van de 4 stappen te volgen op de diagrammen in Figuur 10 onder deze alinea. Bij de overgang van stap één naar stap twee gebeurt er een isotherme compressie bij lage temperatuur. Deze compressie vereist uiteraard arbeid. Om de temperatuur constant te houden moet er uitwendig gekoeld worden. Het gecomprimeerde gas (met lage temperatuur) gaat in een volgende fase door de regenerator waar het gas wordt opgewarmd (van stap twee naar stap drie). Deze opwarming heeft tot gevolg dat de druk significant toeneemt. Vervolgens gaat het gas in de warme cilinder isotherm expanderen bij een constante en hoge temperatuur. Op de figuur is dit de overgang van stap drie naar stap vier. Om de temperatuur constant te houden wordt er uitwendig verwarmd. Gedurende de expansie wordt arbeid geproduceerd. De laatste fase in de cyclus is de overgang van stap vier naar stap één en stelt de afkoeling van het gas in de regenerator voor, waardoor de druk weer af neemt. (COGEN, 2006; Haywood, z.d.)



**Figuur 10: Thermodynamische processen in een ideale Stirling-cyclus**  
**(A) Druk-Volume diagram (B) Temperatuur-Entropie diagram**

In theorie wordt er verondersteld dat de warmte die het gas afgeeft aan de regenerator tijdens de afkoeling (stap vier naar stap één), weer volledig kan opgenomen worden tijdens de opwarming van het gas bij de overgang van stap twee naar drie. In werkelijkheid zijn er echter steeds kleine warmteverliezen. Omwille van het temperatuursverschil is de arbeid die vrijkomt

bij de expansie van het gas groter dan de arbeid die nodig is voor de compressie van het gas. Hierdoor ontstaat er een netto geproduceerde hoeveelheid arbeid die via een generator kan worden omgezet in elektriciteit. (COGEN, 2004)

De Stirlingmotor kan hogere rendementen halen omdat het de Carnot-cyclus dichter benadert. Zo worden elektrische rendementen gehaald van 40%. Verdere ontwikkeling kan het mogelijk maken dat dit rendement nog stijgt tot 50%. De totale brandstofbenuttigingsgraad van een warmtekrachtkoppeling met Stirlingmotor ligt in het gebied van 65% tot 90%. De warmtekrachtverhouding (PHR) situeert zich rond 0,8 en 1,7. (COGEN, 2006)

Aangezien de warmte hier als primair product van de installatie wordt gezien, is de opgewekte elektrische energie door de Stirlingmotor een mooi meegenomen bijproduct. Dit is dus een voordeel van de Stirlingmotor. Dankzij de uitwendige verbranding biedt de Stirlingmotor ook brandstofflexibiliteit. Dit wil zeggen dat de keuze van het brandstoftype vrij is, en dus ook laagwaardige brandstoffen zoals biomassa en mest mogelijk zijn. Hiernaast werkt de machine ook nog geluidsarm omdat er geen ontploffingen zijn zoals bij een klassieke verbrandingsmotor. Bovendien vergt ze ook weinig onderhoud en produceert ze weinig trillingen. (COGEN, 2006)

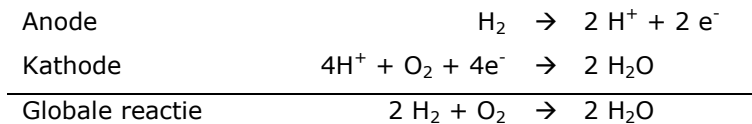
Een nadeel van de Stirlingmotor is de tragere opstart waardoor er niet onmiddellijk elektriciteit geproduceerd wordt van zodra de branders aanslaan. Andere belangrijkere nadelen zijn ook het gebrek aan commercialisatie als warmtekrachtkoppeling en vooral de erg hoge kostprijs. Er zijn dan ook eerder een beperkt aantal toestellen op de markt, zowel voor huiselijke toepassingen als voor industriële toepassingen. Hierbij spreken we dan van elektrische vermogens in de orde van 20 kW tot 60 kW.

De Stirlingmotor kan worden gebruikt als residentiële warmtekrachtkoppeling. Hij wordt dan ingebouwd in een klassieke verwarmingsketel. In deze ketel worden de warme rookgassen gebruikt om water op te warmen via een warmtewisselaar. De Stirlingmotor wordt op die plaats ingebouwd waar de temperatuur het meest geschikt is voor een optimale werking. Er zijn hierbij vele mogelijkheden tot opbouw: één of meerdere branders in de ketel, een enkelvoudige of ont dubbelde warmtewisselaar ... . De warmte die het koelwater opneemt om de koude zijde van de Stirlingmotor te koelen kan gerecupereerd worden. Het elektrisch rendement is in dit geval wel lager en situeert zich rond 10% à 15% waardoor ook de kracht-warmteverhouding (PHR) lager is. De Stirlingmotor kan ook gebruikt worden om elektriciteit te produceren uit hernieuwbare energiebronnen, zoals zonne-instraling of biomassa, en zelfs uit afvalwarmte. (COGEN, 2006; Mertens, 2005)

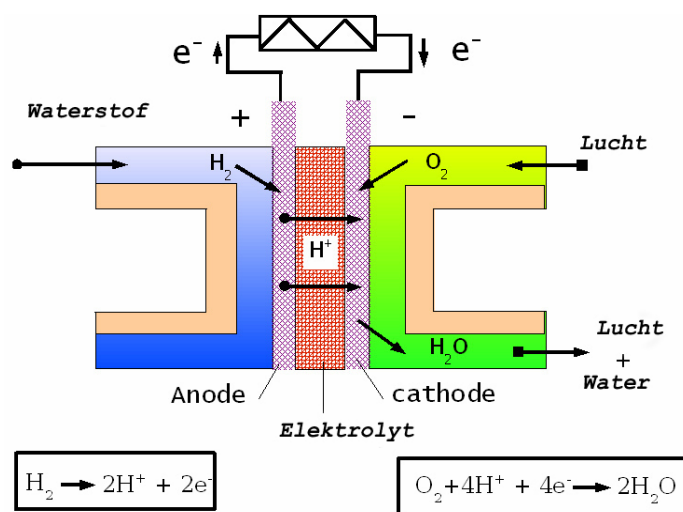
### 3.7 Brandstofcellen

Een brandstofcel is een systeem dat via een elektrochemisch proces energie rechtstreeks omzet in elektriciteit en dus geen thermodynamische cyclus doorloopt. De doorgaande chemische reactie die instaat voor de werking van de brandstofcel is de oxidatie van waterstof ( $H_2$ ) met het oxidans zuurstof ( $O_2$ ) waarbij water ( $H_2O$ ) wordt gevormd. Bij deze reactie komt energie (warmte) vrij aangezien de reactie exotherm is. Deze warmte moet worden afgevoerd voor een optimale werking en kan dus nuttig worden gebruikt. Een brandstofcel kan dus gebruikt worden als een warmtekrachtkoppeling. (COGEN, 2004)

De principiële opzet van een brandstofcel bestaat uit een poreuze anode en kathode met daartussen een elektrolytlaag. Figuur 11 op de volgende pagina illustreert deze opstelling. Aan de anodezijde wordt waterstof toegevoegd waarbij het zich splitst in ionen ( $H^+$ ) en elektronen ( $e^-$ ). Het elektrolyt laat enkel de ionen door. De elektronen bewegen langs een externe belasting naar de kathode. Daar reageren de  $H^+$ -ionen, de zuurstof en de elektronen met elkaar. Er wordt water gevormd. Schematisch kan de chemische reactie in een brandstofcel als volgt worden weergegeven:



Het spanningsverschil dat op deze manier ontstaat tussen anode en kathode bedraagt ongeveer 0,7 Volt. Om een hogere spanning te bekommen worden meerdere brandstofcellen in serie geplaatst. Dit wordt een "stack" genoemd. Aangezien de brandstofcel gelijkstroom levert en vrijwel steeds wisselstroom gewenst is, is een omvormer hier noodzakelijk.



Figuur 11: Schema van een brandstofcel

De ontwikkeling van brandstofcellen richt zich zowel op minieme vermogensgroottes als op grootschalige installaties van enkele MW. Naargelang het gebruikte elektrolyt zijn er verschillende soorten brandstofcellen te onderscheiden. Elk type werkt hierbij op een bepaalde temperatuur. Deze werkingstemperatuur is zeer belangrijk wanneer men een brandstofcel wenst te gebruiken als warmtekrachtkoppeling. Een beknopt overzicht van de voornaamste kenmerken van enkele types brandstofcellen wordt weergegeven in Tabel 3. Een uitgebreidere beschrijving van elke type zou in het bestek van deze eindverhandeling te ver gaan.

**Tabel 3: Voornaamste karakteristieken van de verschillende types brandstofcellen**

Type	AFC	PEFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	KOH	vast ion geleidend membraam	vloeibaar $H_3PO_4$	$Li_2CO_3$ en $K_2CO_3$	ceramiek $Y_2O_3ZrO_2$
Werkings-temp.	60 – 90°C	80°C	200°C	650°C	800°C – 1000°C
Celrendement	45 - 60%	30 – 60%	35 – 40%	45 – 60%	45 – 65%
Max. Elektrisch vermogen	20kW	250kW	200kW	1MW	300kW
Toepassingen	onder-zeeërs ruimtevaart	transport klein stationair	WKK	WKK	WKK

Brandstofcellen hebben een aantal belangrijke voordelen. Ze zijn geluidloos, vergen weinig onderhoud door het gebrek aan bewegende onderdelen en zijn gebruiksvriendelijk. Dankzij het modulaire concept (stacks) kan elke gewenste vermogensgrootte worden bereikt. Bovendien hebben ze een hoog elektrisch rendement en een hoge totale brandstofbenutting van 80% tot 90%. De kracht-warmte verhouding (PHR) ligt in het gebied 0,8 – 1,0. Ook voor werking in deellast zijn brandstofcellen interessant. Bij de meeste andere technologieën daalt hun rendement bij deellast, in tegenstelling tot de brandstofcel die zelfs een hoger rendement kan halen in deellast. (COGEN, 2006)

Er wordt vaak beweerd dat brandstofcellen geen  $CO_2$  produceren omdat ze enkel waterdamp uitstoten. Deze visie is echter te beperkt. De gebruikte brandstof, met name waterstof, is immers niet vrij beschikbaar in de natuur. Het moet dus geproduceerd worden en hier situeert zich dan ook het probleem. De productie is immers een industrieel proces waarbij (fossiele) brandstof nodig is. Dit gebeurt voor 90% door reforming van aardgas, waarbij evenveel  $CO_2$  vrijkomt als bij verbranding van dezelfde hoeveelheid aardgas.

Momenteel wordt de brandstofcel in de praktijk nog niet toegepast. Er zijn nog heel wat technologische problemen die ervoor zorgen dat brandstofcellen nog een eind verwijderd zijn van hun marktdoorbraak. Verder onderzoek en ontwikkeling is dan ook nodig om de brandstofcel als warmtekrachtkoppeling te gebruiken. De brandstofcel biedt perspectieven voor zowel lokale als draagbare elektriciteitsopwekking. Denk maar aan de vele mogelijkheden voor transport, ruimtevaart en militaire toepassingen. (Mertens, 2005)

### 3.8 Overzicht van de verschillende technologieën

Om de besproken technologieën beter te kunnen vergelijken wordt in Tabel 4 hieronder een overzicht gegeven van de besproken technologieën met hun specifieke voor- en nadelen. De technische eigenschappen van de verschillende technologieën worden in Tabel 5 op de volgende pagina overzichtelijk weergegeven.

**Tabel 4: Voor- en nadelen van de technologieën voor warmtekrachtkoppeling**

<b>Technologie</b>	<b>Voordelen</b>	<b>Nadelen</b>
<b>Stoomturbines</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Brandstofflexibiliteit</li><li>• Hoge beschikbaarheid</li><li>• Lange levensduur</li><li>• Hoge betrouwbaarheid</li><li>• PHR kan variëren</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Trage opstart</li><li>• Lage PHR</li><li>• Lager elektrisch rendement</li></ul>
<b>Gasturbines</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hoge betrouwbaarheid</li><li>• Hoge beschikbaarheid</li><li>• Lage emissies</li><li>• Hoge warmtegraad beschikbaar</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Minder brandstofflexibiliteit</li><li>• Gascompressor of hoge druk gas vereist</li></ul>
<b>Gecombineerde cyclus</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hoog elektrisch rendement</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lager thermisch rendement</li></ul>
<b>Motoren</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hoge elektrische rendementen</li><li>• Relatief lage investeringskost</li><li>• Snelle opstart</li><li>• Werkt met lage druk gas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hoge onderhoudskosten</li><li>• Veel lawaai</li><li>• Lage warmtegraad beperkt applicatiemogelijkheden</li><li>• Relatief hoge emissies</li></ul>

<b>Microturbines</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warmte enkel beschikbaar via rookgassen</li> <li>• Lage emissies</li> <li>• Weinig bewegende onderdelen</li> <li>• Lagere onderhoudskosten</li> <li>• Relatief stil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lager elektrisch rendement</li> <li>• Investeringskost</li> <li>• Nieuwe technologie</li> </ul>
<b>Stirlingmotoren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brandstofflexibiliteit</li> <li>• Hoog elektrisch rendement</li> <li>• Geluidsarm</li> <li>• Weinig onderhoud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoge kostprijs</li> <li>• Trage opstart</li> <li>• Gebrek aan commercialisatie</li> </ul>
<b>Brandstofcellen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuivere emissies</li> <li>• Geluidloos</li> <li>• Weinig onderhoud</li> <li>• Moduleerbaar design</li> <li>• Hoge efficiëntie, ook bij deellast</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoge kosten</li> <li>• Nieuwe technologie</li> <li>• Beschikbaarheid waterstof?</li> </ul>

**Tabel 5: Technische eigenschappen van de technologieën voor warmtekrachtkoppeling (COGEN, 2006)**

Technologie	Elektrisch vermogen	Elektrisch rendement		Thermisch rendement	Kracht-warmte verhouding (PHR)
	MW	Vollast (100%)	Deellast (50%)	%	
<b>Stoomturbines</b>	0,5 - 100	14 - 35	12 - 28	45 - 60	0,1 - 0,5
<b>Gasturbines</b>	0,1 - 100	25 - 40	18 - 30	35 - 55	0,5 - 0,8
<b>Dieselmotor</b>	0,07 - 50	35 - 45	32 - 40	25 - 50	0,8 - 2,4
<b>Otto- of gasmotor</b>	0,015 - 2	27 - 40	25 - 35	40 - 55	0,5 - 0,7
<b>Microturbines</b>	0,03 - 0,2	12 - 30	9 - 23	45 - 60	0,25 - 0,7
<b>Stirlingmotoren</b>	0,003 - 1,5	35 - 50	34 - 49	25 - 45	0,8 - 1,7
<b>Brandstofcellen</b>	0,001 - 1	35 - 65	35 - 65	50 - 55	0,8 - 2,0

Een ander interessant overzicht wordt gegeven in Tabel 6 waar niet alleen de technische eigenschappen van de technologieën worden vergeleken, maar ook gekeken wordt naar factoren zoals installatiekosten, opstarttijd, geluidsproductie, thermische output ... . De technische eigenschappen in deze tabel kunnen kleine afwijkingen aangeven ten op zichten van

deze vermeld in Tabel 5. Dit is te verklaren doordat een technologie steeds evolueert en de gegevens waarop de tabellen zijn gebaseerd slechts momentopnames zijn.

**Tabel 6: Overzicht van de typische kosten en prestatie karakteristieken (EPA,2002)**

Technology	Steam turbine <sup>1</sup>	Diesel engine	Nat. gas engine	Gas-turbine	Micro-turbine	Fuel cell
Power efficiency (HHV)	15-38%	27-45%	22-40%	22-36%	18-27%	30-63%
Overall efficiency (HHV)	80%	70-80%	70-80%	70-75%	65-75%	65-80%
Effective electrical efficiency	75%	70-80%	70-80%	50-70%	50-70%	60-80%
Typical capacity (MWe)	0.2-800	0.03-5	0.05-5	1-500	0.03-0.35	0.01-2
Typical power to heat ratio	0.1-0.3	0.5-1	0.5-1	0.5-2	0.4-0.7	1-2
Part-load	ok	good	ok	poor	ok	good
CHP Installed costs (\$/kWe)	300-900	900-1,500	900-1,500	800-1,800	1,300-2,500	2,700-5,300
O&M costs (\$/kWe)	<0.004	0.005-0.015	0.007-0.02	0.003-0.0096	0.01 (projected)	0.005-0.04
Availability	near 100%	90-95%	92-97%	90-98%	90-98%	>95%
Hours to overhauls	>50,000	25,000-30,000	24,000-60,000	30,000-50,000	5,000-40,000	10,000-40,000
Start-up time	1 hr - 1 day	10 sec	10 sec	10 min - 1 hr	60 sec	3 hrs - 2 days
Fuel pressure (psi)	n/a	<5	1-45	120-500 (compressor)	40-100 (compressor)	0.5-45
Fuels	all	diesel, residual oil	natural gas, biogas, propane, landfill gas	natural gas, biogas, propane, oil	natural gas, biogas, propane, oil	hydrogen, natural gas, propane, methanol



Technology	Steam turbine <sup>1</sup>	Diesel engine	Nat. gas engine	Gas-turbine	Micro-turbine	Fuel cell
Noise	high	high	high	moderate	moderate	low
Uses for thermal output	LP-HP steam	hot water, LP steam	hot water, LP steam	heat, hot water, LP-HP steam	heat, hot water, LP steam	hot water, LP-HP steam
Power Density (kW/m <sup>2</sup> )	>100	35-50	35-50	20-500	5-70	5-20
NOx <sup>2</sup> , lb/MMbtu	0.03-0.3	1-1.8 <sup>3</sup>	0.18	0.05	0.03	0.004
lb/MWhTotalOutput	0.13-1.3	4.3-8.2 <sup>4</sup>	0.8	0.25	0.15	0.02

\* Data are illustrative values for 'typically' available systems; All \$ are in 2000\$

1: For steam turbine, not entire boiler package

2: New low emitting units without end of pipe controls

3: Present on road diesel requirements are approximately 1 lb/MMBtu, but most backup diesel generators emit at 1.8 lb/MMBtu

4: New on road diesel rule would bring emissions rate to approximately 0.3 lb/MWhTotalOutput

## **4 Redenen om het gebruik van warmtekrachtkoppeling te bevorderen**

Naast de mogelijkheid om een primaire brandstofbesparing te realiseren en de mogelijkheid om economisch rendabel te zijn, zijn er ook nog andere redenen die ervoor pleiten dat het gebruik van warmtekrachtkoppeling wordt bevorderd. Deze redenen zijn de vermeden externe kosten, de economische toekomstvisie, de transgenerationale solidariteit, het technologisch multiplier effect, het economisch multiplier effect, het sociaal multiplier effect, het sociaal effect en ten slotte de voordelen voor de nutsbedrijven en de netontlasting. Deze opgesomde redenen worden in dit hoofdstuk verder besproken.

### **4.1 Vermeden externe kosten**

Wanneer de economische rendabiliteit van verschillende technologieën met elkaar wordt vergeleken, houden deze meestal enkel rekening met de *private (interne) kosten* die een onderneming of persoon zelf moeten dragen. Deze private kosten omvatten de kosten voor de nodige productiefactoren (grondstoffen, kapitaal, arbeid). Willen we echter een maatschappelijk optimum bereiken, dan moeten we ook de *externe baten* en de *externe kosten* verbonden aan deze technologieën in rekening brengen. De externe kosten omvatten alle schadelijke en *negatieve externe effecten* die veroorzaakt worden door een technologie. Aangezien deze effecten een waardeverlies betekenen voor de maatschappij als geheel moeten ze meegerekend worden bij de totale kosten. Op deze manier verkrijgt men de totale of *sociale kosten*. Doorgaans zijn de externe kosten niet in een investeringsanalyse verwerkt. Brengen we deze kosten wel mee in de berekening, kan een warmtekrachtkoppeling interessanter worden ten opzichte van een gescheiden energieopwekking.

In hoofdstuk 2 hebben we gezien dat een warmtekrachtkoppeling een primaire energie- of brandstofbesparing *kan* opleveren. Dit betekent natuurlijk ook dat er minder vervuilende en/of schadelijke emissies worden uitgestoten. Bij beloftevolle technologieën zoals bijvoorbeeld de brandstofcel zouden er zelfs geen schadelijke emissies meer zijn. Naast deze directe vermindering van de uitstoot is er ook een indirecte reductie van emissies tijdens de verschillende stappen van het productieproces van de (fossiele) brandstoffen: exploratie, raffinage, verwerking, transport en opslag. Hierbij moet opgemerkt worden dat een warmtekrachtkoppeling niet altijd de totale emissie zal verminderen. Dit hangt sterk af van de

gekozen technologie, de momenten wanneer de installatie operationeel is en de gebruikte brandstof. De plaats waar de installatie wordt gebouwd kan ook gevolgen hebben voor de luchtkwaliteit. Zo worden de klassieke elektriciteitscentrales meestal gebouwd in afgelegen gebieden en kunnen ze voorzien zijn van een uitrusting om stikstofoxide te verminderen (DENO<sub>x</sub>) en/of een uitrusting om de rookgassen te ontzwavelen (DESO<sub>x</sub>). WKK-installaties zijn daarentegen meestal gebouwd in de buurt van dicht bevolkte gebieden waardoor de vermindering van de lokale luchtkwaliteit een groter effect kan hebben. (COGEN, 2005)

Om voor een concrete warmtekrachtkoppeling meer zicht te krijgen op het potentieel voor emissievermindering heeft het U.S. Environmental Protection Agency een calculator (CHP Emissions Calculator) laten ontwikkelen die op basis van 29 parameters de emissies van CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> voor een specifieke warmtekrachtkoppeling berekent. Deze calculator vergelijkt vervolgens deze emissies met de emissies van een gescheiden productie van warmte en elektriciteit. Deze calculator (Microsoft Excel) kan worden gedownload op de website van het U.S. Environmental Protection Agency op het volgende webadres:

[http://www.epa.gov/chp/documents/chp\\_emissions\\_calc.xls](http://www.epa.gov/chp/documents/chp_emissions_calc.xls).

Voordat we naar de externe kosten overgaan is het interessant om te kijken naar het aandeel van de verschillende technologieën die gebruikt worden voor de elektriciteitsproductie in Vlaanderen. De onderstaande tabel geeft aan dat bijna de helft van de elektriciteitsproductie nucleair is. Hierna zijn het vooral de klassieke fossiele centrales (21%) en de STEG's (17%) die nog een groot aandeel hebben.

**Tabel 7: Aandeel van de verschillende technologieën in de totale elektriciteitsproductie voor Vlaanderen (VITO, 2005a)**

	1990	1995	2000	2002
nucleair	52 %	50 %	49 %	48 %
klassieke fossiele centrales	39 %	36 %	24 %	15 %
klassieke fossiele centrales met rookgasreiniging	nvt	nvt	nvt	6 %
klassieke gascentrales	8 %	5 %	4 %	4 %
STEG gascentrales	nvt	7 %	15 %	17 %
aardolie	0,12 %	0,10 %	0,02 %	0,09 %
WKK gas (turbine)	0,28 %	2 %	8 %	8 %
WKK gas (motor)	0,0 %	0,02 %	0,68 %	1,37 %
WKK olie	0,41 %	0,41 %	0,00030 %	0 %
afvalovens	0,09 %	0,10 %	0,46 %	0,55 %
biomassa	0,08 %	0,11 %	0,23 %	0,38 %
wind	0,02 %	0,02 %	0,03 %	0,12 %
PV	nvt	0,0001 %	0,0004 %	0,001 %
water	nvt	nvt	0,0025 %	0,01 %

nvt: niet van toepassing

In opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij (Milieurapport Vlaanderen, MIRA) analyseerde de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO, 2005a) de externe kosten van de productie van elektriciteit. Hiervoor heeft men de externe kosten berekend en geanalyseerd in de tijd voor de verschillende technologieën. De uitgevoerde berekeningen steunen op de ExternE (Externalities of Energy) methodologie. Deze methodologie werd ontwikkeld in opdracht van de Europese Commissie om de externe kosten van energieproductie te internaliseren en kwantificeert hierbij de marginale impact op de gezondheid en het leefmilieu door de bijkomende uitstoot van vervuilende stoffen van de bron tot aan de impact.

Het onderzoek van het VITO houdt met verscheidene externe kosten rekening: de impact van de uitstoot van  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , deeltjes en sommige metalen, en dit zowel tijdens de productie van elektriciteit als bij de constructie van de installaties. Ook worden de kosten van klimaatverandering ten gevolge van de uitstoot van  $\text{CO}_2$  bij de verbranding van fossiele brandstoffen in rekening gebracht. Aangezien er grote onzekerheid bestaat over de impact van klimaatverandering heeft men in deze studie een schaduwprijs<sup>2</sup> gehanteerd van 20 EUR/ton  $\text{CO}_2\text{-eq}$ . Dit cijfer is weliswaar onzeker en betwistbaar, maar het blijkt toch een nuttige indicator te zijn om publiek en beleid te informeren over de weerslag van keuzes rond brandstofketens en technologieën op broeikasgassen. Ook andere (kleinere) kosten zoals geluidshinder, beroepsongevallen en ongevallen bij de ontginning en transport van fossiele brandstoffen werden opgenomen in de analyse. Tabel 8 geeft de indicatieve marginale externe kosten weer (in EUR/MWh) die deze studie berekende voor de onderzochte technologieën.

Uit deze tabel kunnen we aflezen dat STEG centrales (17% aandeel in de elektriciteitsproductie) externe kosten veroorzaken van ongeveer 11 EUR/MWh. Hiermee vergeleken halen warmtekrachtkoppelinginstallaties met motoren een externe kost van ongeveer 19 EUR/MWh en warmtekrachtkoppelinginstallaties met de energetisch efficiëntere turbines een externe kost van ongeveer 8 EUR/MWh. In het licht van vermeden externe kosten wijst deze studie dus uit dat enkel warmtekrachtkoppelinginstallaties met turbines externe kosten kunnen vermijden in vergelijking met STEG centrales. De vermeden externe kosten bedragen hierbij ongeveer 3 EUR/MWh (met uitersten tussen 1,2 EUR/MWh en 4,43 EUR/MWh).

Vergelijken we warmtekrachtkoppelinginstallaties met klassieke steenkoolcentrales met rookgasreiniging (6% aandeel in de elektriciteitsproductie) dan zien we dat deze laatste een externe kost hebben van 32 EUR/MWh. Hiermee vergeleken is het besparingspotentieel van een warmtekrachtkoppeling veel groter dan in vergelijking met een STEG. In het geval van een warmtekrachtkoppeling met turbines bedragen de vermeden externe kosten ongeveer 24

---

<sup>2</sup> De schaduwprijs van een stof (bv.  $\text{CO}_2$ ) en voor een regio is de marginale kost om de vastgelegde emissiedoelstellingen voor deze stof voor die regio te behalen. Het weerspiegelt de reductiekosten die in die regio moeten gemaakt worden om de extra uitstoot van één eenheid van die stof te compenseren. (VITO, 2005)

EUR/MWh. Voor motoren ligt deze waarde wat lager maar bedraagt ze toch nog steeds ongeveer 13 EUR/MWh.

**Tabel 8: Externe kosten voor verschillende technologieën, kengetallen voor 2002 in EUR/MWh. (VITO, 2005a)**

	Productiefase				Risico op ernstige ongevallen	Levenscyclus	Totaal
	Impacts via SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> en deeltjes	Impacts via zware metalen	Impact via CO <sub>2</sub>	Andere impacts <sup>a</sup>		Brandstofketen en infrastructuur <sup>g</sup>	
Nucleair	0	nvt.	ng.	0,04	0,0235	0,73	0,8
Klassieke fossiele centrales (steenkool)	60 – 75 <sup>a</sup>	0,09	24	0,2	≤ 0,01	2,7	87 – 102
Klassieke fossiele centrales (steenkool) met rookgasreiniging	11	0,09	18	0,2		2,7	32
Gas STEG	0,6 – 2,1 <sup>b</sup>	nvt.	8 – 11	0,04		1,2	9,8 – 11,3
Gas klassiek	11 – 17	nvt.	12	0,06		1,8	25 – 31
Olie	126	nb.	16	nb.		5 – 8 <sup>h</sup>	147 – 150
WKK gas (turbine)	1,4	nvt.	4 – 6	0,04		1,2	6,6 – 8,6
WKK gas (motor)	12,6	nvt.	4 – 5	0,06		1,8	18,5 – 19,5
WKK olie	nb.	nb.	nb.	nb.		5 – 8 <sup>h</sup>	nb.
Afval	29	nb.	60 <sup>d</sup>	nb.		nvt.	43 – 53
Biomassa	11 – 60 <sup>e</sup>	nvt.	0	0,2 <sup>e</sup>		nb.	11 – 60
Wind	0	0	0	0 – 0,02	0,6 – 2,5	0,6 – 2,5	
PV	0	0	0	nb.	3 – 7,5	3 – 7,5	
Water	0	0	0	nb.	1 – 2,2	1 – 2,2	

nb.: niet beschikbaar

ng.: verwaarloosbaar

nvt: niet van toepassing

<sup>a</sup>: centrales op hoogovengas hebben lagere externe kosten (15 euro/MWh) en worden in de berekeningen voor de totale externe kosten bij deze groep gevoegd.

<sup>b</sup>: oudere stoom- en gascentrales hebben hogere externe kosten (8,7 euro/MWh) en worden in de berekeningen voor de totale externe kosten bij deze groep gevoegd.

<sup>c</sup>: bijstook in steenkoolcentrales. Emissiegegevens voor elektriciteitsproductie via stortgas ontbreken.

<sup>d</sup>: enkel afvalverwerking met energieproductie, en enkel niet-hernieuwbare fractie.

<sup>e</sup>: lawaaihinder, kleine beroepsrisico's, radioactieve straling, zonder ernstige ongevallen.

<sup>f</sup>: betreft ongevallen tijdens de productiefase voor nucleaire centrales en in de volledige levenscyclus voor de fossiele elektriciteitscentrales.

<sup>g</sup>: zonder ernstige ongevallen, wel met beroepsrisico's.

<sup>h</sup>: op basis van levenscycluscijfers van begin jaren 1990.

Wanneer we kijken naar de externe kosten van klassieke steenkoolcentrales zonder rookgasreiniging (15% aandeel in de elektriciteitsproductie) dan worden we geconfronteerd met zeer hoge waarden. De externe kosten liggen voor deze installaties tussen 87 en 102 EUR/MWh.

De vermeden externe kosten voor een turbine bedragen hier ongeveer 80 tot 90 EUR/MWh, voor motoren ligt deze waarde tussen 70 en 80 EUR/MWh.

In de onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de vermeden externe kosten bij vervanging van een technologie door een warmtekrachtkoppeling.

**Tabel 9: Vermeden externe kosten**

	Aandeel in de totale elektriciteitsproductie (2002)	Vermeden externe kosten (in EUR/MWh)	
		WKK turbine (gas)	WKK motor (gas)
STEG (gas)	17%	3	(-8)
Klassieke steenkoolcentrale zonder rookgasreiniging	15%	24	13
Klassieke steenkoolcentrale met rookgasreiniging	6%	80 tot 90	70 tot 80

Als we kijken naar de technologieën met nog lagere externe kosten dan een warmtekrachtkoppeling zijn dit vooral de hernieuwbare energiebronnen. Hun externe kosten zijn bijna volledig terug te brengen tot de productie van de installaties voor windturbines, fotovoltaïsche cellen of kleinschalige waterkrachtcentrales. Opmerkelijk is ook dat nucleaire energie volgens deze studie de allerlaagste externe kosten (0,8 EUR/MWh) heeft, ondanks de gezondheidsrisico's en de emissie van radioactieve stoffen. Dit wordt in de studie verklaard door het feit dat er zeer weinig uranium nodig is voor de productie van 1 MWh en dat tijdens de productie nagenoeg geen emissies vrijkomen. Ook het risico op ongevallen verhoogt de externe kosten niet veel volgens deze berekeningen. In termen van externe kosten lijkt nucleaire energie dus zeer interessant in deze studie. Uranium is echter geen hernieuwbare energiebron en belast dus toekomstige generaties met radioactief afval. Vanuit het perspectief van de transgenerationale solidariteit scoort nucleaire energie dus zeer slecht. Een grondige analyse van deze kosten is dan ook vereist.

Om de evolutie van de externe kosten doorheen de jaren te analyseren heeft men een gemiddelde marginale externe kost berekend op basis van het procentuele aandeel van elke technologie in de jaarlijkse productie. Deze waarde bedroeg in 1990 45 EUR/MWh en is geëvolueerd tot 19 EUR/MWh in 2002. Het rapport wijdt deze daling hoofdzakelijk toe aan de verminderde uitstoot van SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>. De drie belangrijkste factoren voor deze vermindering zijn de afbouw van steenkool ten voordele van STEG centrales, de opkomst van warmtekrachtkoppeling op aardgas en de installatie van rookgaszuivering in de steenkoolcentrale van Langerlo (Genk).

Om deze externe kosten te laten meetellen in het streven naar een maatschappelijk optimum, kan een overheid gebruik maken van twee alternatieven. Een eerste mogelijkheid is aan de hand van het principe 'de vervuiler betaalt'. De overheid heft bijvoorbeeld taksen op fossiele brandstoffen waarin de externe kosten van de verbranding van deze brandstoffen (gedeeltelijk) zijn opgenomen.

Nemen we als voorbeeld aardgas. We wensen een taks te heffen die net zo hoog is als de externe kosten van de verbranding van aardgas. Ter vereenvoudiging beperken we ons tot de uitstoot van CO<sub>2</sub>. Als externe kost voor de uitstoot van CO<sub>2</sub> hanteren we de waarde van 20 EUR/ton CO<sub>2</sub>. De CO<sub>2</sub>-emissiefactor van aardgas bedraagt 55,82 kton/PJ of dus 55,82 kg/GJ (Vlaams Agentschap Economie, 2008a).

Dit geeft de volgende externe kosten voor de CO<sub>2</sub> uitstoot van aardgas:

$$\begin{aligned} &= 20 \text{ EUR/ton}_{\text{CO}_2} \times 55,82 \text{ kton}_{\text{CO}_2}/\text{PJ}_{\text{gas}} \\ &= 20 \text{ EUR/ton}_{\text{CO}_2} \times 0,2010 \text{ ton}_{\text{CO}_2}/\text{MWh}_{\text{gas}} \\ &= 4,02 \text{ EUR/MWh}_{\text{gas}} \end{aligned}$$

De overheid zou dus een taks kunnen heffen op aardgas van 4,02 EUR/MWh om de externe kosten van CO<sub>2</sub> mee te betalen. Een vergelijking met de jaarlijkse gemiddelde eindprijs van aardgas voor gezinnen (voor 2006: 47 EUR/MWh) toont aan dat de externe kosten verbonden aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot 8,55% van deze eindprijs bedragen.

Een andere mogelijkheid is het subsidiëren van technologieën met lagere externe kosten om deze aantrekkelijker te maken. Zo wordt het gebruik ervan gepromoot. Zo bestaan er de groenestroomcertificaten voor de productie van elektriciteit uit zonne-energie of biomassa. De belangrijkste subsidiesteun die Vlaanderen toekent aan warmtekrachtkoppelinginstallaties zijn de warmtekrachtcertificaten. In het volgende hoofdstuk wordt dit uitgebreid behandeld.

## **4.2 Economische toekomstvisie**

Wanneer het aantal gebouwde en geïnstalleerde warmtekrachtkoppelinginstallaties met de tijd toeneemt, zullen de productiekosten voor deze installaties afnemen dankzij de opgebouwde kennis. Dit principe is gekend als de *leercurve*. Het idee achter deze curve is dat fabrikanten hun producten steeds goedkoper kunnen produceren dankzij de kennis en ervaring die ze opdoen naarmate ze meer produceren (Ritter & Schooler, 2002). Dit concept is als eerste ontdekt in 1936 op de Wright-Patterson Air Force Base in de Verenigde Staten. Hier werd

vastgesteld dat wanneer de totale vliegtuigproductie verdubbelde, de vereiste arbeidsuren daalden met 20 percent. De leercurve vertoont dus eerst een snelle daling van de (arbeid- en) productiekosten waarna deze daling meer en meer afneemt. De theorie van de leercurve is gebaseerd op de volgende drie veronderstellingen: (Chase et al, 2006)

1. De tijd die nodig is om een bepaald product te maken neemt steeds af wanneer er een volgend product gemaakt wordt.
2. De afname van de productietijd neemt af met een steeds kleiner wordende ratio.
3. De vermindering van de productietijd volgt een voorspelbaar patroon.

Theoretisch gezien volgt deze curve de volgende uitdrukking in Chase et al (2006):

$$Y_x = Kx^n$$

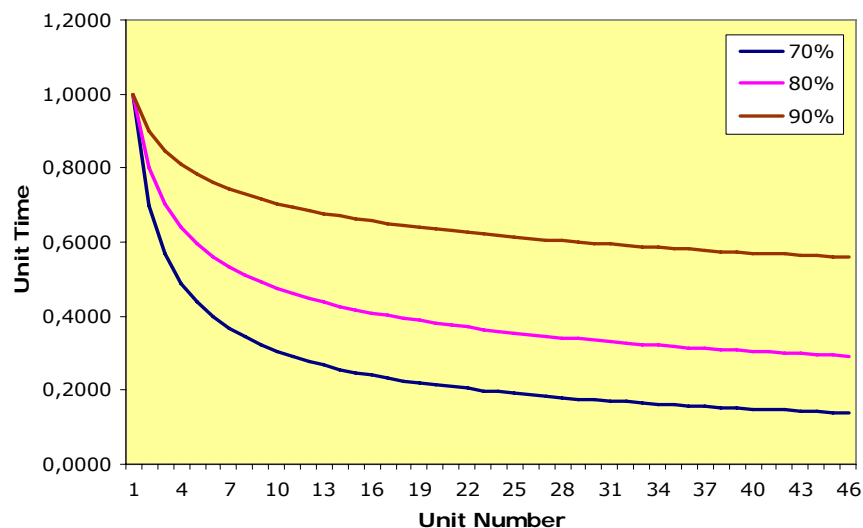
met  $x$  : eenheid nummer

$Y_x$  : het vereiste aantal arbeidsuren voor de productie van het x-te product

$K$  : het aantal vereiste arbeidsuren voor de productie van het eerste product

$$n = \frac{\ln b}{\ln 2} \text{ waarbij } b: \text{ leerpercentage}$$

De waardes die moeten worden toegewezen aan de verschillende parameters verschillende van product tot product en worden best vastgelegd door middel van empirisch onderzoek. De volgende figuur tracht dan ook enkel het conceptuele model weer te geven. Een hoger leerpercentage laat de tijd en kosten sneller dalen dan een lager leerpercentage.



**Figuur 12: Indicatieve leercurves met verschillende leerpercentages**



Dit theoretische model kan dus een middel zijn om te veronderstellen dat de kosten voor warmtekrachtkoppeling kunnen dalen naarmate er meer van deze installaties worden geproduceerd. Zeker de recente en nieuwe technologieën zoals de microturbine en de brandstofcel (zie hoofdstuk 3) bieden hierbij veel perspectief aangezien deze zich nog 'links' op de curve bevinden en dus een groot potentieel hebben om de kosten te verminderen. Voor andere (relatief oudere) technologieën zoals motoren biedt de leercurve minder potentieel. Deze technologie wordt al in veel andere domeinen toegepast en bevindt zich dus 'rechts' op de curve. Vanuit dit model zou het dus het interessantst zijn om zoveel mogelijk in nieuwe technologieën voor warmtekrachtkoppeling te investeren om het economisch potentieel van warmtekrachtkoppeling in het algemeen te verbeteren.

Een opmerking die we hierbij moeten maken is dat er naast nieuwe en veelbelovende technologieën voor warmtekrachtkoppeling ook andere energietechnologieën zijn die zich op hetzelfde punt (links) van de leercurve bevinden. We denken hierbij aan allerlei technologieën gebaseerd op hernieuwbare energie zoals bijvoorbeeld de *plastic zonnecellen* waar onder meer het IMO (Instituut voor Materiaalonderzoek te Diepenbeek) onderzoek naar doet. Ook deze technologieën bieden potentieel in het grote energievraagstuk en vragen dus om gestimuleerd te worden. Deze bieden zelfs het voordeel dat stijgende fossiele brandstofprijzen hun economische rendabiliteit zeer sterk ten goede komt. Het energievraagstuk is echter geen 'of' vraagstuk maar een 'en' vraagstuk. Met de verschillende technologieën moeten we trachten een evenwicht te zoeken tussen ecologie en economie.

Naast de mogelijkheid om de kosten van warmtekrachtkoppelingen in de toekomst te laten dalen, kunnen ook de stijgende energieprijzen een positief effect hebben. Dit is weliswaar minder het geval voor de klassieke warmtekrachtkoppeling die op fossiele brandstof draait, maar wel voor de nieuwe, veelbelovende technologieën. Hierbij denken we dan aan technologieën zoals de brandstofcel die geen fossiele brandstof nodig hebben. De evolutie van de energieprijzen blijft echter moeilijk in te schatten waardoor er grote onzekerheid bestaat.

### **4.3 Transgenerationale solidariteit**

Bij alles wat de mens doet zou hij moeten rekening houden met de gevolgen van zijn acties voor zijn medemensen en voor de toekomstige generaties. Zeker met betrekking tot de energieproductie moeten we de (negatieve) gevolgen van onze manier van energie produceren voor de volgende generaties zo goed mogelijk inschatten en deze vervolgens zo goed mogelijk beperken.

Wanneer een onderneming of persoon de *externe kosten* (zie bovenstaande paragraaf) niet in rekening brengt, betekent dit dat deze externe kosten zullen worden gedragen door de huidige maatschappij en/of de toekomstige generaties. Het beste voorbeeld hiervan is *global warming*, veroorzaakt door de stijgende uitstoot van (vooral) CO<sub>2</sub> bij de verbranding van fossiele brandstoffen. De gevolgen van de huidige verbranding van fossiele brandstoffen zullen in de toekomst sterk toenemen. Met andere woorden, de manier waarop wij energie verbruiken heeft voor de toekomstige generaties grote gevolgen. Daarom moeten we dus alle mogelijkheden onderzoeken om de CO<sub>2</sub> uitstoot zo veel mogelijk te beperken of terug te dringen.

Niet enkel moeten we de toekomstige generaties een leefbare atmosfeer nalaten, we moeten hen ook een voldoende mate van comfort mogelijk maken. Fossiele brandstoffen zullen op middellange termijn nog steeds vereist zijn. Aangezien olie- en gasvoorraden eindig zijn, zijn besparingen dus noodzakelijk willen we de toekomstige generaties ook nog over fossiele brandstoffen laten beschikken. Zeker indien we er de evolutie van de wereldbevolking bij beschouwen. Volgens recente schattingen van de Verenigde Naties neemt de wereldbevolking toe met 40% in 2050. Er zullen dan naar schatting 9,1 miljard mensen op aarde zijn. Dit gegeven, samen met de steeds stijgende algemene welvaart (zeker in termen van consumptie) verhoogt de nood om ons energieverbruik te laten dalen. (De Standaard, 2005)

Uit gegevens van het MIRA blijkt dat, indien we de fossiele brandstoffen aan het huidige tempo blijven consumeren, we met de momenteel gekende en ontginbare oliereserves nog tot het jaar 2045 toekomen. De aardgasreserves zouden volstaan om nog 60 jaar aan het huidige tempo te consumeren en voor steen- en bruinkoolreserves is er nog een voorraad van 371 jaar. Deze waarden zijn af te lezen uit Tabel 10 waar er een overzicht wordt gegeven van de wereldvoorraden en reserves van fossiele en nucleaire brandstoffen.

**Tabel 10: Overzicht van de wereldvoorraden en aantal jaren van beschikbaarheid aan fossiele en nucleaire energiebronnen (MIRA, 2008)**

	reserves <sup>1</sup> 2005 (EJ)	voorraden <sup>2</sup> 2005 (EJ)	winning <sup>3</sup> 2005 (EJ)	beschikbaarheid reserves <sup>4</sup> (jaar)	beschikbaarheid voorraden <sup>4</sup> (jaar)
conventionele olie	6 755	3 430	163	41	21
niet-conventionele olie <sup>5</sup>	2 761	10 460			
aardgas	5 676	6 555	90	63	73
niet-conventioneel aardgas <sup>6</sup>	63	48 633			
harde steenkool	18 347	104 573	123	150	853
zachte bruinkool	2 062	10 184	9	224	1 107
uranium	799	5 304	17	47	314
thorium	908	964	402	2	2
<i>totaal</i>	<i>37 371</i>	<i>190 103</i>	<i>804</i>		

<sup>1</sup>Reserves zijn hoeveelheden niet-hernieuwbare energiebronnen die op dit ogenblik technologisch en economisch winbaar zijn.

<sup>2</sup>Voorraden zijn hoeveelheden niet-hernieuwbare energiebronnen waarvan geologen het bestaan weliswaar al hebben aangetoond, maar die nog niet technologisch en economisch winbaar zijn.

<sup>3</sup>Winning is de hoeveelheid die gewonnen werd in 2005.

<sup>4</sup>Beschikbaarheid: periode gedurende dewelke de reserves/voorraden nog beschikbaar zijn aan de huidige productiehoeveelheden.

<sup>5</sup>Niet-conventionele aardolie: aardolie die men niet kan winnen uit ondergrondse reservoirs door gebruik te maken van putten en/of aardolie die een aanvullende behandeling vereist om er 'kunstmatige ruwe aardolie' van te maken (bv. olieschalie, leierzanden, zeer ruwe aardolie).

<sup>6</sup>Niet-conventioneel aardgas: aardgas afkomstig van reservoirs die niet via normale technieken kunnen geëxploiteerd worden (bv. waterijs waarin aardgas zit gevangen).

Hierbij is het belangrijk om op te merken dat er een verschil bestaat tussen de reserves en voorraden van fossiele brandstoffen. *Reserves* zijn die hoeveelheden niet-hernieuwbare brandstoffen die op dit moment technologisch en economisch winbaar zijn. *Voorraden* zijn die hoeveelheden die wel geologisch geïdentificeerd zijn, maar nog niet technologisch of economisch winbaar zijn. (MIRA, 2008)

Gegeven de verwachte toename van de wereldbevolking is het meer dan waarschijnlijk dat de vraag naar (niet-hernieuwbare) energie toeneemt. Dit gecombineerd met een minder snel toenemend aanbod van fossiele brandstoffen zal leiden tot sterke prijsstijgingen. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid dat in de toekomst een deel van de voorraden wel economisch winbaar wordt en dus een reserve wordt die we kunnen aanspreken. In dit geval kan er bovenop de al eerder vermelde reserves nog tot 21 jaar aardolie, tot 73 jaar aardgas en tot 1960 jaar kolen worden gewonnen aan het tempo van 2005 onder de voorwaarde dat alle geologisch gekende voorraden benut worden. (MIRA, 2008)

Indien we warmte en elektriciteit integraal gebruiken, kan zoals eerder reeds gezien, een warmtekrachtkoppeling een primaire brandstofbesparing opleveren ten opzichte van een gescheiden productie (zie hoofdstuk 2). Er is ook nog een andere reden waarom een warmtekrachtkoppeling een brandstofbesparing oplevert: de installaties bevinden zich veel dichterbij de gebruiker dan een centrale elektriciteitscentrale. Warmtekrachtkoppeling-installaties kunnen dus de elektrische verliezen langs het transport- en distributienet van centraal opgewekte elektriciteit reduceren of bijna volledig elimineren. Deze verliezen kunnen 8 tot 10% van de elektrische energie aan de bron bedragen. (COGEN, 2005)

De vraag bij deze transgenerationele solidariteit is: 'Wat zijn we bereid hiervoor te betalen?'. Welke kosten is de gemeenschap bereid te dragen in de vorm van investeringen in (dure) duurzamere technologieën, verlies van comfort, quota's voor maximaal energieverbruik, beperkte emissierechten ... ? Het is investeren in een betere toekomst en warmtekrachtkoppeling kan hier zijn steentje bijdragen.

#### **4.4 *Technologisch multiplier effect***

België haalt waarschijnlijk de Kyoto normen niet en zal dus CO<sub>2</sub> rechten moeten aankopen van het buitenland. We zullen dus in feite 'zuiver lucht' aankopen. Met het geld dat we op die manier naar het buitenland zouden sturen kunnen we zelf dus geen investeringen doen. De vraag die we ons hierbij kunnen stellen is of het dus niet beter zou zijn om deze middelen te investeren in (nieuwe) warmtekrachtkoppelinginstallaties, die op dit ogenblik misschien niet rendabel zijn

maar wel een vermindering van de CO<sub>2</sub> uitstoot kunnen bewerkstelligen? Wanneer er meer geïnvesteerd wordt in warmtekrachtkoppeling zal dit ook een stimulans zijn voor andere technologieën die zich op die manier (sneller) gaan of kunnen ontwikkelen. Op die manier werkt een technologisch multiplicator effect waarbij ook andere technologieën (niet noodzakelijk technologieën voor warmtekrachtkoppeling) kunnen profiteren van de gemaakte kosten voor warmtekrachtkoppeling.

#### **4.5 Economisch multiplicator effect**

Naarmate er dus meer in WKK geïnvesteerd wordt, zal dit ervoor zorgen dat de economische activiteit in deze sector toeneemt. Hierdoor zal er meer werk en meer inkomen zijn. Zo kan de technologische evolutie ervoor zorgen dat warmtekrachtkoppelingen bijvoorbeeld een grotere brandstofflexibiliteit bereiken, waardoor nieuwe mogelijkheden ontstaan voor het gebruik van een aantal alternatieve brandstoffen zoals bijvoorbeeld gemeentelijk afval, biomassa, synthetische vloeibare of gasvormige brandstoffen. Deze kansen kunnen door lokale autoriteiten zoals bijvoorbeeld gemeenten of door privé-investeerders gegrepen worden waardoor er extra economische activiteit wordt gecreëerd.

Er kan ook op een indirecte manier economische activiteit bijkomen dankzij het gebruik van warmtekrachtkoppeling. Zo zullen ook bedrijven ontstaan die als tussenschakel opereren tussen producent en koper om op die manier een breder aanbod aan te kunnen bieden aan de klant. Voor de klant biedt dit het voordeel dat ze een op maat gemaakt pakket kan aanschaffen dat aangepast is aan haar specifieke behoeften. Deze nieuwe bedrijven kunnen naast verkoop ook enkele andere diensten gaan aanbieden zoals onderhoud en herstellingen.

#### **4.6 Sociaal multiplicatoreffect effect**

Naast de hiervoor genoemde effecten biedt het gebruik van warmtekrachtkoppeling ook een sociaal multiplicator effect als werkverschaffer. Zoals werd aangehaald in paragraaf 4.5 kan investeren in warmtekrachtkoppeling tot gevolg hebben dat er direct en indirect extra economische activiteit wordt gecreëerd. Deze bijkomende economische activiteit betekent dat er bijkomende banen worden gecreëerd. Deze nieuwe banen verhogen niet alleen de maatschappelijke welvaart door het creëren van nieuwe banen, maar bieden ook meer personen arbeidsvreugde. Hierdoor neemt het maatschappelijk welzijn toe.

#### **4.7 Sociaal effect**

De huidige grote elektriciteitscentrales zijn meestal gelegen in afgelegen gebieden. Dit zorgt ervoor dat veel personeel voor de bouw en werking van de installatie lange afstanden moet afleggen van hun woning tot hun plaats van tewerkstelling. Naast de extra vervuiling die deze dagelijkse verplaatsing met zich meebrengt, neemt dit ook behoorlijk wat tijd in beslag. Door de warmtekrachtkoppelingen dichterbij meer verstedelijkte gebieden te bouwen, verminderen deze de vervuiling van het pendelen door de kortere verplaatsing van het personeel tussen hun thuis en hun werk. Ook zal deze kortere verplaatsing minder tijd in beslag nemen zodat het personeel over meer vrije tijd beschikt. Dit verhoogt dus zijn of haar 'geluk' en verbetert dus mede de maatschappelijke welvaart.

Het installeren van een warmtekrachtkoppelinginstallatie is een kapitaalintensieve aangelegenheid. Wanneer een bedrijf beslist over de implementatie ervan, betekent dit dus dat zij een beslissing neemt met een impact op langere termijn. Wordt er vervolgens een warmtekrachtkoppeling geplaatst, dan betekent dit voor het personeel een positief signaal. Het bedrijf is met andere woorden dus van plan om nog minstens tien jaar zijn bedrijf op de huidige locatie open te houden. Het implementeren van een warmtekrachtkoppeling biedt dus enige garantie voor het personeel op werkzekerheid in de nabije toekomst. En deze werkzekerheid maakt het personeel gelukkiger.

#### **4.8 Voordelen voor nutsbedrijven**

De nutsbedrijven moeten regelmatig nieuwe installaties bouwen. Dit doen ze om hun huidige capaciteit te vervangen of om nieuwe capaciteit te creëren om op die manier aan de gestegen vraag te voldoen. Wanneer men in deze gevallen kiest voor warmtekrachtkoppeling kan dit economische besparingen opleveren. Er zijn hiervoor een aantal redenen aan te halen. Zo voegen warmtekrachtkoppelinginstallaties ten eerste bijkomende capaciteit toe en verminderen ze dus de nood aan investeringen in de centrale installaties. Een tweede reden is dat ze een betere verzekering bieden tegen schommelingen in de elektriciteitsvraag dan het overdimensioneren van de klassieke elektriciteitscentrales. Dit doordat hun relatief kleine omvang en hun kortere constructietijd meer flexibiliteit biedt dan grote basislast elektriciteitscentrales om te voldoen aan deze vraagveranderingen. Een derde reden is de lagere intrestkosten gedurende de bouw van de installatie en dus ook een lagere totale kost van de installatie aangezien een warmtekrachtkoppeling een veel kortere constructietijd heeft dan grote klassieke installaties. (COGEN, 2005)

We moeten hierbij ook enkele bemerkingen maken. Warmtekrachtkoppelinginstallaties die in parallel werken en verbonden zijn met het net verhogen de betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening, maar kunnen ook een negatief effect hebben op de stabiliteit van het net als ze niet behoorlijk verbonden zijn. Goede afspraken hierover met de netbeheerder zijn hier dus noodzakelijk. De WKK-crisis in Nederland van het afgelopen half jaar heeft dit aangetoond. Alle nieuwe aanvragen voor de aansluiting van WKK's aan het net worden geweigerd omdat het elektriciteitsnet hun stroom niet meer kon slikken (COGEN, 2008c). Een oplossing hiervoor in de toekomst kan 'Smart Cogeneration' zijn. Dit betekent dat de warmtekrachtkoppelingen geïntegreerd worden in een complexe energievoorziening waarbij een goede (centrale) sturing (bv via internet) van alle installaties noodzakelijk is.

Een tweede opmerking hierbij is dat de implementatie van grote industriële warmtekrachtkoppelinginstallaties toch een negatief economische effect kan hebben voor de nutsbedrijven. Dit kan gebeuren wanneer het nutsbedrijf een overcapaciteit heeft of al reeds grote bouwprojecten in uitvoering heeft. Wanneer er dan grote industriële afnemers uit hun portefeuille verdwijnen, zal het nutsbedrijf haar vaste kosten aan een lagere productie moeten aanrekenen. Dit effect heeft dus vooral een invloed op korte termijn. Op langere termijn kunnen er afspraken gemaakt worden en kan het nutsbedrijf afzien van nieuwe installaties zodat het voor haar wel economisch voordelig wordt.

Een oplossing voor de hierboven genoemde opmerking is dat de nutsbedrijven zelf de warmtekrachtkoppelinginstallaties bezitten en uitbaten. Op deze manier dragen de nutsbedrijven ook de kosten van transportverliezen niet meer. In een aantal gevallen wordt dit ook in Vlaanderen toegepast.

#### **4.9 Netontlasting**

Door meer warmtekrachtkoppelinginstallaties te installeren wordt er meer en meer overgegaan tot een decentrale (lokale) energieproductie. Dit zorgt ervoor dat het elektriciteitsnet ontlast wordt. Hierdoor kan dan de algemene kost van het elektriciteitsnet verminderd worden. Hierbij kan men bovendien argumenteren dat decentrale energieproductie zorgt voor meer concurrentie op de energiemarkt en ook zorgt voor minder afhankelijkheid van de macht van de grootschalige centrale energieopwekking. Ook in het kader van de liberalisering en de internationale handel in elektriciteit kan warmtekrachtkoppeling van belang zijn bij plaatselijke tekorten. Zo zou men ervoor kunnen opteren dat de WKK's tijdelijk minder stroom aan het net leveren zodat er capaciteit kan vrijkomen op het net om elektriciteit naar het plaatselijk tekort te transporteren.

## 5 Methoden voor de overheid om het gebruik van warmtekrachtkoppeling aan te moedigen

De overheden op verschillende niveaus beschikken over diverse methoden om het gebruik van warmtekrachtkoppeling aan te moedigen. Deze maatregelen kunnen worden opgesomd in 'stijgende graad van overheidstussenkomst':

1. Een eerste mogelijkheid is de potentiële gebruikers *informer*en. De overheid kan deze taak dan financieren. Hierbij denken we aan de financiering voor COGEN Vlaanderen, dat instaat voor de promotie van warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen.
2. Een tweede mogelijkheid waarover een overheid beschikt, is het financieel steunen van *onderzoek en ontwikkeling* in de diverse technologieën.
3. Een derde mogelijkheid is het invoeren van een systeem van *benchmarking* met betrekking tot het energieverbruik (voor diverse toepassingen).
4. Een vierde mogelijkheid is het opstellen van *wettelijke verplichtingen* met betrekking tot de energieproductie. Hier situeert zich onder meer de warmtekrachtcertificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers.
5. Een vijfde mogelijkheid waarover een overheid beschikt is het implementeren van een systeem dat voorziet in directe *financiële stimulansen*. Deze stimulansen kunnen in twee groepen worden opgesplitst, namelijk investeringsstimulansen en uitbatingstimulansen.

### 5.1 Informatie verstrekken

Het is het objectief van de Vlaamse Overheid om tegen het jaar 2010 25% van de elektriciteitsleveringen milieuvriendelijk op te wekken. Het gebruik van warmtekrachtkoppelinginstallaties moet hierbij instaan voor 19% (6% moet worden gerealiseerd door het gebruik van hernieuwbare energie). Om dit te realiseren heeft de Vlaamse Overheid gevraagd om een organisatie op te richten om de implementatie van warmtekrachtkoppeling te promoten, namelijk COGEN Vlaanderen.

COGEN Vlaanderen is een onafhankelijke vzw die instaat voor de promotie van warmtekrachtkoppeling als middel om de CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen en zo bij te dragen aan de doelstelling van de Vlaamse Overheid. Samen met Electrabel en Distrigas kent de Vlaamse Overheid financiële steun toe aan deze organisatie. COGEN Vlaanderen kent 37 stichtende leden, zowel bedrijven als privé personen: fabrikanten, energiebedrijven, installateurs,

studiebureaus, wetenschappelijke instellingen en gebruikers. In het jaar 2007 kende de organisatie in totaal 174 leden, waaronder ook de UHasselt. COGEN Vlaanderen werkt dan nauw samen met de overheid en de belangrijke spelers op de markt voor warmtekrachtkoppeling. Naast haar informatietaak moedigt ze realistische, technisch en economisch verantwoorde projecten aan die een belangrijke milieu-impact hebben. (Energiesparen, 2008a; COGEN, 2008b)

De strategie en objectieven van COGEN Vlaanderen zijn terug te vinden op hun website (2008b) en betreft de onder meer de volgende aspecten:

1. Bewustmaking en vorming van technici en beslissers over WKK;
2. Publicaties over de verschillende deelaspecten van WKK, in de vorm van o.a. een nieuwsbrief, wegwijzer, dossiers. Daarnaast ook organisatie van studiedagen, congres en opleiding;
3. Preferentiële gesprekspartner van de overheid inzake beleidsondersteunend advies;
4. Streven naar gelijkberechtiging van WKK en hernieuwbare energieën, per eenheid uitgespaarde CO<sub>2</sub>;
5. Streven naar en aanmoedigen van technologieën en toepassingen die ook op lange termijn technisch-economisch waardevol blijven, los van schommelingen van de primaire energie- en elektriciteitsmarkt;
6. (Starters)advies aan gebruikers en eigenaars van WKK-systemen;

## **5.2 Financiële steun voor onderzoek en ontwikkeling**

Naast de reeds genoemde initiatieven die de overheden (kunnen) nemen, bestaat er ook nog de mogelijkheid om het onderzoek en de ontwikkeling van warmtekrachttechnologie te steunen met overheidsmiddelen. Maar aangezien dit geen directe meetbare resultaten kan geven, is dit voor de overheid geen aantrekkelijke maatregel. Ook zou deze overheidssteun eerder aan bijvoorbeeld universiteiten moeten worden toegekend dan aan bedrijven, gezien de strenge regels omtrent overheidssteun in het kader van eerlijke concurrentie.

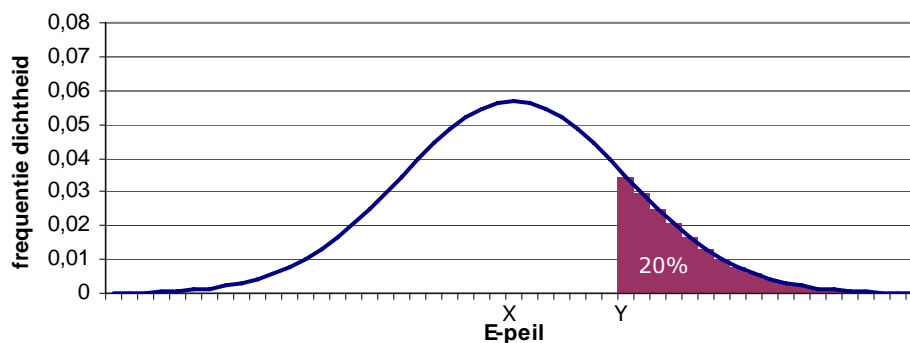
## **5.3 Benchmarking**

Algemeen gesproken is benchmarking een techniek om de eigen prestaties continu te vergelijken met die van andere deelnemers. Indien de eigen prestaties niet voldoende zijn, kan men door het toepassen van nieuwe processen, technieken of producten de eigen prestaties



verbeteren. In de industrie kan dit relatief gemakkelijk worden toegepast op het energieverbruik. Zo kan men voor de papierindustrie bijvoorbeeld het verbruik uitdrukken in ton CO<sub>2</sub> per ton papier. We bespreken hieronder het concept van benchmarking, toegepast op het energieverbruik van appartementsgebouwen.

De aandacht kan hierbij uitgaan naar de meetbare factor 'E-peil'. Het E-peil is een maat voor het energieverbruik in standaardomstandigheden. Het E-peil houdt onder andere rekening met de thermische isolatie en de installaties voor verwarming en warm water. De huidige norm is 100 en een lager E-peil betekent een lager energieverbruik. Wanneer er inventaris zou worden gemaakt van deze factor in appartementsgebouwen en we vervolgens de scores gaan uitzetten in een frequentieverdeling, kunnen we verwachten dat deze verdeling de normale verdeling benadert. Dit concept wordt in de volgende figuur weergegeven.



**Figuur 13: Frequentieverdeling E-peil**

Wanneer we hierop benchmarking toepassen kunnen we proberen om bijvoorbeeld de 20% slechts scorende gebouwen met een E-peil van meer dan Y (gekleurd gebied) te verplichten om aan het gemiddelde van X te voldoen. Deze inventaris zou dan elke 5 jaar opnieuw kunnen worden opgesteld om zo een nieuwe Y waarde te berekenen waaraan minimum moet voldaan worden. Op die manier verkrijgen we dan ook een continue (haalbare) verbetering van het E-peil.

Het voordeel van een benchmarking benadering in vergelijking met het opleggen van een 'norm' is duidelijk. Een norm is moeilijker te bepalen en kan veel kritiek uitlokken omtrent de haalbaarheid ervan. Ook de impact ervan is moeilijk in te schatten. Een benchmark daarentegen verbetert steeds de minst goed scorende gebouwen tot een niveau dat bewezen is haalbaar te zijn.

## 5.4 Wettelijke verplichtingen

### 5.4.1 Warmtekrachtcertificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers

Om het gebruik van warmtekrachtkoppeling te stimuleren bestaat er voor elektriciteitsleveranciers een *warmtekrachtcertificatenverplichting* in Vlaanderen. Deze verplichting voor leveranciers, om een minimum aandeel elektriciteit uit kwalitatieve warmtekrachtkoppeling te leveren aan zijn afnemers, geldt sinds 2005. Ze heeft als doel een bepaalde hoeveelheid primaire energie te besparen om zo bij te dragen aan de vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot in Vlaanderen.

Jaarlijks moeten elektriciteitsleveranciers een bepaald aantal certificaten inleveren bij de VREG (Vlaamse reguleringsinstantie voor de elektriciteits- en gasmarkt) als bewijs voor dit verplicht minimum aandeel. Ze moeten dit doen vóór 31 maart van het daaropvolgende jaar. Indien een leverancier te weinig certificaten indient bij de VREG, zal zij een *administratieve* boete moeten betalen van 45 EUR voor elk ontbrekend warmtekrachtcertificaat. Het aantal certificaten dat een leverancier moet inleveren wordt bepaald aan de hand van de volgende formule: (VREG, 2008a)

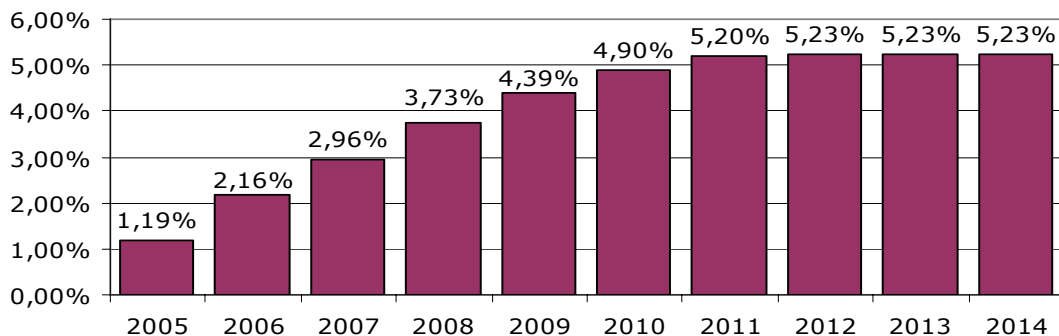
$$C = G \times E_v$$

met C: het aantal in te leveren certificaten

G: de minimumquota's

E<sub>v</sub>: de totale hoeveelheid elektriciteit (in MWh) geleverd in het beschouwde jaar

De minimumquota's die de elektriciteitsleveranciers sinds 2005 moeten voorleggen stijgen elk jaar. In 2005 bedroeg dit minimum aandeel slecht 1,19% van de totale hoeveelheid geleverde elektriciteit. Voor het jaar 2008 bedraagt deze quota 3,73% en vanaf 2012 bedraagt ze 5,23%.



**Figuur 14: Evolutie van het minimum aandeel elektriciteit uit kwalitatieve warmtekrachtkoppeling voor elektriciteitsleveranciers (VREG, 2008a)**

Indien de leverancier ook producent is kan zij deze certificaten zelf aanvragen bij de VREG. In het andere geval kan een leverancier deze certificaten aankopen bij de producenten op de certificatenmarkt. De prijs voor deze certificaten wordt bepaald door het marktmechanisme. Voor de producenten van elektriciteit uit een kwalitatieve warmtekrachtkoppeling bieden deze verkoopbare certificaten dus een financiële stimulans of subsidie. Dit 'producenten' gedeelte wordt verderop in het hoofdstuk uitgebreid besproken.

#### **5.4.2 Verplicht haalbaarheidsonderzoek voor warmtekrachtkoppeling bij gebouwen groter dan 1000 m<sup>2</sup>**

De Vlaamse Regering gaf in november 2007 haar definitieve goedkeuring aan het besluit 'voor de invoering van de haalbaarheidsstudie voor alternatieve energiesystemen'. Het besluit voorziet in een verplichte haalbaarheidsstudie voor hernieuwbare energietoepassingen en warmtekrachtkoppeling voor gebouwen groter dan 1000 m<sup>2</sup>. (Energiesparen, 2008b)

De bedoeling van deze verplichting is vooral het informeren van de bouwheren over de mogelijke technieken, de verkrijgbare subsidies en de haalbaarheid van hernieuwbare energietoepassingen en warmtekrachtkoppeling. De gebouwen voor welke men een verplicht haalbaarheidsonderzoek moet laten uitvoeren hebben de volgende kenmerken:

- De gebouwen hebben een vloeroppervlakte groter dan 1000 m<sup>2</sup>;
- De stedenbouwkundige vergunning is aangevraagd na 31 januari 2008;
- Het gebouw (of het betreffende gedeelte) wordt verwarmd om een specifieke binnentemperatuur te bekomen ten behoeve van mensen.

De technologieën die onderzocht moeten worden hangen af van de gebouwbestemming en de bruikbare vloeroppervlakte. Ze zijn opgenomen in Bijlage I van het Ministerieel Besluit van 11 januari 2008. Ze zijn zodanig geselecteerd dat de kans op haalbaarheid vrij groot is. Met betrekking tot warmtekrachtkoppeling moet een haalbaarheidsstudie worden uitgevoerd indien de gebouwbestemming (hoofdbestemming) één van de volgende negen types is:

- |              |                    |                      |
|--------------|--------------------|----------------------|
| 1) Wonen     | 4) Industrie       | 7) Handel            |
| 2) Kantoor   | 5) Gezondheidszorg | 8) Bijeenkomstgebouw |
| 3) Onderwijs | 6) Sport           | 9) Horeca            |

Stads- en/of blokverwarming of -koeling moet voor deze types gebouwen enkel onderzocht worden indien ze worden opgericht binnen de zones die zijn aangegeven door het Vlaams Energieagentschap.

## 5.5 Financiële stimulansen

Net zoals in andere landen wordt in België het gebruik van een warmtekrachtkoppeling financieel gestimuleerd. Deze steun is tweeledig. Enerzijds is er investeringssteun, die éénmalig wordt toegekend en proportioneel is met de grootte van de investering. Anderzijds is er uitbatingsteun die over een langere termijn loopt en evenredig is met de (energetische) prestaties van de installatie.

In België bestaan verschillende *investeringsubsidies*. Daarnaast verschilt de steun ook van regio tot regio, aangezien warmtekrachtkoppeling onder de regionale bevoegdheden valt. Hierna worden de volgende drie investeringsubsidiesystemen beschreven die gelden voor investeringen in Vlaanderen: de verhoogde investeringsaftrek (federaal), de ecologiepremie (Vlaanderen) en de steun aan demonstratieprojecten (Vlaanderen). Ook wordt de mogelijkheid voor steun aan particulieren toegelicht.

De *uitbatingsteun* in België bestaat uit een systeem van verhandelbare certificaten om het gebruik van onder meer warmtekrachtkoppeling te stimuleren. In totaal zijn er vier certificaten systemen operationeel. In Vlaanderen kent men twee systemen, namelijk:

- de *warmtekrachtcertificaten* (WKC), voor primaire energiebesparing met een kwalitatieve warmtekrachtkoppeling
- en de *groenestroomcertificaten* (GSC), voor de elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen

In Wallonië zijn er groene certificaten voor zowel hernieuwbare energie als voor warmtekrachtkoppeling. Ook in Brussel is er een systeem met groene certificaten voor zowel hernieuwbare energie als voor warmtekrachtkoppeling. Deze systemen zijn in grote lijnen gelijk, al zijn er ook belangrijke verschillen.

### 5.5.1 De verhoogde investeringsaftrek

De *verhoogde investeringsaftrek* betreft een Federale fiscale stimulans voor energiebesparende investeringen zoals een warmtekrachtkoppeling (categorie 7). Om in aanmerking te komen moeten de gemiddelde rendementen van elektriciteit ( $\eta_e$ ) en warmte ( $\eta_q$ ) gelijktijdig voldoen aan de volgende drie voorwaarden:

$$\eta_e + \frac{2}{3}\eta_q \geq 50\% \quad \text{en} \quad \frac{\eta_e}{\eta_e + \eta_q} \geq 25\% \quad \text{en} \quad \frac{\eta_q}{\eta_e + \eta_q} \geq 25\%$$

Bedrijven kunnen een gedeelte van hun bedrijfswinst vrijstellen van belastingen met de verhoogde investeringsaftrek. Dit bedrag is gelijk aan een percentage van de energiebesparende investering. Voor investeringen in het jaar 2007 (aanslagjaar 2008) kan men aanspraak maken op een verhoogd percentage van 13,5% (= basisaftrek van 3,5% plus verhoogde aftrek van 10%). Rekening houdend met een belastingsvoet van 33,99% voor vennootschappen levert dit voor 2007 een totale investeringsaftrek op van 4,59% van de totale investeringskost.

	Investeringsjaar	
	2006	2007
Verhoogde investeringsaftrek	14,5%	13,5%
Vennootschapsbelasting	33,99%	33,99%
<b>Totale verhoogde investeringsaftrek</b>	<b>4,93%</b>	<b>4,59%</b>

Voor investeringen in het jaar 2006 (aanslagjaar 2007) bedroeg het percentage van de verhoogde investeringsaftrek nog 14,5%. De basisaftrek is gekoppeld aan het indexcijfer van de consumptieprijzen. Deze steunmaatregel geldt wel enkel voor nieuwe investeringen en wordt in principe éénmalig verleend, al bestaat de mogelijkheid om deze te spreiden.

### 5.5.2 De ecologiepremie

De *ecologiepremie* is een premie die wordt gegeven door de Vlaamse Overheid. Deze premie heeft tot doel duurzame investeringen te stimuleren en bedrijven aan te moedigen om een bijdrage te leveren aan de Kyoto doelstellingen. Deze premie geldt in het Vlaamse Gewest voor ondernemingen die investeren in milieu en energie, zoals bijvoorbeeld in warmtekrachtkoppeling en duurzame energie.

Vanwege het succes van de ecologiepremie heeft de vraag naar steun het beschikbare budget in het verleden ruimschoots overtroffen. Daarom heeft de Vlaamse Overheid in mei 2007 beslist om het systeem van ecologiepremies te organiseren via een gesloten budgetsysteem en een oproep met een wedstrijdformule. Bedrijven die in aanmerking wensen te komen voor deze steun, kunnen driejaarlijks hun project indienen (= 'call'). Hun project wordt dan beoordeeld, krijgt een score en wordt vervolgens gerangschikt. Deze score houdt rekening met de bijdrage van de technologie tot de Kyoto-doelstellingen of het Vlaamse milieubeleidsplan en ook met enkele aanvullende criteria. Uiteindelijk wordt het beschikbare budget voor de ecologiepremie verdeeld over de meest gunstig gerangschikte investeringsprojecten totdat het budget voor deze premie is opgebruikt. Ondernemingen zijn dus afhankelijk van de aanvragen van andere bedrijven. (Vlaamse Overheid, 2007)

De technologieën die in aanmerking komen voor de ecologiesteun staan vermeld op een limitatieve technologieënlijst (LTL), samen met het percentage van de investering dat in aanmerking komt voor deze steun. Bij de berekening van de subsidie wordt enkel gekeken naar de extra (gestandaardiseerde) investeringen die noodzakelijk zijn om de milieudoelstellingen te verwezenlijken. Voor elke technologie zijn deze meerkosten terug te vinden op de LTL. Voor de call van 4/1/2008 tot en met 30/4/2008 bedraagt de subsidiabele meerkost voor een (klassieke) warmtekrachtkoppeling 30% van de totale investeringskost. Een hoger percentage (50%) kan men bekomen voor een warmtekrachtkoppeling op biomassa. Op dit gedeelte dat in aanmerking komt kunnen grote ondernemingen een premie krijgen van 10% (was vroeger 25%). Kleine en middelgrote ondernemingen (KMO's) kunnen een hogere premie krijgen, namelijk 20% (was vroeger 35%).

		Grote ondernemingen	KMO's
Premie :		10 %	20 %
Meerkosten		<b>Totale ecologiepremie</b>	
- Klassieke WKK :	30 %	<b>3 %</b>	<b>6 %</b>
- WKK op biomassa :	50 %	<b>5 %</b>	<b>10 %</b>

De uiteindelijke ecologiepremie (indien toegewezen) voor een (klassieke) warmtekrachtkoppeling bedraagt dus 3% voor grote ondernemingen en 6% voor kleine en middelgrote ondernemingen. Voor een warmtekrachtkoppeling op biomassa zijn deze percentages 5%, respectievelijk 10%. De totale premie is beperkt tot een maximum van 1,5 miljoen EUR. (Vlaams Agentschap Economie, 2008b)

### 5.5.3 Steun voor demonstratieprojecten

Naast de hiervoor genoemde investeringssubsidies bestaat er ook *steun voor demonstratieprojecten* in Vlaanderen. Deze steun kent de Vlaamse Overheid toe aan projecten die nieuwe technieken voor energiebesparing of milieuvriendelijke energieproductie toepassen. Deze subsidie van 50%, met een maximum van 250 000 EUR, geldt enkel voor het innoverende deel van de nieuwe technologie. Deze technologie moet tevens een nieuwe toepassing vertegenwoordigen in een bepaalde sector of in Vlaanderen.

Enkele prioriteiten voor het jaar 2008 (Energiesparen, 2008d) zijn de volgende:

- Warmtekrachtkoppeling in de glastuinbouw, met biogas ontstaan uit de vergisting van selectief ingezamelde organische stromen (dus geen stortgas), waarbij eventueel gebruik gemaakt wordt van een microturbine;
- Microwarmtekrachtkoppeling < 50 kW voor de toepassing op residentiële schaal (in woonwijken of appartementsblokken);

- Elektriciteitsproductie met toepassing van de Organische Rankine Cyclus (ORC) (alle sectoren, met uitzondering van afvalverwerking);
- Hogetemperatuuropslag met restwarmte/WKK/zonne-energie.

Naast de opgesomde maatregelen voor bedrijven is er ook overheidssteun voor particulieren. Wanneer een oude stookketel vervangen wordt door een microwarmtekrachtkoppeling, krijgt een privé persoon een fiscaal voordeel. Deze moet dan wel geïnstalleerd zijn door een geregistreerd aannemer. Voor het inkomstenjaar 2008 (aanslagjaar 2009) komt 40% van de investering in aanmerking voor belastingvermindering. Het belastingvoordeel heeft een maximum van 2650 EUR per woning voor het beschouwde inkomstenjaar. (Energiesparen, 2008e)

#### 5.5.4 Warmtekrachtcertificaten (WKC)

Het Vlaams certificatenstelsel voor warmtekrachtkoppeling is gebaseerd op het feit dat warmte en elektriciteit geproduceerd wordt op een energiezuinigere manier dan een gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit dit kan doen. Het is dan ook deze primaire energiebesparing die aan de basis ligt voor de toekenning van warmtekrachtcertificaten.

##### 5.5.4.1 Aantal toegekende certificaten

Voordat men kan berekenen hoeveel WKC een bepaalde installatie kan verkrijgen, moet eerst de absolute primaire energiebesparing worden berekend. Om deze primaire energiebesparing (PEB) te berekenen moet volgende formule gehanteerd worden:

$$PEB = E \cdot \left( \frac{1}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\alpha_e \cdot \eta_q} - \frac{1}{\alpha_e} \right)$$

met  $E$ : de binnen de beschouwde periode (maand) door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh)

$\alpha_e$ : het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie

$\alpha_q$ : het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie

$\eta_e$ : het elektrisch rendement van de referentiecentrale (Vlaanderen)

$\eta_q$ : het thermisch rendement van de referentieketel (Vlaanderen)

Per gerealiseerde MWh primaire energiebesparing verkrijgt men dan één certificaat. De VREG (Vlaamse reguleringsinstantie voor de elektriciteits- en gasmarkt) kent dan maandelijks deze certificaten toe op basis van de gerealiseerde primaire energiebesparing in de voorbije maand.

De waardes voor het elektrisch en thermisch rendement van de warmtekrachtkoppeling moeten worden bepaald na meting van de output en de verbruikte brandstof. Enkel bij installaties met een nominaal elektrisch vermogen dat kleiner is dan 200kW mogen de ontwerpreeksrendementen worden gebruikt.

Om de primaire brandstofbesparing te kunnen berekenen wordt er bij een gescheiden productie uitgegaan van de rendementen van referentie installaties. De Minister van Energie van de Vlaamse Regering heeft de bevoegdheid om, na advies van de VREG, deze referentierendementen aan te passen aan de stand van de technologie. Op dit ogenblik gelden de volgende referentierendementen:

**Tabel 11: Vlaamse referentierendementen (COGEN, 2008a)**

<b>Thermisch referentierendement</b>				
Toepassing	Hete lucht voor droogtoepassing	Warm water	Stoom en rest	COP koude
Algemeen	93,0%	90,0%	85,0%	500,0%
Biogas		70,0%		

<b>Elektrisch referentierendement</b>		
Nominale spanning elektriciteitsnet	≤ 15kV	>15 kV
Algemeen	50,0%	55,0%
Biogas		42,0%
Vloeibare biobrandstoffen		42,7%
Hout en houtafval		34,0%
Andere vaste biomassastromen		25,0%

#### 5.5.4.2 Voorwaarden

Een warmtekrachtkoppelinginstallatie moet aan de volgende drie voorwaarden voldoen om in aanmerking te komen voor warmtekrachtcertificaten:

- De installatie moet gelegen zijn in het Vlaamse Gewest.
- De installatie moet in dienst genomen zijn na 1 januari 2002 of sindsdien ingrijpend gewijzigd. Dit betekent dus dat steun via WKC enkel gericht is op nieuwe installaties.
- Het moet een kwalitatieve warmtekrachtkoppeling zijn.



Om het label 'kwalitatieve warmtekrachtkoppeling' te bekomen moet de installatie over de laatste 12 maanden, ten opzichte van de referentie-installaties voor gescheiden opwekking, gemiddeld een relatieve primaire energiebesparing (RPE) hebben gerealiseerd van:

- o minimaal 10 procent voor grote installaties (> 1MWe)
- o minimaal 0 procent voor kleinschalige installaties (< 1MWe)

De relatieve primaire energiebesparing wordt gedefinieerd zoals we in hoofdstuk 2 gezien hebben:

$$RPE = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_e}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\eta_q}}$$

met  $\alpha_e$  : het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie

$\alpha_q$  : het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie

$\eta_e$  : het elektrisch rendement van de referentiecentrale (Europa)

$\eta_q$  : het thermisch rendement van de referentieketel (Europa)

De in deze formule gehanteerde referentierendementen zijn niet de Vlaamse referentierendementen uit Tabel 11 maar zijn Europese referentierendementen. Deze waarden zijn functie van een aantal parameters. De Europese referentierendementen zijn vastgelegd in het Ministerieel Besluit van 6 oktober 2006.

#### 5.5.4.3 Degressief aantal warmtekrachtcertificaten

Het systeem van WKC is zo opgesteld dat het aantal WKC waar een installatie recht op heeft, degressief afneemt in de tijd. De eerste 4 jaar (48 maanden) dat de warmtekrachtkoppeling operationeel is, mogen alle certificaten worden ingediend. Na deze periode, dus vanaf maand 49, kan er slechts een fractie X van de certificaten bekomen worden. Deze fractie X is gebaseerd op de relatieve primaire energiebesparing. Hierbij kan een installatie die meer brandstof bespaart langer genieten van de WKC en zal deze ook meer steun krijgen (zie voorbeelden verder).

De fractie X wordt berekend met behulp van volgende formule:

$$X = \frac{RPE - 0,2 \cdot (T - 48)}{RPE}$$

met  $T$  : de tijd in maanden sinds de indienstname van de installatie  
 $RPE$  : de relatieve primaire energiebesparing

De gehanteerde formule voor de RPE uit bovenstaande formule (zie ook hoofdstuk 2) is de volgende:

$$RPE = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_e}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\eta_q}}$$

met  $\alpha_e$  : het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie  
 $\alpha_q$  : het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie  
 $\eta_e$  : het elektrisch rendement van de referentiecentrale (Vlaanderen)  
 $\eta_q$  : het thermisch rendement van de referentieketel (Vlaanderen)

Nota: De referentierendementen zijn de Vlaamse referentierendementen (Tabel 11)

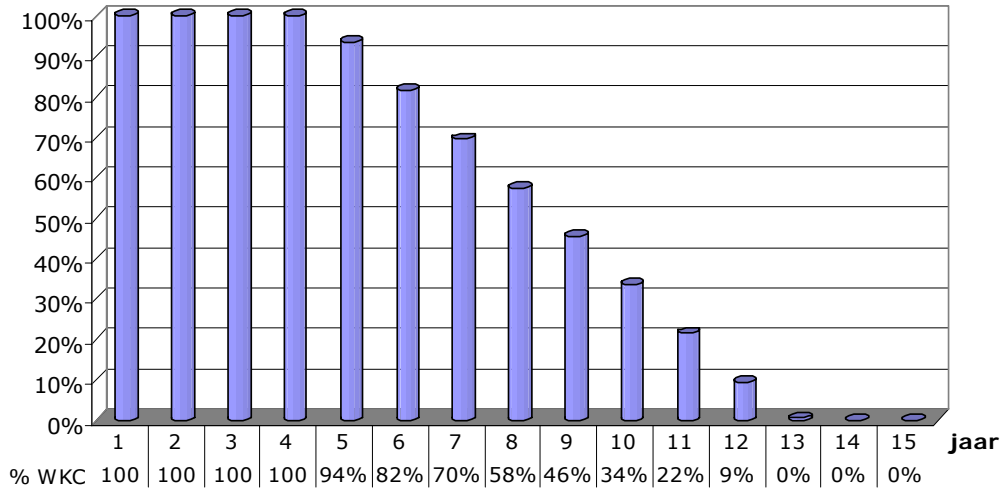
Om dit principe van de degressief dalende certificaten te verduidelijken werken we met enkele (theoretische) voorbeelden en bovenstaande formules. De beschouwde warmtekrachtkoppelinginstallaties voldoen aan de drie voorwaarden om in aanmerking te komen en we veronderstellen de volgende rendementen:

	$\alpha_e$	$\alpha_q$	RPE
Voorbeeld 1	35%	49,5%	20%
Voorbeeld 2	30%	46%	10%

Met deze waardes kunnen we nu hun invloed op het aantal certificaten in de tijd berekenen aan de hand van bovenstaande formules.

Voorbeeld 1:  $\alpha_e = 0,35$  en  $\alpha_q = 0,495$ . Dit geeft een RPE van 20%

Na uitwerking bekomen we het volgend degressief verloop van het aantal WKC:

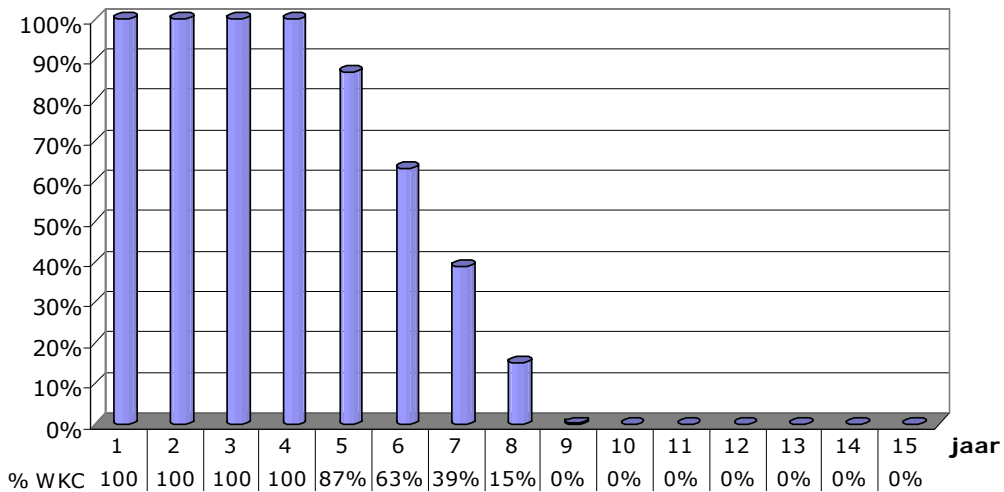


**Figuur 15: Verloop van het aantal WKC in de tijd, voorbeeld 1**

In dit voorbeeld zien we dat een RPE van 20% ervoor zorgt dat er 12 jaar kan genoten worden van WKC. Na 10 jaar heeft men zelfs nog altijd recht op 34% van de oorspronkelijk toegekende WKC.

Voorbeeld 2:  $\alpha_e = 0,30$  en  $\alpha_q = 0,46$ . Dit geeft RPE = 10%

Na het uitrekenen bekomen we het volgend degressief verloop van het aantal WKC:



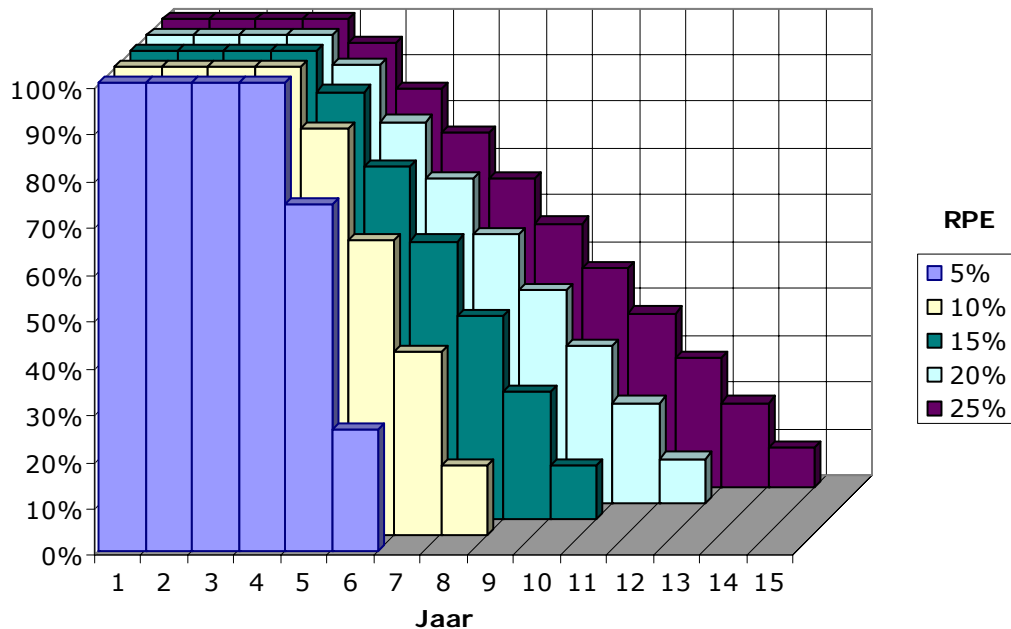
**Figuur 16: Verloop van het aantal WKC in de tijd, voorbeeld 2**

We zien nu dat een daling van de RPE tot 10% een drastische vermindering van de duurtijd van de WKC veroorzaakt. In dit voorbeeld heeft men maar 8 jaar recht op WKC, terwijl dit in het vorige voorbeeld 12 jaar was (RPE van 20%).

De twee voorgaande voorbeelden leren ons dus dat de totale toegekende certificaten (en dus ook de financiële steun) sterk afhangt van de RPE. De volgende figuur (Figuur 17) is dan ook uitgerekend en opgesteld om een globaal overzicht te krijgen van de invloed van de relatieve primaire energiebesparing (RPE) op:

- a) zowel de duurtijd van de certificaten,
- b) als op de hoogte van de certificaten gedurende deze tijd,

De figuur geeft hierbij een vijftal verschillende waarden voor de RPE met hun bijbehorende degressief dalende aantal verkrijgbare WKC. Kortweg beschouwd levert een stijging van de RPE met 500 basispunten (i.e. 5% absolute stijging) een verlenging van de duurtijd van de certificaten op van 2 jaar. Een installatie met een RPE van 5% zou slechts recht geven op 6 jaar WKC, terwijl een installatie met een RPE van 25% recht zou geven op 14 jaar WKC. (Jaarlijkse waardes kleiner dan 3% zijn op de figuur weggelaten)



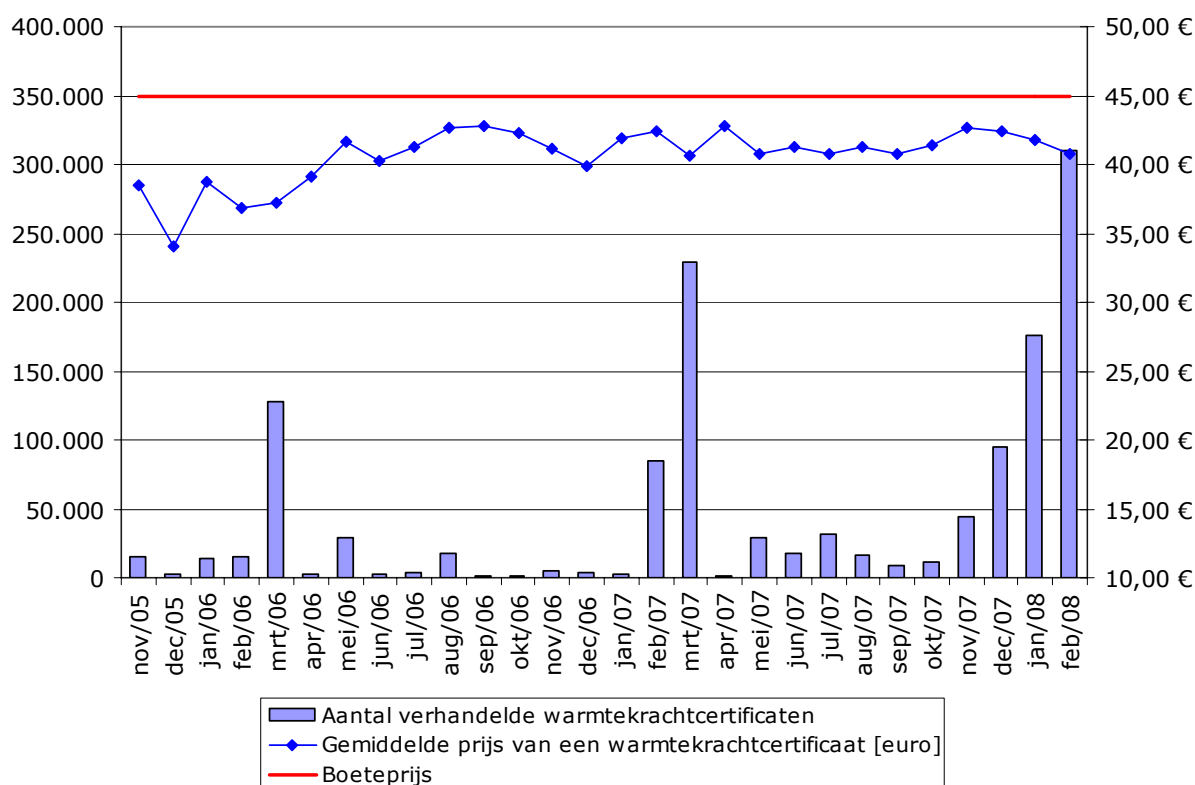
**Figuur 17: Invloed van de RPE in de tijd op het aantal WKC (in %) ten opzichte van de eerste 4 jaar (Eigen berekeningen)**

#### 5.5.4.4 Evolutie van de marktprijzen voor de WKC

De WKC krijgen hun waarde door de certificatenverplichting opgelegd aan de elektriciteitsleveranciers. Indien zij hun quota's niet halen, zijn ze verplicht een boete te betalen. De boeteprijs per ontbrekend certificaat bedraagt 45 EUR (sinds maart 2007). Deze

boete is een belangrijk gegeven aangezien ze in principe de maximale marktprijs voor een certificaat bepaalt. In werkelijkheid kunnen de marktprijzen voor WKC zelfs hoger liggen dan deze boete, aangezien het kopen van een certificaat aftrekbaar is van de belastingen en het betalen van een boete niet. (Energiesparen, 2008e)

Als we de marktprijs van de verhandelde certificaten wensen te volgen, kunnen we dit doen op basis van de historische gegevens vanaf november 2005 (eerste verhandeling) tot en met februari 2008 (laatste gegevens). De volgende figuur geeft de evolutie van de marktprijzen (VREG, 2008b) en het aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten weer.



**Figuur 18: Aantal en gemiddelde marktprijs van de verhandelde WKC**

Het is opmerkelijk dat het aantal verhandelde WKC piekt in de maand maart. Dit is echter eenvoudig te verklaren aangezien deze periode (eind maart) de deadline is voor de leveranciers om hun aantal certificaten van het voorgaande jaar bij de VREG voor te leggen.

Op deze figuur is goed te zien dat het aantal verhandelbare WKC weinig invloed heeft op de marktprijs. Voor het jaar 2007 bedroeg de gemiddelde marktprijs 41,55 EUR of 92% van de boeteprijs. Deze marktprijs situeert zich sinds mei 2006 tussen de 40 en de 43 EUR. We kunnen

dus concluderen dat deze marktprijs vrij stabiel is en naar alle waarschijnlijkheid zich op hetzelfde niveau zal voortzetten in de komende jaren. Dit mogen we besluiten aangezien er zeker geen overaanbod van WKC dreigt die de quota's zou overschrijden. Op 31 maart 2007 zouden er namelijk in totaal 1 032 004 WKC ingeleverd moeten zijn door de vergunde leveranciers. In werkelijkheid werden er slechts 566 191 WKC ingeleverd, of dus slechts 54,9%. De leveranciers die niet aan hun quota voldeden, betaalden de boeteprijs van 45 EUR per ontbrekend certificaat. Er is dus zeker nog potentieel voor warmtekrachtkoppeling in termen van potentiële certificaten. (VREG, 2007)

5.5.4.5 Analyse van de marktprijs van de warmtekrachtcertificaten in termen van vermeden externe kosten

De vraag die we ons nu kunnen stellen is de volgende: zijn de vermeden externe kosten (waar het gebruik van warmtekrachtkoppeling voor kan zorgen) verwerkt in de marktprijs (= subsidie) van de WKC? Met andere woorden: wordt warmtekrachtkoppeling 'ondergesubsidieerd', 'overgesubsidieerd' of is de boeteprijs een goede afstemming op de vermeden externe kosten?

In hoofdstuk 4 werden de externe kosten van een warmtekrachtkoppeling reeds besproken. De cijfers hierover komen van een studie van het VITO (2005). Voor deze analyse gebruiken we dezelfde gegevens. Uit deze studie blijkt dat de vermeden externe kosten van een warmtekrachtkoppeling ten opzichte van andere technologieën de volgende zijn:

**Tabel 12: Vermeden externe kosten**

	Aandeel in de totale elektriciteitsproductie (2002)	Vermeden externe kosten (in EUR/MWh)	
		WKK turbine (gas)	WKK motor (gas)
STEG (gas)	17%	3	(-8)
Klassieke steenkoolcentrale zonder rookgasreiniging	15%	24	13
Klassieke steenkoolcentrale met rookgasreiniging	6%	80 tot 90	70 tot 80

Uit deze gegevens kunnen we besluiten dat de vermeden externe kosten van een warmtekrachtkoppeling (wat betreft de elektriciteitsproductie) zich situeren tussen 3 EUR/MWh en 90 EUR/MWh, afhankelijk van de technologie waarmee vergeleken wordt. We zien daarbij dat warmtekrachtkoppeling vooral een sterke verbetering van de externe kosten met zich

meebrengt bij de vervanging van de klassieke steenkoolcentrales. In vergelijking met een STEG kan alleen een turbine lagere externe kosten voorleggen.

Vergelijken we deze vermeden externe kosten met de marktprijs van de warmtekrachtcertificaten (gemiddeld 41,55 EUR/MWh voor 2007), dan is het moeilijk een eenvoudige conclusie te trekken. We kunnen de analyse opsplitsen in 3 situaties:

1. Zolang er klassieke steenkoolcentrales bestaan *zonder* rookgasreiniging, is een certificatenprijs van maximaal 70 tot 90 EUR/MWh verantwoord. Dit is gelijk aan de vermeden externe kosten.
2. Indien er geen klassieke steenkoolcentrales meer bestaan zonder rookgasreiniging maar enkel *met* rookgasreiniging, is op basis van de vermeden externe kosten een certificatenprijs van maximaal 13 tot 24 EUR/MWh verantwoord.
3. Wanneer de bovenstaande installaties volledig vervangen zijn door STEG's, kan er enkel nog in het geval van turbines een certificatenprijs van maximaal 3 EUR/MWh worden verantwoord.

Om een goede match te hebben tussen de boeteprijs en de vermeden externe kosten, zou er dus jaarlijks een analyse moeten gemaakt worden van de gebruikte technologieën voor de elektriciteitsproductie. Afhankelijk daarvan, kan men dan de boeteprijs aanpassen zodat ze werkelijk de vermeden externe kosten vergoedt. Bekijken we nu de huidige situatie (data uit 2002), dan zien we dat we ons in de eerste situatie bevinden waar er nog gebruik wordt gemaakt van klassieke steenkoolcentrales *zonder* rookgasreiniging. Op dit moment is een certificatenprijs van maximaal 90 EUR dus verantwoord. Om maatschappelijke 'winst' te bekomen ligt de boeteprijs best lager dan de externe kosten. Indien beide waardes gelijk zijn is er geen verbetering van de maatschappelijke welvaart. We kunnen dus concluderen dat de huidige prijs van 45 EUR/MWh te verantwoorden is, al zou ze ook nog iets hoger mogen liggen, bijvoorbeeld rond 60 EUR/MWh. Er zijn echter naast de externe kosten, ook nog verschillende andere redenen waarom warmtekrachtkoppeling gepromoot en dus gesubsidieerd kan worden. Deze redenen worden besproken in hoofdstuk 4.

Wanneer de prijs van de certificaten wordt afgestemd op de vermeden externe kosten, moeten we wel enkele opmerkingen maken. Met de jaren zullen de oude en vervuilende steenkoolcentrales worden vervangen door (onder andere) STEG's. Daardoor zullen de vermeden externe kosten afnemen en bijgevolg zal de certificatenprijs ook afnemen wat de rendabiliteit van de warmtekrachtkoppeling-installaties niet ten goede komt. Dit principe zit min of meer ingebouwd in de huidige certificatenregeling waarbij het aantal certificaten waarop men recht heeft, degressief afneemt met de jaren. Een gegarandeerde certificatenprijs gedurende een langere periode zoals bij elektriciteit uit zonne-energie (20 jaar gegarandeerd) zou voor mogelijke investeringen meer garanties bieden, maar kan dus ook leiden tot 'oversubsidiëring'.

### 5.5.5 Vergelijking van de certificatensteun voor warmtekrachtkoppeling en voor hernieuwbare energie

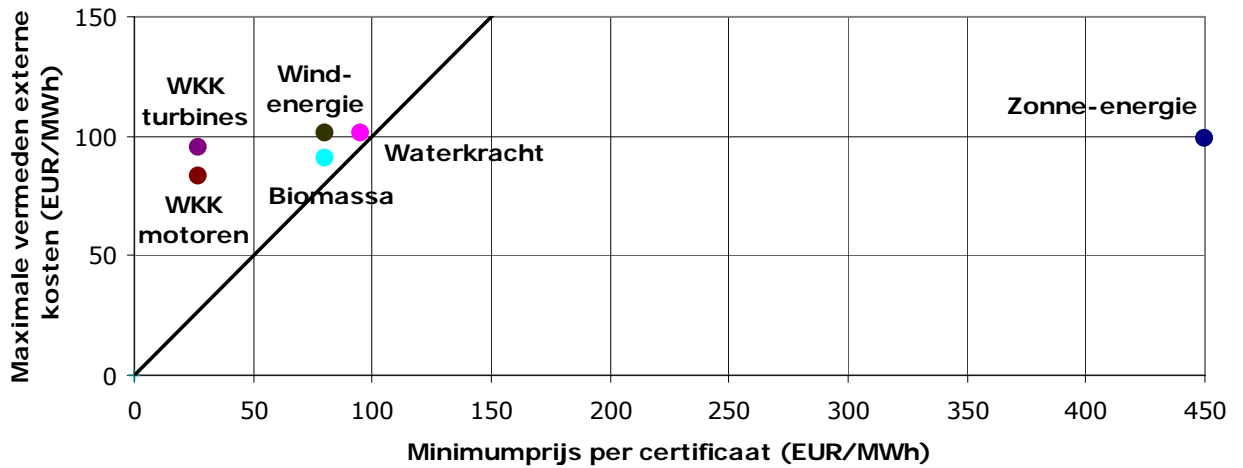
Wanneer elektriciteit wordt geproduceerd uit hernieuwbare energie, dan krijgen deze producenten groenestroomcertificaten voor elke geproduceerde MWh. Onder hernieuwbare energie verstaat met zonne-energie, windenergie, waterkracht en biomassa. De distributienetbeheerders zijn verplicht om deze groenestroomcertificaten op te kopen aan een vaste minimumprijs. Deze minimumprijs ligt meestal lager dan de marktprijs en verschilt van technologie tot technologie. Ook voor warmtekrachtcertificaten is er een minimumprijs waartegen de distributiebeheerders verplicht zijn deze op te kopen. In onderstaand overzicht worden deze minimumprijzen per technologie weergegeven. (VREG, 2008e; VREG 2008f)

**Tabel 13: Minimumprijzen voor de certificaten van HE en WKK**

<b>Technologie</b>	<b>Minimumprijs per certificaat (EUR/MWh)</b>
Zonne-energie	450
Waterkracht, getijden- en golfslagenergie	95
Onshore windenergie	80
Biomassa	80
Warmtekrachtkoppeling	27

Hierbij valt vooral de hoge minimumprijs van de certificaten voor zonne-energie op. Deze is zelfs meer dan vijf keer zo hoog als deze voor windenergie. We kunnen deze prijzen echter niet goed beoordelen zolang we de vermeden externe kosten er niet bij betrekken. Deze worden besproken in een studie van het VITO (2005a) en werden reeds in hoofdstuk 4 behandeld. Om de maximale steun te bepalen op basis van vermeden externe kosten, moeten we een vergelijking opstellen ten opzichte van de meest 'vervuilende' technologie. In Vlaanderen is dit de klassieke steenkoolcentrale zonder rookgassenreiniging. Per geproduceerde MWh elektriciteit bedragen de externe kosten 102 EUR. Hiervan kunnen we de externe kosten van de beschouwde technologieën aftrekken om zo te komen tot de *vermeden* externe kosten. Zetten we deze vermeden externe kosten naast de minimumprijs voor de certificaten dan bekomen we volgend overzicht.



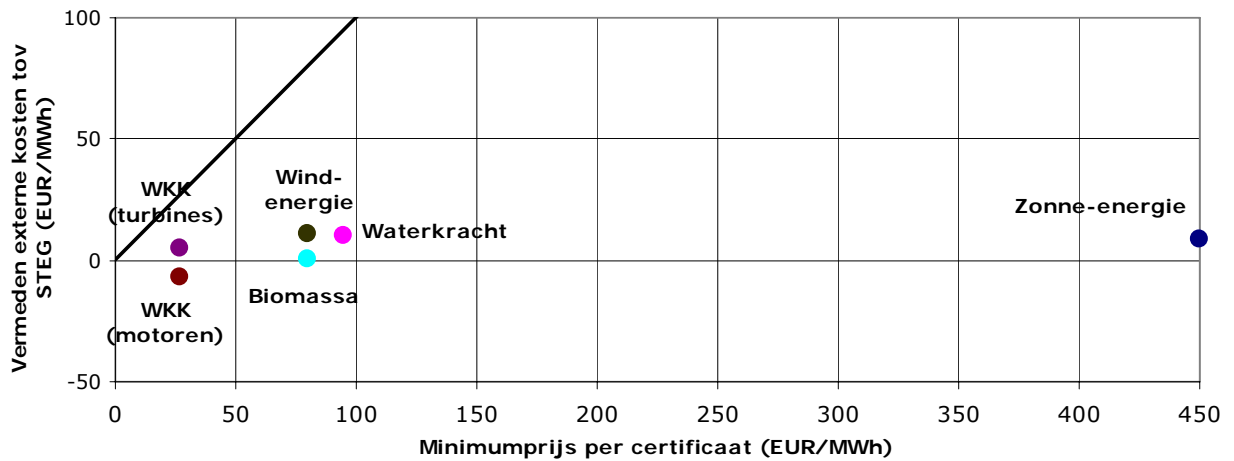


**Figuur 19: Vergelijking van de maximale vermeden externe kosten met de minimumprijs van de certificaten voor HE en WKK**

De diagonaal in deze figuur duidt het punt aan waarbij er geen maatschappelijke winst wordt bereikt. De steun is er even groot als de vermeden externe kosten en dus is dit punt voor de maatschappij indifferente. Links van deze diagonaal wordt er maatschappelijke winst gerealiseerd: de steun aan de producenten is lager dan de vermeden externe kosten en er blijft dus nog 'winst' over voor de maatschappij. Rechts van deze diagonaal is er feitelijk sprake van een te grote steun in verhouding tot de realiseerbare vermeden externe kosten. In deze zone is er dus maatschappelijk 'verlies' wanneer we enkel kijken naar de vermeden externe kosten.

Analyseren we deze figuur, dan blijkt hier dat zonne-energie te zwaar wordt gesubsidieerd. De certificatensteun (450 EUR/MWh) is vele malen groter dan de vermeden externe kosten (+/- 100 EUR/MWh). Bij windenergie, waterkracht en biomassa kunnen we zeggen dat er wel een goed evenwicht is tussen steun en vermeden externe kosten. Voor een warmtekrachtkoppeling liggen de minimumprijzen duidelijk lager in verhouding tot de andere technologieën, ondanks het beperkte verschil in vermeden externe kosten tussen de technologieën.

Naast het analyseren van de maximale vermeden externe kosten, is het ook interessant om een analyse te maken waarbij we vergelijken met een STEG centrale. Deze centrale heeft slechts een externe kost van 11,3 EUR/MWh. Voor deze vergelijking gaan we op dezelfde manier tewerk als hiervoor. De vermeden externe kosten worden in de volgende figuur uitgezet tegen de minimale certificatensteun.



**Figuur 20: Vergelijking van de vermeden externe kosten ten opzichte van een STEG met de minimumprijs van de certificaten voor HE en WKK**

Uit deze figuur kunnen we afleiden dat elke technologie, behalve een warmtekrachtkoppeling met motoren, potentieel heeft om externe kosten te vermijden in vergelijking met een STEG. Opmerkelijker is het feit dat elke technologie, in termen van vermeden externe kosten, te zwaar gesubsidieerd wordt. Alle technologieën liggen namelijk rechts van de diagonaal. De steun voor warmtekrachtkoppeling scoort enerzijds nog het best van allemaal, daar ze het dichtste bij de diagonaal ligt. Anderzijds kunnen we zeggen dat motoren geen steun 'verdienen' aangezien ze meer externe kosten veroorzaken dan een STEG. We moeten hierbij wel opmerken dat er voor hernieuwbare energie ook andere redenen zijn die een verhoging van de subsidies verantwoorden, net zoals voor warmtekrachtkoppeling.

#### **5.5.6 Combinatie van warmtekrachtcertificaten (WKC) en groenestroom-certificaten (GSC) voor een warmtekrachtkoppeling**

Wanneer een warmtekrachtkoppeling gebruik maakt van een hernieuwbare energiebron als brandstof, dan kan zij naast de warmtekrachtcertificaten ook aanspraak maken op groenestroomcertificaten. Onder hernieuwbare energiebron verstaat de Vlaamse overheid onder meer de volgende bronnen:

- Biogas: ontstaat door vergisting van organisch materiaal;
- Stortgas: een gasmengsel van methaan en koolstofdioxide dat vrijkomt wanneer organisch materiaal door bacteriën wordt omgezet in een afvalstortplaats;
- Biomassa: het biologisch afbreekbare gedeelte van producten, afvalstoffen, plantaardig en dierlijk restmateriaal afkomstig van de land- en bosbouw, van industrieel en huishoudelijk afval.

Groenestroomcertificaten kan men bekomen volgens hetzelfde principe als de warmtekrachtcertificaten, namelijk één certificaat per MWh geproduceerde elektriciteit. De elektriciteitsleveranciers hebben dan ook een certificatenverplichting voor het aandeel groene stroom in hun totale leveringen. De boete voor de leveranciers per ontbrekend GSC ligt hier wel beduidend hoger dan bij de WKC. Ze bedraagt op dit ogenblik 125 EUR per ontbrekend certificaat. (VREG, 2008c)

Meestal hebben dit soort installaties echter lagere rendementen dan fossiel gestookte installaties. Hierdoor zou het kunnen dat het aantal certificaten laag uitvalt, ondanks het feit dat de installaties wel voldoen aan het label 'hoogrenderende warmtekrachtkoppeling'. Om dit probleem op te lossen mag men voor een warmtekrachtkoppeling op hernieuwbare energie rekenen met aangepaste referentie rendementen, in plaats van de (hogere) Vlaamse referentierendementen (Tabel 11).

Voor elektriciteit zijn dit de referentie rendementen:

- 42% bij gebruik van biogas
- 42,7% bij gebruik van vloeibare biobrandstoffen
- 34% bij gebruik van hout of houtafval
- 25% bij gebruik van andere vaste biomassastromen

Het thermisch referentie rendement bij het gebruik van biogas bedraagt 70%.

## **5.6 Wallonië en Brussel**

Wallonië en Brussel hanteren, in tegenstelling tot Vlaanderen, slechts één systeem van certificaten voor zowel de productie van energie uit hernieuwbare energiebronnen als met een warmtekrachtkoppeling. Dit biedt het voordeel dat er een grotere markt is voor de certificaten, met een hogere liquiditeit tot gevolg. Ook moeten er voor sommige installaties geen twee soorten certificaten worden aangevraagd en moet de regulator slechts één systeem opzetten en controleren.

In alle regio's wordt er gewerkt met een principe waarbij een vergelijking wordt gemaakt ten opzichte van een gescheiden productie. Echter, de referentierendementen voor de gescheiden productie verschillen van regio tot regio. Zonder in detail te willen treden over de precieze berekeningen in Brussel en Wallonië, is er een belangrijk verschil op te merken in de wijze waarop de certificaten worden toegekend. In Brussel en Wallonië worden deze certificaten namelijk toegekend op basis van de *CO<sub>2</sub>-emissiereductie*, dit in tegenstelling tot Vlaanderen waar dit gebeurt op basis van de *primaire energiebesparing*. In Vlaanderen beschouwen we dus in feite enkel de efficiëntie waarmee een bepaalde brandstof wordt omgezet en niet de

brandstof zelf. In Wallonië en Brussel krijgen installaties die werken op brandstof met een hogere CO<sub>2</sub>-uitstoot per eenheid primaire energie (bijvoorbeeld diesel) dus wel minder certificaten. (COGEN, 2006)

Ook inzake beperkingen zijn er verschillen te noteren. Daar waar Vlaanderen een beperking van het aantal certificaten in de tijd oplegt, kent Wallonië een getrapte vermogensbegrenzing. Maar ondanks de vele verschillen, compenseren deze elkaar gedeeltelijk.

## 6 Mogelijkheden voor warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector

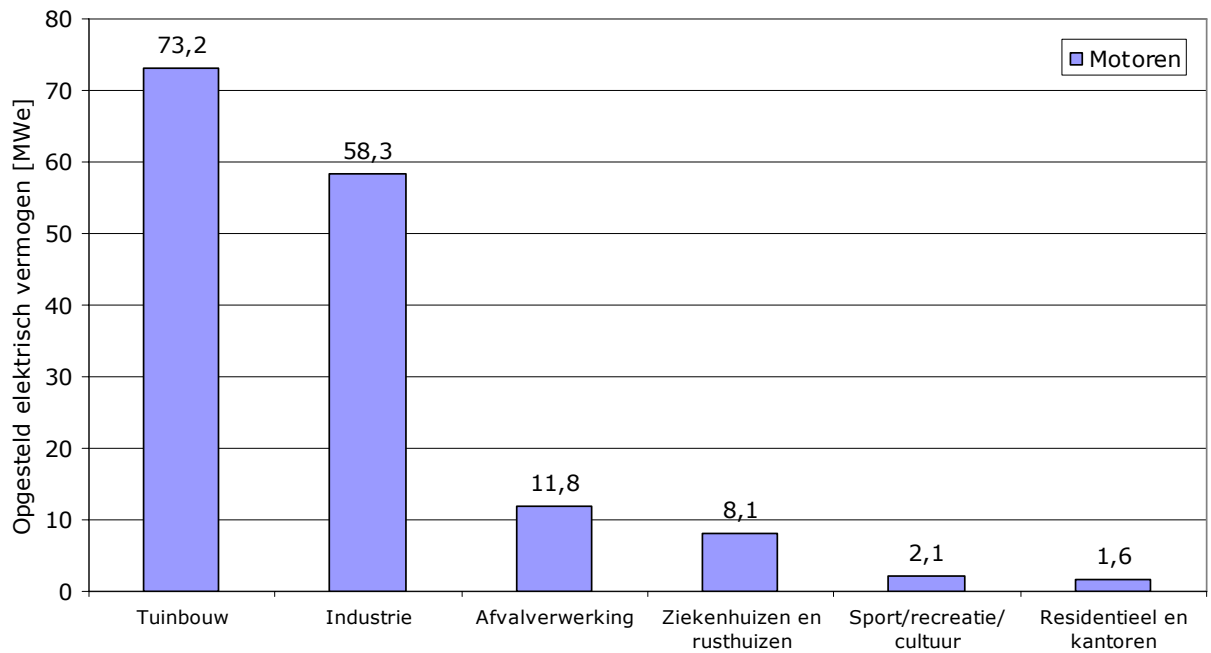
Toepassingen voor warmtekrachtkoppeling kunnen worden opgedeeld naar verschillende sectoren. Het grootste potentieel situeert zich in de industriële (of secundaire) sector. Ook in de primaire sector, voornamelijk in de glas- en tuinbouw, en in de tertiaire sector (klinieken, zwembaden,... ) is er potentieel voor een warmtekrachtkoppeling. Het aandeel van de residentiële sector (appartementen en woningen) blijft voorlopig eerder beperkt.

### 6.1 Aandeel van de residentiële toepassingen in België

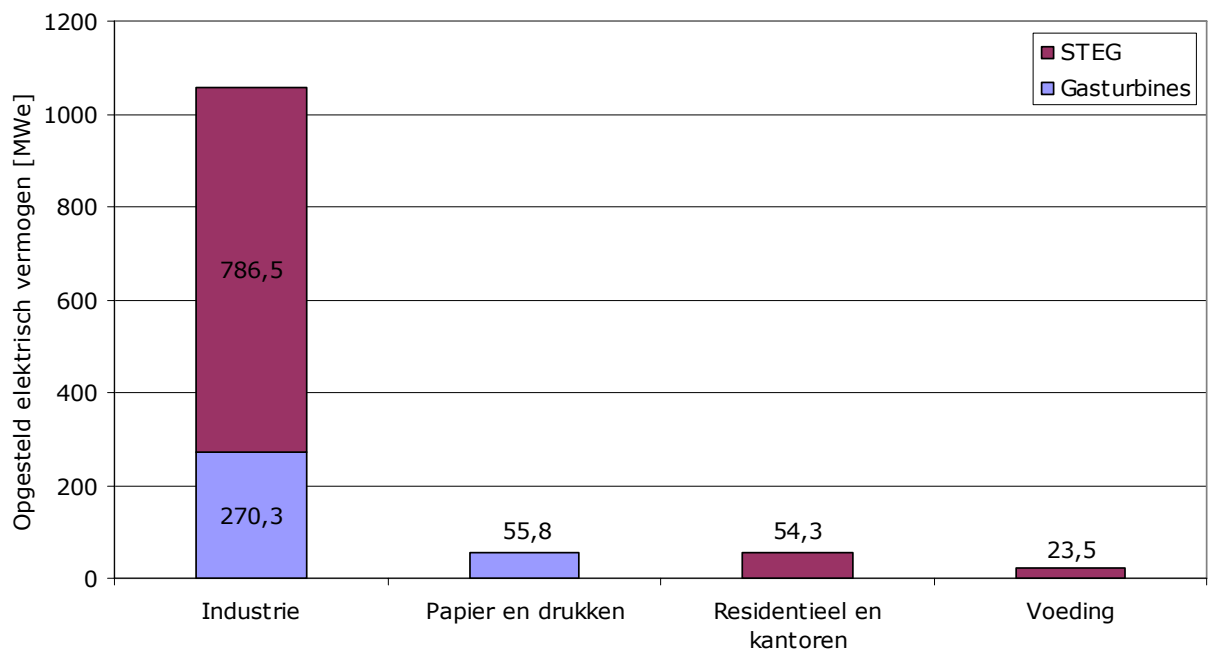
In opdracht van het VEA stelde het VITO (2007) een inventaris op van het geïnstalleerd vermogen aan warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen in 2006. Figuur 21 geeft de verdeling over de sectoren weer voor *motoren*. De tuinbouw blijkt er de grootste sector te zijn met 47% van het totaal opgesteld vermogen. De tuinbouw wordt gevolgd door de industrie met 38% aandeel. Het aandeel van afvalverwerking (8%), ziekenhuizen en rusthuizen (5%), sport/recreatie/cultuur (1%) en kantoren/residentieel (1%) is eerder beperkt.

In dezelfde inventaris onderzocht men ook de verdeling van het opgesteld vermogen voor *gasturbines en STEG's* voor 2006. Deze resultaten worden weergegeven in Figuur 22. Hier zien we dat de industrie veruit het grootste aandeel vertegenwoordigt (ruim 88%). Naast de industriële sector vertegenwoordigen de andere sectoren slechts een marginaal aandeel. De papier- en druksector vertegenwoordigt hier 4,7% aandeel, wat bijna gelijk is aan het aandeel van de kantoren en residentieel (4,6%). De voedingssector ten slotte staat in voor een kleine 2% aandeel.

In het algemeen wordt warmtekrachtkoppeling dus slechts weinig toegepast in de residentiële sector en in de kantoren.



**Figuur 21: Verdeling volgens elektrisch vermogen van motoren over de verschillende sectoren in 2006**



**Figuur 22: Verdeling volgens elektrisch vermogen van STEG's en gasturbines over de verschillende sectoren in 2006**

## 6.2 De residentiële sector

Onder de noemer 'residentiële sector' verstaan we hier de private woningen en de appartementen. Aangezien elke woning of appartement nood heeft aan elektriciteit en aan warmte, lijkt een warmtekrachtkoppeling hiervoor een interessante oplossing. De warmte die de warmtekrachtkoppeling produceert kan worden gebruikt voor de verwarming van de ruimtes of voor het verwarmen van sanitair water. De geproduceerde elektriciteit kan de verlichting en allerlei (multimedia-)toestellen van stroom voorzien. Voor de residentiële sector heeft warmtekrachtkoppeling echter specifieke beperkingen, zoals geluidshinder en synchroniteitsproblemen tussen warmte- en elektriciteitsvraag. Deze beperkingen zullen verderop aan bod komen.

Aangezien de vereiste vermogens in deze sector (veel) lager liggen dan in de industrie, spreekt men hier ook wel over mini of micro warmtekrachtkoppeling, afhankelijk van het vermogen. Een eenduidige definitie hiervoor is er echter niet. Als richtlijn (Dexters, 2007) kunnen we wel de volgende waarden beschouwen:

- Mini warmtekrachtkoppeling:  $\leq 200$  kWe
- Micro warmtekrachtkoppeling:  $\leq 10$  kWe

### 6.2.1 Trias energetica

Wanneer de beslissing wordt gemaakt over de energievoorziening van een appartementsblok of een woning, volgt men best een strategie die bekend staat onder de term '*trias energetica*'. Dit begrip werd in 1996 geïntroduceerd door E. Lysen (Novem) en is later als strategie uitgewerkt door de TU Delft. De stappen die gevolgd moeten worden zijn opgesteld in volgorde van duurzaamheid. (SenterNovem, 2008)

Stap 1: Beperk de energievraag.

Dit kan door het toepassen van vraagbeperkende maatregelen zoals goed geïsoleerd en luchtdicht bouwen, warmteterugwinning.

Stap 2: Gebruik zoveel mogelijk duurzame energiebronnen.

Stap 3: Gebruik de eindige energiebronnen efficiënt.

Zet efficiënte technieken met een hoog rendement in om het resterende energieverbruik op te wekken.

Alvorens men dus een warmtekrachtkoppeling gaat dimensioneren moet men best de voorgaande stappen overlopen. Daarbij is het zeer belangrijk dat de woning of het

appartementengebouw goed geïsoleerd is. Isoleren is namelijk een eenvoudige en goedkope manier om het energieverbruik te beperken.

### 6.2.2 Technologieën

De belangrijkste technologieën die in aanmerking komen voor deze residentiële toepassingen zijn de volgende:

- Verbrandingsmotoren;
- Microturbines;
- Stirlingmotoren;
- Brandstofcellen.

Hoewel de interne verbrandingsmotor minder geschikt lijkt voor residentiële toepassingen dan andere technologieën (omwille van de hogere geluidshinder, de trage opwarming, de beperkte betrouwbaarheid en veel onderhoud) lijkt hij voorlopig de enige mogelijkheid die economisch, marktmatig en praktisch haalbaar is. De andere technologieën zijn ook nu nog volop in ontwikkeling. (Voorspools en D'haeseleer, 2001)

### 6.2.3 Haalbaarheid

Haalbaarheidsstudies tonen aan dat in koudere klimaten, met langere winterperiodes met een hoge warmtevraag, het gebruik van warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector nu reeds economisch haalbaar is. In de Noord-Europese landen kent men dan ook al vele voorbeelden. In warmere klimaten (vb. Zuid Europa) met een lagere warmtevraag moet er ook koeling (trigeneratie) worden toegepast opdat het project economisch haalbaar zou zijn. (COGEN, 2006)

Voor projecten in België kan men de website van *COGENchallenge* (2008) raadplegen. Deze organisatie tracht alle kleinschalige warmtekrachtkoppelingtoepassingen in Europa in één database onder te brengen (er waren al 1303 installaties in maart 2008). De gegevens zijn vrij te raadplegen. Volgens deze database zijn er in België nog geen warmtekrachtkoppelinginstallaties geïnstalleerd in gezinswoningen, maar wel al drie in appartementengebouwen:

- Residentie "La Sauvenière" (in 2007, te Sint-Lambrechts-Woluwe). Dit complex met 350 appartementen maakt gebruik van 2 warmtekrachtkoppelingen type ecoGEN-25AH (elk 25 kW<sub>e</sub> en 44 kW<sub>th</sub>; totale investering van 150 000 EUR) die werken op koolzaadolie, samen met 250 m<sup>2</sup> zonnecollectoren en een condensatieketel.



- "Les Jardins d'Alexandre" (in 2007, te Forest). Dit complex bestaat uit 17 lofts en maakt gebruik van een warmtekrachtkoppeling type ecoGEN-25AH (25 kW<sub>e</sub> en 44 kW<sub>th</sub>) die op koolzaad werkt.
- Residentie "Chantebrise" (in 2008, te Luik). Dit appartementsblok beschikt over een warmtekrachtkoppeling type ecoGEN-48SG (48 kW<sub>e</sub> en 77 kW<sub>th</sub>) die op aardgas werkt.

In bepaalde Europese landen, zoals Nederland en het Verenigd Koninkrijk, heeft de beschikbaarheid van aardgas en gestandaardiseerde pakketten een impuls gegeven aan de implementatie van warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector. Het gebruik van gestandaardiseerde pakketten heeft de volgende voordelen:

- Beschikbaar in elektrische vermogens van 10 kW tot 2 MW
- Lagere kost
- Hoge vermogensdichtheid per volume
- Snel en gemakkelijk te installeren (Alle aansluitingen zijn voorzien)
- Automatische werking, geen gespecialiseerd personeel vereist

Een bijkomende factor die bijdraagt tot de implementatie van warmtekrachtinstallaties in gebouwen is de mogelijkheid om de installatie op afstand te monitoren. De microprocessoren volgen de verschillende werkingsparameters (drukken, temperaturen, spanning, ... ) op en kunnen deze verzenden via (bijvoorbeeld) een aparte telefoonlijn naar een centrale computer. Op die manier kan de machine op afstand worden gemonitord en gestuurd. Indien nodig kan een gespecialiseerd team alsnog ter plaatse gaan.

Deze pakketten maken voor kleinere vermogens meestal gebruik van een klassieke motor die op aardgas draait. Aardgas heeft het voordeel van zuiver en relatief goedkoop te zijn. Ook belangrijk voor de kosten is het feit dat aardgas geen opslag vereist. Nadeel aan motoren is het lawaai dat ze produceren. Daarom worden deze motoren onder meer voorzien van akoestische omhulsels, akoestische dempers en geluidsabsorberende materialen om het geluid op een aanvaardbaar niveau te houden. Voor grotere vermogens bestaan er ook pakketten met gasturbines. (COGEN, 2006)

#### **6.2.4 Lawaai en trillingen**

Wanneer een warmtekrachtkoppeling wordt gebruikt in een woning of in appartementen, moet men bepaalde normen voor geluidsemissie specificeren om de bewoners te beschermen. Bij toekomstige technologieën zoals de brandstofcellen stelt zich dit probleem niet. Maar de huidige interne verbrandingsmotoren produceren bijvoorbeeld een geluid dat hoger is dan 95 dB(A).

Daarom moeten er maatregelen worden genomen om het geluidsniveau te beperken tot aanvaardbare limieten.

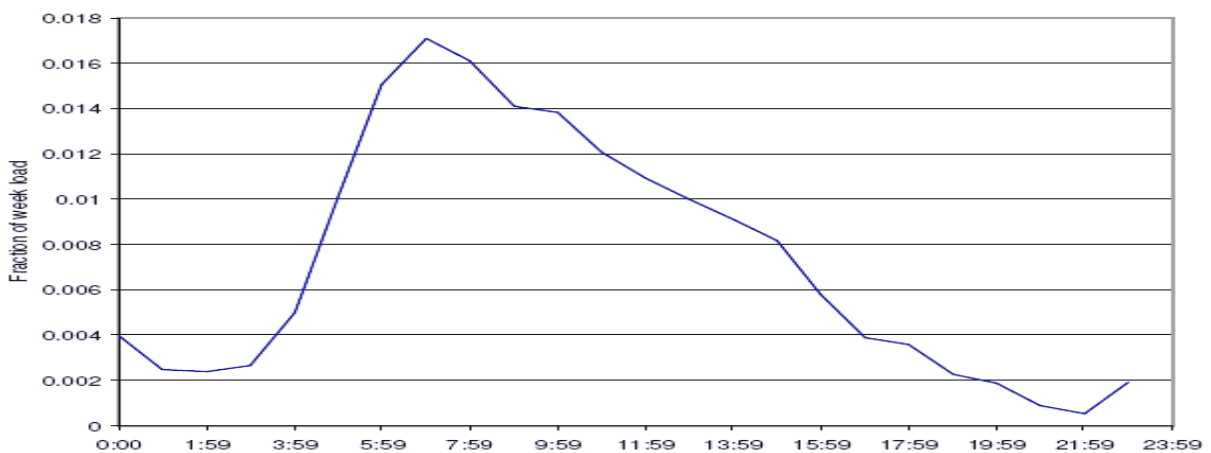
Onder meer aan de volgende aspecten moet de nodige aandacht worden besteed:

1. Het beperken van het lawaai in de kamer zelf met een akoestische afscherming zodat het geluid met minstens 25 dB(A) wordt verminderd. Er kan gebruik worden gemaakt van akoestische dempers op het inlaatkanaal en/of van geluidsabsorberende materialen.
2. Het limiteren van het lawaai in de naburige kamers. Men kan dus extra aandacht besteden aan de constructie van de muren, plafonds en vloeren.
3. Het verminderen van het geluid naar buiten toe. Hiervoor zijn akoestische dempers op de uitlaat het meest aangewezen.

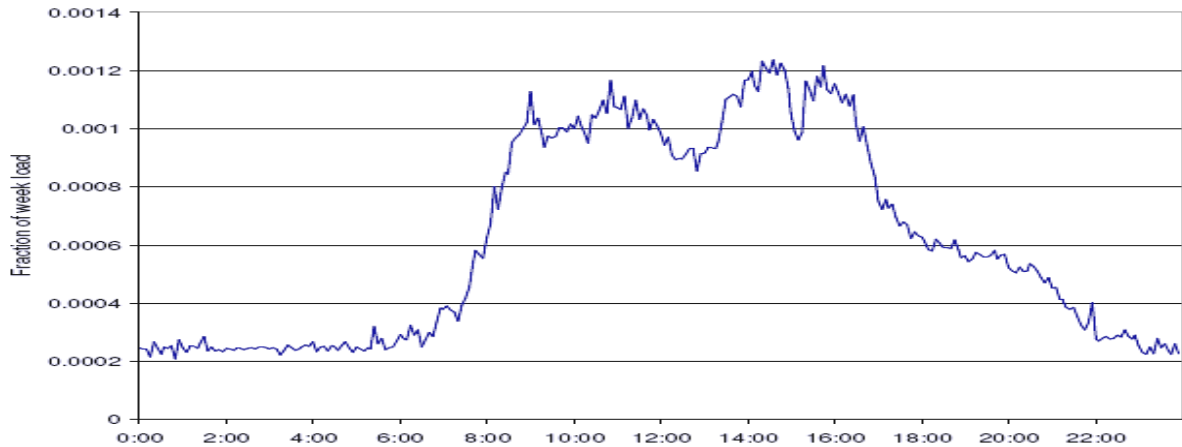
Naast deze maatregelen voor het verminderen van het geluid moet er ook aandacht worden besteedt aan het vermijden van de transmissie van trillingen door de gebouwenstructuur. Daarvoor is het aangewezen om de installatie op een elastische fundering te plaatsen en eventueel nog bijkomend absorptiemateriaal te gebruiken om de trillingen te dempen. (COGEN, 2006)

### 6.2.5 Synchroniteit tussen elektriciteits- en warmtebehoefte: buffering

Een belangrijk aspect bij de dimensionering van een warmtekrachtkoppeling voor residentiële toepassingen, is de synchroniteit tussen de elektriciteits- en de warmtebehoefte. Het kan voorkomen dat perioden met een lagere warmtebehoefte samenvallen met perioden van hoge elektriciteitsvraag en omgekeerd. Als voorbeeld worden de profielen van een schoolgebouw beschouwd waarbij de synchronisatie tussen beide profielen niet optimaal is. De volgende figuren geven dit probleem duidelijk weer. (Stroobandt, 2007)



Figuur 23: Voorbeeld van een thermisch profiel voor een schoolgebouw



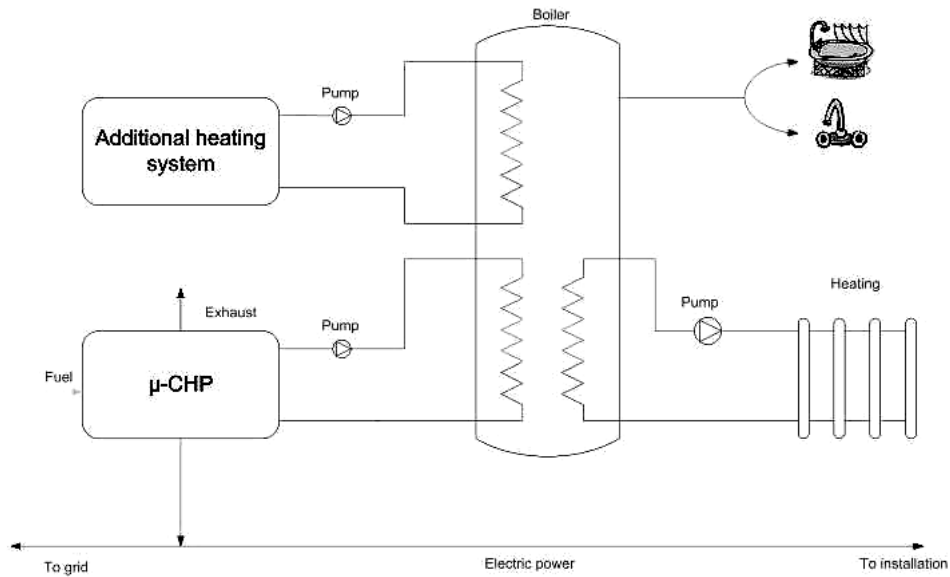
**Figuur 24: Voorbeeld van een elektrisch profiel voor een schoolgebouw**

Wanneer de warmtevraag op een bepaald moment kleiner is dan het thermisch vermogen van de warmtekrachtkoppeling, dan zijn er twee mogelijkheden: deellastwerking of het wegkoelen van de overtollige warmte. Beide mogelijkheden hebben echter nadelen. Bij deellastwerking daalt het elektrisch rendement en stijgen de onderhoudskosten per kWh. Het wegkoelen van het teveel aan warmte vermindert de energiebesparing. (Energik, 2004)

Een mogelijke oplossing voor het verschil van het thermische en het elektrisch profiel, is het opslaan van de overtollige warmte in een buffer. Dit vereist een slimme sturing waarbij de warmtevraag of de elektriciteitsvraag kan worden gevolgd, afhankelijk van de reeds opgeslagen warmte in de buffer. Wanneer er een grote warmtevraag is, wordt er dan op warmte gedimensioneerd. Wanneer er dan geen warmtevraag is en de buffer kan nog energie opslaan, dan kan er op elektriciteitsvraag worden gedraaid. In periodes met een grote warmtevraag kan deze warmte dan wel nuttig worden aangewend. Het inpassen van een buffer heeft meerdere voordelen:

- De warmtekrachtkoppeling kan een groter deel van de warmtevraag dekken;
- De aan-uit frequentie van de installatie kan worden verminderd. Dit komt de (technische) levensduur van de installatie ten goede;
- De vereiste synchroniteit tussen elektriciteits- en de warmtebehoefte wordt (gedeeltelijk) ontkoppeld.

Eén mogelijke configuratie van een micro-warmtekrachtkoppeling met een buffer (een boiler) en een ketel wordt weergegeven in Figuur 25.



**Figuur 25: Voorbeeld configuratie van een buffer**

De buffering kan echter op verschillende manieren worden geïmplementeerd:

- Buffering in een afzonderlijk buffervat
- Buffering in het leidingnet
- Buffering in de bestaande ketels

De grootte van deze buffers kan worden bepaald door middel van simulaties. Elke manier van buffering veroorzaakt echter ook verliezen (stilstandverliezen ketel, leidingverliezen ...) waarmee rekening gehouden moet worden tijdens de dimensionering. Daarboven maakt de inpassing en regeling van een buffer de inpassing van een warmtekrachtkoppeling complexer. (Energik, 2004)

### 6.2.6 Netkoppeling

De technische en economische gevolgen van een netkoppeling mag men niet onderschatten. De regels waaraan men zich moet houden worden opgelegd door de distributienetbeheerders die verenigd zijn in Infrac en Eandis. Zij hebben namelijk een aantal verplichtingen. Zo moet de spanning onder alle omstandigheden binnen de normen gehouden worden. Daarvoor moeten verschillende parameters zoals netvervuiling, reactief vermogen en het evenwicht tussen elektriciteitsproductie en -afname goed opgevolgd worden. Het gebruik van warmtekrachtkoppeling (en decentrale energieproductie in het algemeen) maken de exploitatie en het dimensioneren van het net ingewikkelder. (Dexters, 2007)

Ook de beschikking over een terugdraaiende meter is belangrijk. Hierdoor werkt het elektriciteitsnet als een buffer, wat het aantal draaiuren van de installatie alleen maar ten goede kan komen. Produceert de installatie meer dan de eigen elektriciteitsvraag en is er dus een overschot, dan moet dit overschot verkocht worden op de vrije markt. De verkoopprijzen hiervoor liggen vanzelfsprekend veel lager dan de aankooprijzen.

### **6.3 Vergelijking van de residentiële sector met de tertiaire sector**

Wanneer we de residentiële sector (meer specifiek de appartementsgebouwen) vergelijken met de tertiaire sector (meer specifiek de kantoorgebouwen en de scholen), dan zien we dat hun warmte- en elektriciteitsbehoefte grotendeels overeenstemmen. Zowel in appartementsgebouwen als in kantoorgebouwen bestaat de warmtevraag uit de behoefte aan ruimteverwarming en uit de behoefte aan warm tapwater. De elektriciteitsbehoefte bestaat in beide situaties uit de verlichting van de ruimtes en uit de aandrijving van allerlei kleine elektrische apparaten.

Toch is er een belangrijke factor die een beperking vormt in de residentiële sector en niet in de tertiaire sector. Dit betreft de 'eigendomsregeling' van de warmtekrachtkoppelinginstallatie. In een kantoorgebouw of een school/universiteit is het gebouw en alle installaties eigendom van één enkele eigenaar. De investerings-, werkings- en brandstofkosten zijn dan ook ten laste van deze eigenaar. Het is ook deze eigenaar die van de economische voordelen van een mogelijke installatie zal kunnen genieten. Dit alles in tegenstelling van een appartementsgebouw waar alle bewoners hun eigen appartement *kunnen* bezitten. Hier vormen zich dus administratieve en technische moeilijkheden omtrent de eigendom van de warmtekrachtkoppeling en de toewijzing van de kosten. De geleverde warmte en elektriciteit moet namelijk individueel worden opgemeten voor elk appartement. Dit vraagt om extra meters en installatiewerk. Dit is echter noodzakelijk om een correcte toewijzing van de verschillende kosten te kunnen maken.

Deze moeilijkheden staan een implementatie in principe niet in de weg, maar vormen toch een extra complexiteit ten opzichte van een verwarming met hoogrendementsketels. Tegenwoordig krijgt elk individueel appartement meestal zijn eigen verwarmingsketel zodat de toewijzingsmoeilijkheden zich hier niet voordoen. Hierbij is elke bewoner ook verantwoordelijk voor het onderhoud van zijn eigen ketel, daar waar bij een warmtekrachtkoppeling één van de bewoners zal moeten worden aangewezen als verantwoordelijke voor de jaarlijkse onderhoudsbeurt, de reparaties,...

#### **6.4 Toekomst**

Het VITO (2005b) heeft in haar rapport 'Prognoses voor hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling tot 2020' onder meer een potentieel uitgewerkt voor warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector in België. De studie brengt wel enkel de installaties in rekening met een vermogen van 85kWe of meer. Dit betekent concreet het potentieel voor appartementen met minstens 50 wooneenheden. De studie geeft aan dat er voor de residentiële sector nog 48 MWe openstaand potentieel is voor motoren. Deze motoren zouden dan een vollastdraaitijd van 3000 uur per jaar moeten hebben.

Volgens Annick Dexters (KHLim, 2007) moeten we nog wat geduld hebben om warmtekrachtkoppeling in woningen te zien doorbreken. Eerst moeten er nog een paar technische en economische uitdagingen worden overwonnen. Schaalvergroting zal in de eerste plaats ervoor zorgen dat de prijzen zullen zakken. Hiertoe zijn pilootprojecten nodig. Daarnaast vraagt de problematiek in verband met de netaansluiting een eenvoudige oplossing. De consument zal warmtekrachtkoppeling ook enkel willen indien het een compact systeem is met weinig onderhoud en met hetzelfde gebruiksgemak als het huidige verwarmingssysteem. Aangezien nieuwe woningen een hoog isolatieniveau moeten hebben (EPB regelgeving) is een warmtekrachtkoppeling hiervoor minder geschikt. Het is dan ook in bestaande woningen waar er niet meer extra geïsoleerd kan worden dat warmtekrachtkoppeling meer potentieel heeft. (Dexters, 2007)

## **7 Gevalstudie voor een appartementsgebouw**

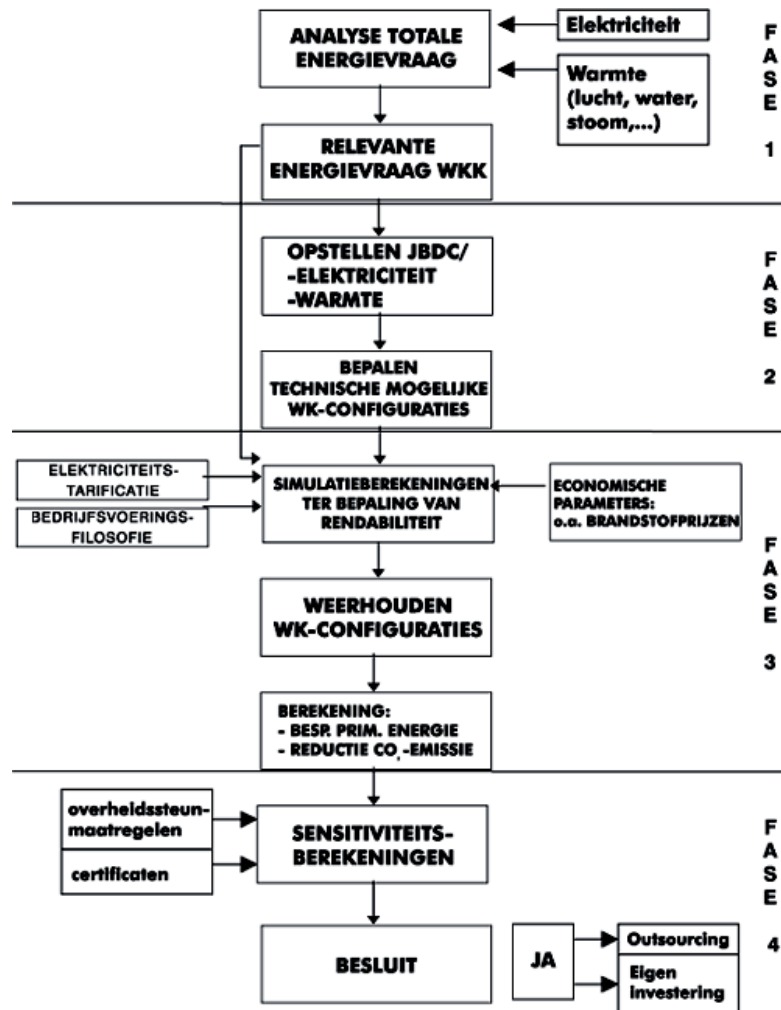
### **7.1 Omschrijving van de gevalstudie**

De behandelde gevalstudie werd voorgedragen door COGEN Vlaanderen. Elke jaar publiceren zij een aantal eindwerkvoorstellen op hun website. De gevalstudie zelf handelt over *de mogelijkheid om de warmtevoorziening van appartementen te voldoen met behulp van een warmtekrachtkoppeling*. Zoals in hoofdstuk 1 reeds werd aangehaald, werd hiervoor samengewerkt met studenten van de XIOS Hogeschool Limburg. Het beschouwde appartementsgebouw is echter nog niet gerealiseerd en dus zijn er enkel bouwplannen beschikbaar. Op basis van deze bouwplannen werd vervolgens een warmtevraagberekening gemaakt door de twee studenten van de XIOS Hogeschool Limburg. Het deel dat in deze eindverhandeling is opgenomen is dan ook (voortbouwend op de resultaten van de twee studenten) hoofdzakelijk een onderzoek naar de economische analyse van het project met behulp van diverse scenario's.

Het project dat hier wordt behandeld is een appartementsgebouw met honderd appartementen, dat als onderdeel van het woonproject van C-Mine gelegen is te Genk. Het project bestaat uit twee delen, waarvan blok A 72 woningen bevat en blok B er 28 bevat.

### **7.2 Aanpak van de haalbaarheidsstudie**

Om tot een correct besluit te komen in verband met de technische dimensionering en de economische haalbaarheid, steunen we in deze studie op de structuur van Figuur 26. De hoofdstappen die aan bod komen zijn de analyses van de energievraag, het opstellen van jaarbelastingsduurcurves, de bepaling van de technisch mogelijke installaties, de berekening van de primaire energiebesparing, de vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot en de berekening van de rendabiliteit onder verschillende scenario's.



Figuur 26: Structuur van een haalbaarheidsstudie (Energik, 2004)

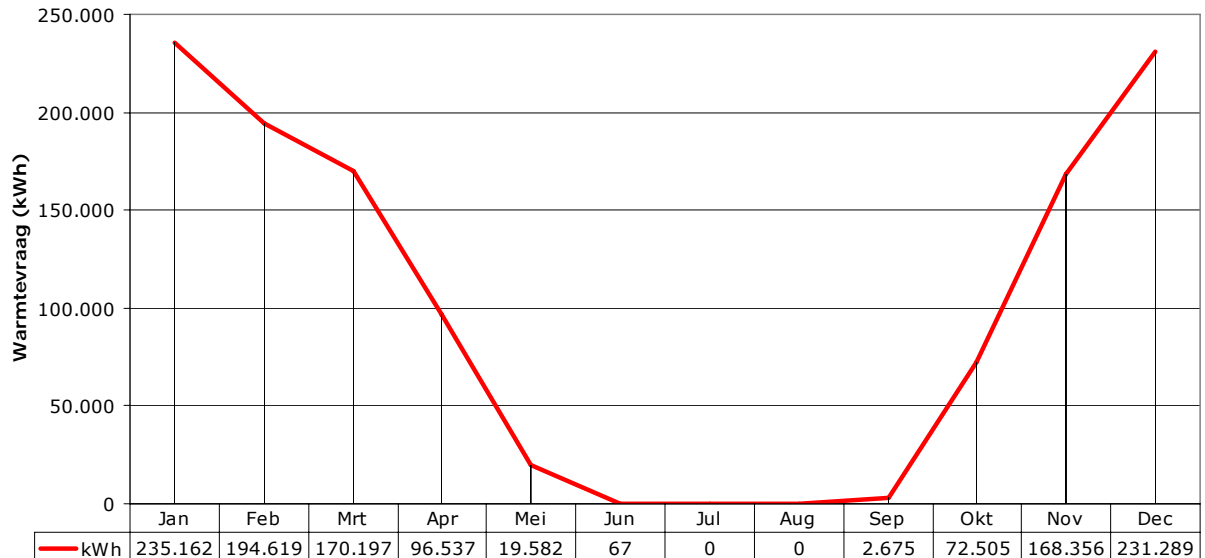
### 7.3 Technische dimensionering

#### 7.3.1 Warmtevraag

De warmtevraag voor de appartementen werd uitgevoerd door de studenten Industrieel Ingenieur van de XIOS Hogeschool Limburg. Aangezien er enkel plannen van de appartementen beschikbaar waren hebben zij de warmtevraag berekend met behulp van de EPB software (Energie prestatieregelgeving) van de Vlaamse Overheid, rekening houdend met verschillende normen (K-peil en E-peil). Als uitkomst geeft dit programma een overzicht van de warmtevraag voor verwarming en tapwater per maand. Voor deze gevalstudie houden we enkel rekening met de energievraag voor verwarming. De warmtevraag voor tapwater wordt hier buiten



beschouwing gelaten als zijnde een niet-relevante warmtevraag. De resultaten van de software zijn terug te vinden in bijlage 1 (blok A) en bijlage 2 (blok B). Hieronder wordt een grafische weergave van de relevante warmtevraag (verwarming) weergegeven.



**Figuur 27:Maandelijke warmtevraag voor verwarming (blok A + B)**

### 7.3.2 Elektriciteitsvraag

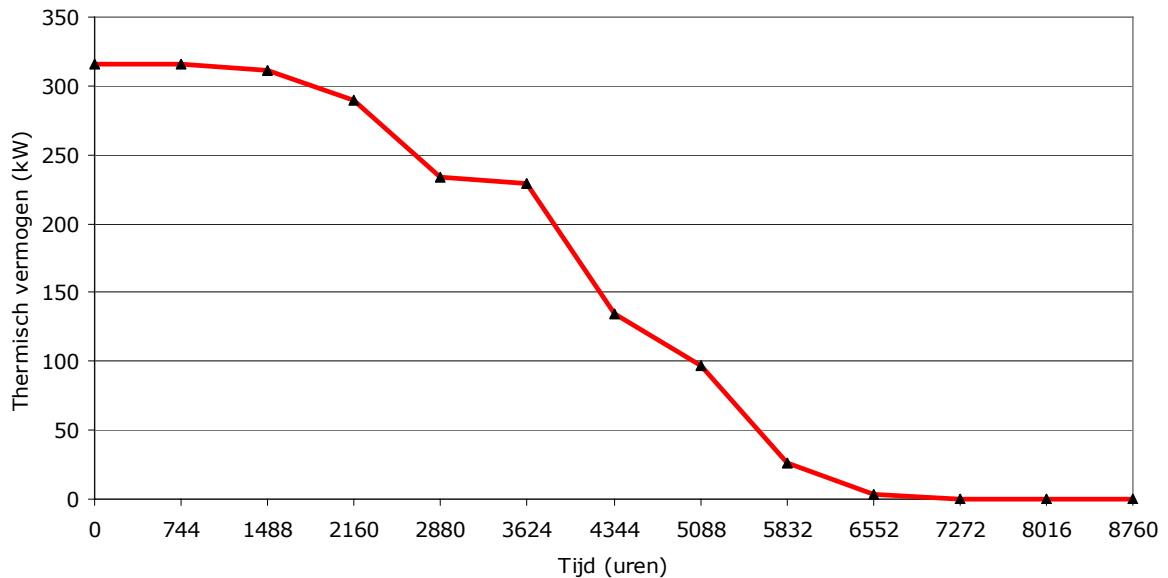
Aangezien er voor dit theoretisch project geen opmeetbare cijfers zijn voor de elektriciteitsvraag, werken we hier met de gemiddelde elektriciteitsvraag voor een gezin. Voor dit gemiddeld elektriciteitsgebruik hanteert de VREG de waarde 3,5 MWh per gezin per jaar. Voor de 100 appartementen samen geeft dit dus een jaarlijkse elektriciteitsvraag van 350 MWh.

We hebben voor de elektriciteitsvraag dus ook geen specifiek profiel per dag of per maand. Daarom zullen we enkel rekening houden met het totaal verbruik aan elektriciteit. We veronderstellen daarbij dat we gebruik kunnen maken van een terugdraaiende elektriciteitsmeter, zodat enkel de nettoproductie of het nettoverbruik in de economische analyse worden beschouwd. We beschouwen het elektriciteitsnet dus als buffer voor elektriciteit.

### 7.3.3 Jaarbelastingsduurcurve van de warmtevraag (jbdc)

Nu we een zicht hebben op de relevante warmtevraag, kunnen we de jaarbelastingsduurcurve opstellen. Deze curve wordt ook wel monofoonogram genoemd. Hiervoor delen we de

maandelijkse warmtevraag door het aantal uren in de bepaalde maand om zo het maandelijks vermogen te verkrijgen. Vervolgens kunnen we het maandelijkse warmtevermogen rangschikken van groot naar klein. Op die manier toont de belastingscurve het aantal uren dat een bepaalde vermogen vereist is. De coördinaten worden in absolute waarden weergegeven.



**Figuur 28: Jaarbelastingsduurcurve voor de warmtevraag**

Voor de elektriciteitsvraag is het niet mogelijk om een jaarbelastingsduurcurve op te stellen omdat we niet over voldoende gegevens beschikken. We beschikken namelijk slechts over de totale jaarlijkse elektriciteitsvraag, en niet over een (maand)profiel. Een gedetailleerde meting bij een vergelijkbaar appartementsgebouw zou ons deze informatie wel kunnen bezorgen. Bij een gedetailleerde haalbaarheidsstudie is deze informatie noodzakelijk om tot een goed besluit te komen.

#### 7.3.4 Keuze van de geschikte technologie

De keuze van de geschikte technologie is vooral afhankelijk van het gewenste temperatuurniveau waarop men de warmte wil recupereren. Globaal kan worden gesteld dat de volgende richtlijnen (Energik, 2004) gelden:

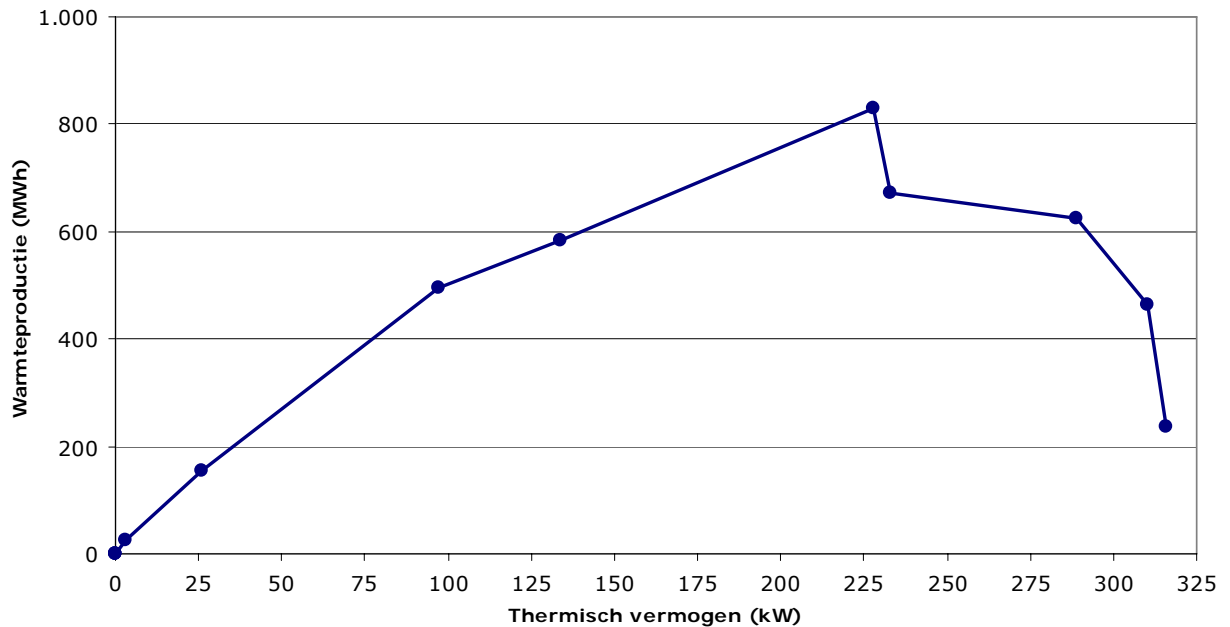
- Vereiste warmte < 120 °C: een interne verbrandingsmotor is de meest geschikte technologie.
- Vereiste warmte > 120 °C: een turbine is de meest geschikte technologie.

Naast deze technologieën zijn er ook andere, veelbelovende, technologieën zoals microturbines, stirlingmotoren en brandstofcellen. Deze zijn voorlopig nog veel duurder (en op kleinere schaal beschikbaar) dan de klassieke technologieën en worden in deze analyse dus niet beschouwd.

In deze situatie is er enkel de behoefte aan warm water voor de verwarming van de gebouwen. Dit betekent dat een interne verbrandingsmotor waarschijnlijk de interessantste optie is.

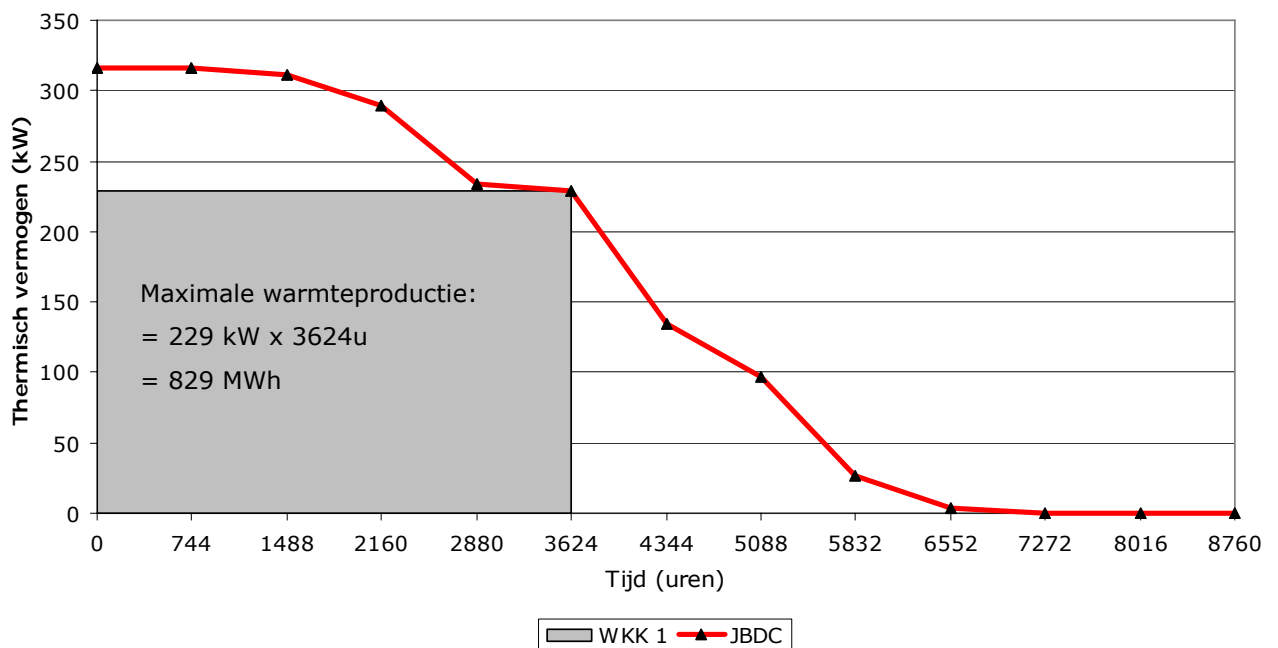
#### 7.4 Dimensionering op warmtevraag

Om een installatie te kiezen die het grootste deel van de totale warmtevraag kan leveren maken we gebruik van een productiecurve waarbij de totale warmteproductie wordt uitgezet ten op zichten van het thermisch vermogen. Hierbij wordt rekening gehouden met het aantal uren dat een bepaalde installatie (met een bepaald vermogen) in vollast kan draaien. Des te groter het vermogen, des te korter is de duurtijd dat deze installatie op vollast kan draaien. Op Figuur 29 zien we dat de maximale jaarlijkse warmteproductie van 829 MWh geleverd kan worden door een warmtekrachtkoppeling met een thermisch vermogen van 229 kW. Dit onder de voorwaarde dat ze enkel wordt ingeschakeld wanneer ze op vollast kan draaien. Deellastwerking is in deze figuur buiten beschouwing gelaten omwille van de complexiteit.



Figuur 29: Productiecurve (warmte)

Indien we dus zoveel mogelijk warmte met de warmtekrachtkoppeling wensen te produceren, is een installatie met een thermisch vermogen van 229 kW dus optimaal. Nu is het ook belangrijk om na te gaan hoelang deze installatie jaarlijks kan draaien. Ze zou liefst zoveel mogelijk uren draaien aangezien dit de rendabiliteit van de installatie ten goede komt (meer primaire energiebesparing en dus meer certificaten). Om dit te visualiseren kunnen we de vorige grafiek ook weergeven op basis van het aantal jaarlijkse draaiuren. We kunnen dus de productiecurve als oppervlak integreren in de jaarbelastingsduurcurve. De volgende figuur geeft dit weer.



**Figuur 30: JBDC en totale warmteproductie**

Op de figuur kunnen we nu zowel het vermogen (kW) als de warmteproductie (MWh) aflezen. We zien nu dat de maximale warmteproductie gerealiseerd kan worden met een installatie met een thermisch vermogen van 229 kW die gedurende 3624 uren of 5 maanden op vollast kan draaien.

#### 7.4.1 Keuze van de geschikte warmtekrachtkoppeling

De streefwaarden proberen we zo goed mogelijk te benaderen. Een warmtekrachtkoppeling die hier goed bij aansluit is de 'ecoGEN 140 SG'. Dit is een interne verbrandingsmotor die op aardgas loopt. Deze installatie is te verkrijgen bij Cogengreen te Spy.. De technische kenmerken van deze machine worden weergegeven.

ecoGEN 140 SG		
$P_e$ : 140 kW	$\alpha_e$ : 36 %	Verbruik : 392 kW
$P_q$ : 216 kW	$\alpha_q$ : 55 %	Kostprijs geïnstalleerd : 280 000 EUR

Het thermisch rendement van 216 kW benadert vrij goed de streefwaarde van 229 kW. De kostprijs van de installatie is niet bekend en wordt geschat op 2000 EUR/MWh<sub>e</sub>, installatie- en aansluitingskosten inbegrepen. Uit de jaarbelastings-duurcurve kunnen we afleiden dat de installatie 3624 uren op vollast kan draaien. De totale warmteproductie, het verbruik, de primaire brandstofbesparing, de RPE en het aantal WKC worden hieronder schematisch weergegeven.

Aantal draaiuren vollast	3624	uren
Thermisch vermogen	216	kW
Geproduceerde warmte per WKK	783	MWh
Elektrisch vermogen	140	kW
Geproduceerde elektriciteit per WKK	507	MWh
Verbruik aardgas (per jaar)	1.421	MWh
Primaire energiebesparing	467	MWh
Relatieve primaire energiebesparing (RPE)	24,87	%
Maximaal aantal WKC/jaar (1 WKC/MWh)	467	WKC

Met behulp van de formules uit hoofdstuk 5 kunnen we het aantal warmtekrachtcertificaten berekenen waarop we recht hebben. Gedurende de eerste vier jaren zijn dit 467 certificaten per jaar. Na deze vier jaren neemt dit aantal degressief af. In de volgende tabel wordt een overzicht gegeven voor 15 jaar.

Jaar	[%]	[aantal]	Jaar	[%]	[aantal]	Jaar	[%]	[aantal]
1	100,00%	467	6	85,13%	397	11	36,88%	172
2	100,00%	467	7	75,48%	352	12	27,24%	127
3	100,00%	467	8	65,83%	307	13	17,59%	82
4	100,00%	467	9	56,18%	262	14	7,94%	37
5	94,77%	442	10	46,53%	217	15	0,50%	2

We zien ook dat de jaarlijkse elektriciteitsproductie (507 MWh) de jaarlijkse elektriciteitsvraag van 350 MWh overstijgt. Het overschot aan elektriciteit (157 MWh) wordt bijgevolg verkocht op de vrije elektriciteitsmarkt.

#### 7.4.2 Keuze van het alternatief

Om een economische analyse te kunnen maken van deze situatie *met* warmtekrachtkoppeling moeten we ze vergelijken met de situatie *zonder* warmtekrachtkoppeling. Het alternatief voor een warmtekrachtkoppelinginstallatie is een hoog rendement ketel. De totale elektriciteit wordt in dit alternatief aangekocht tegen marktprijzen

De keuze voor de ketels komt uit bij de Viesmann Vitodens 200-W. Deze installatie kan maximaal met 4 units tegelijkertijd werken en bestaat in twee vermogensversies (45 en 60 kW<sub>th</sub>). De technische gegevens en prijzen zijn samengevat in het volgende schema. (Viesmann, 2008)

Viesmann Vitodens 200-W		
P <sub>q</sub> : 45 kW	α <sub>q</sub> : 98 %	Kostprijs geïnstalleerd* : 3 632 EUR
P <sub>q</sub> : 60 kW	α <sub>q</sub> : 98 %	Kostprijs geïnstalleerd* : 3 875 EUR

(\* inclusief geschatte installatiekost van 500 EUR)

Om een goede vergelijking te maken kiezen we er voor om de ketels zo te kiezen dat het totaal thermisch vermogen ook hier op ongeveer 216 kW komt. Dit bereiken we door 2 ketels van 60 kW en 2 ketels van 45 kW. De totaal geproduceerde warmte stellen we gelijk aan de waarde van de warmtekrachtkoppeling. In volgende tabel wordt een overzicht gegeven van de data voor dit alternatief.

Gasketel nr.	1	2	3	4	Totaal	
Thermisch vermogen	45	45	60	60	210	kW
Geproduceerde warmte (idem WKK)					783	MWh
Verbruik aardgas (per jaar)					799	MWh

### 7.4.3 Reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot

Met de gegevens uit de dimensionering kunnen we nu gaan berekenen hoeveel CO<sub>2</sub>-uitstoot we kunnen voorkomen door een warmtekrachtkoppeling te installeren. Hiervoor vergelijken we de uitstoot voor beide alternatieven. De CO<sub>2</sub>-emissiefactor voor aardgas bedraagt 201 kg/MWh (Vlaams Agentschap Economie, 2008a). Deze waarde wordt zowel gebruikt voor de warmtekrachtkoppeling als voor de gasboiler. De waarde die we hanteren voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de elektriciteitsproductie is deze van de gemiddelde Belgische elektriciteitscentrale: 272 kg/MWh<sub>e</sub>. Deze relatief lage waarde is te wijten aan het grote aandeel van nucleaire energie in de totale elektriciteitsproductie. (De Paepe et al., 2006)

**Tabel 14: Vermindering van de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-uitstoot (warmtegedimensioneerd)**

<u>Gescheiden productie</u>		
Aankoop elektriciteit	350 MWh	95,2 ton
Verbruik aardgas	799 MWh	160,6 ton
<b>Totale CO<sub>2</sub>-uitstoot</b>		<b>255,8 ton</b>

<u>Warmtekrachtkoppeling</u>		
Aankoop elektriciteit	-157 MWh	-42,7 ton
Verbruik aardgas	1421 MWh	285,6 ton
<b>Totale CO<sub>2</sub>-uitstoot</b>		<b>242,9 ton</b>

<b>Vermindering CO<sub>2</sub>-uitstoot</b>		<b>12,9 ton</b>
---	--	-----------------

We zien dat deze warmtekrachtkoppeling potentieel heeft om jaarlijks 12,9 ton minder CO<sub>2</sub> in de atmosfeer uit te stoten dan een gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit. Dit is een reductie van 5% ten opzichte van de referentie. Hierbij is de invloed van de gekozen referentie uitstoot voor elektriciteitsproductie van groot belang. We hebben hier gekozen voor het algemeen gemiddelde, maar men zou ook kunnen vergelijken met een STEG centrale ( $\alpha_e = 50\%$ ). Hiermee vergeleken, zou de vermindering per jaar 78,8 ton CO<sub>2</sub> bedragen, een reductie van 26,2%.

Met behulp van deze gegevens kunnen we de economische analyse uitvoeren. Eerst beschouwen we nog een andere dimensionering, namelijk de dimensionering op elektriciteitsvraag.

## 7.5 Dimensionering op elektriciteitsvraag

Aangezien elektriciteit gemakkelijker te 'vervoeren' is dan warmte, verdient een warmtegedimensioneerd systeem meestal de voorkeur. Er zijn echter ook argumenten die pleiten voor een dimensionering op elektriciteitsvraag. Met de vrijmaking van de elektriciteitsmarkt wordt de teruglevering van overtollige elektriciteit niet aantrekkelijk vergoed. De verkoopprijzen van elektriciteit liggen namelijk (veel) lager dan de aankooprijzen. Daarenboven zouden de aangeboden hoeveelheden elektriciteit op de vrije markt bijzonder klein zijn wat ze minder aantrekkelijk maken voor potentiële kopers. Omwille van deze redenen kan er toch voor gekozen worden om te dimensioneren op elektriciteit. We houden in deze analyse dan ook beide opties open en kiezen dus voor een tweede situatie waarbij we dimensioneren op elektriciteit.

De dimensionering op elektriciteitsvraag gebeurt normaal gezien aan de hand van een jaarbelastingsduurcurve voor elektriciteit. Maar over deze gegevens beschikken we in deze gevalstudie niet. We rekenen dus enkel met de totale jaarlijkse elektriciteitsvraag (350 MWh). Dit wil dus zeggen dat we een situatie kiezen waarbij de jaarlijkse elektriciteitsproductie de jaarlijkse vraag zo goed mogelijk benaderd. We gaan er ook vanuit dat we beschikken over een terugdraaiende meter, zodat de tijdsdimensie geen rol speelt voor de elektriciteit.

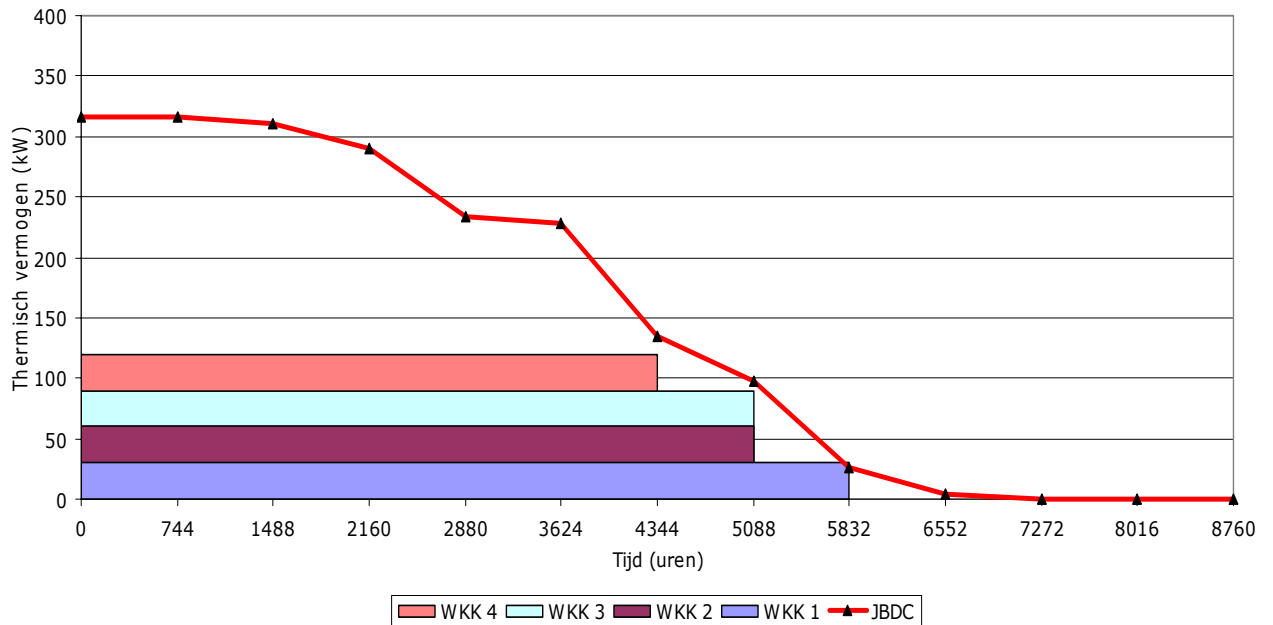
### 7.5.1 Keuze van de geschikte warmtekrachtkoppeling

De warmtekrachtkoppeling die we hiervoor kiezen is de EC POWER XRGI 15G. Deze interne verbrandingsmotor draait op aardgas en is te verkrijgen bij Ineltra Systems te Genk. De technische gegevens van deze warmtekrachtkoppeling zijn weergegeven in de volgende tabel, net zoals de totale kostprijs die Ineltra Systems aanrekent voor deze installatie.

EC Power XRGI 15G		
$P_e$ : 15,2 kW	$\alpha_e$ : 30 %	Verbruik : 50 kW
$P_q$ : 30 kW	$\alpha_q$ : 62 %	Kostprijs geïnstalleerd : 55 000 EUR

Van deze machine kunnen er maximaal 5 in parallel werken. Dit geeft ons het voordeel dat we beter kunnen optimaliseren naar de jaarproductie toe van 350 MWh<sub>e</sub>. We rekenen ook hier enkel met vollastwerking. De optimalisatie duidt aan dat er 4 machines in parallel zouden moeten werken. In de volgende figuur worden hun jaarlijkse draaiuren met behulp van met de jaarbelastingsduurcurve voor warmte weergegeven.





**Figuur 31: Dimensionering op elektriciteit met 4 WKK's**

De totale warmte- en elektriciteitsproductie van deze vier warmtekrachtkoppelingen wordt bepaald door hun jaarlijkse draaiuren. Hetzelfde geldt voor het aardgasverbruik, de primaire energiebesparing, de RPE en het aantal WKC waarop we recht hebben. Hierna worden deze gegevens schematisch weergegeven.

Warmtekrachtkoppeling nr.	1	2	3	4	Totaal	
Aantal draaiuren vollast	5.832	5.088	5.088	4.344		uren
Thermisch vermogen	30	30	30	30	120	kW
Geproduceerde warmte per WKK	175	153	153	130	611	MWh
Elektrisch vermogen	15	15	15	15	61	kW
Geproduceerde elektriciteit per WKK	89	77	77	66	309	MWh
Verbruik aardgas (per jaar)	292	254	254	217	1.018	MWh
Primaire energie besparing					298	MWh
Rel. primaire energiebesparing (RPE)					22,41	%
Maximaal aantal WKC/jaar (1 WKC/MWh)					298	WKC

We zien dat de totale elektriciteitsproductie 309 MWh per jaar bedraagt. De warmtekrachtkoppelinginstallaties voorzien dus 88% van de jaarlijkse elektriciteitsvraag van 350 MWh. De rest van de elektriciteit wordt verondersteld aangekocht te worden tegen marktprijzen. De jaarlijkse warmteproductie bedraagt in deze situatie 611 MWh. Met behulp van de formules uit hoofdstuk 5 kunnen we het aantal warmtekrachtcertificaten berekenen waarop we recht hebben. Gedurende de eerste vier jaren zijn dit 298 certificaten per jaar. Na deze jaren kunnen we de ratio toepassen om het aantal certificaten per jaar te bepalen. Deze data wordt in de volgende tabel getoond.

Jaar	[%]	[aantal]	Jaar	[%]	[aantal]	Jaar	[%]	[aantal]
1	100,00%	298	6	83,49%	249	11	29,95%	89
2	100,00%	298	7	72,78%	217	12	19,25%	57
3	100,00%	298	8	62,08%	185	13	8,54%	25
4	100,00%	298	9	51,37%	153	14	0,47%	1
5	94,20%	281	10	40,66%	121	15	0,00%	0

### 7.5.2 Keuze van het alternatief

Ook voor deze situatie bekijken we het alternatief *zonder* warmtekrachtkoppeling. De warmtekrachtkoppelinginstallaties worden ook hier vervangen door hoog rendement ketels. De totale elektriciteit wordt in dit alternatief aangekocht tegen marktprijzen. Ook hier kiezen we voor de Viesmann Vitodens 200-W. Deze installatie kan maximaal met 4 units tegelijk werken. De technische gegevens en prijzen zijn samengevat in het volgende schema. (Viesmann, 2008)

Viesmann Vitodens 200-W
$P_q$ : 60 kW $\alpha_q$ : 98 %    Kostprijs geïnstalleerd* : 3 875 EUR

(\* inclusief geschatte installatiekost van 500 EUR)

Om een goede vergelijking te maken kiezen we er voor om twee van dergelijke ketels te installeren. Dit brengt het totaal thermisch vermogen ook hier op 120 kW. De geproduceerde warmte stellen we gelijk aan de waarde van de warmtekrachtkoppeling. In volgende tabel wordt een overzicht gegeven van de data voor dit alternatief.

Gasketel nr.	1	2	Totaal	
Thermisch vermogen	60	60	120	kW
Geproduceerde warmte (idem WKK)			611	MWh
Verbruik aardgas (per jaar)			623	MWh

### 7.5.3 Reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot

Ook voor deze situatie kunnen we de reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot berekenen. Hiervoor gaan we analoog te werk als in de eerst situatie. De resultaten die we bekomen worden in de volgende tabel weergegeven.

**Tabel 15: Vermindering van de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-uitstoot (elektriciteitsgedimensioneerd)**

<u>Gescheiden productie</u>		
Aankoop elektriciteit	350 MWh	95,2 ton
Verbruik aardgas	623 MWh	125,2 ton
Totale CO <sub>2</sub> -uitstoot		220,4 ton

<u>Warmtekrachtkoppeling</u>		
Aankoop elektriciteit	41 MWh	11,2 ton
Verbruik aardgas	1018 MWh	204,6 ton
Totale CO <sub>2</sub> -uitstoot		215,8 ton

<b>Vermindering CO<sub>2</sub>-uitstoot</b>	<b>4,7 ton</b>
---	----------------

Hier heeft de warmtekrachtkoppeling het potentieel om jaarlijks 4,7 ton minder CO<sub>2</sub> in de atmosfeer uit te stoten, dan een gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit. Dit is een reductie van 2,1% ten opzichte van de gekozen referentie. Wanneer we zouden vergelijken met een STEG centrale voor de elektriciteitsproductie ( $\alpha_e = 50\%$ ), dan zou de vermindering per jaar 44,8 ton CO<sub>2</sub> bedragen, een reductie van 16,9%.

### 7.6 Opstellen van het economisch model

In het economisch model dat we hier gebruiken worden de 2 alternatieven met elkaar vergeleken over een looptijd van 15 jaar. Deze looptijd is gekozen aangezien de WKC in deze gevallen maximum 15 jaar worden toegekend. Naast de investeringskosten, die hiervoor al aan bod kwamen, worden de onderhoudskosten toegekend a ratio van 15 EUR/MWh<sub>e</sub>. Voor elk alternatief worden de jaarlijkse kosten berekend. Hiermee kunnen we vervolgens het verschil in kosten per jaar berekenen tussen de beide alternatieven. Deze (relatieve) cashflow laat ons toe om de netto contante waarde over de beschouwde periode te berekenen. Is deze waarde

positief, dan betekent dit dat de keuze voor een warmtekrachtkoppeling economisch verantwoord is en dus een kostenbesparing wordt gerealiseerd. Wanneer de NCW negatief is wilt dit zeggen dat een warmtekrachtkoppeling, vanuit economisch standpunt gezien, niet interessant is.

Voor de diverse parameters in het model gebruiken we scenario's. Dit wil zeggen dat er scenario's worden opgesteld voor aardgasprijzen, elektriciteitsprijzen en warmtekrachtcertificaten. Het gebruik van scenario's is interessant aangezien deze parameters in de toekomst kunnen veranderen en we zo dus hun invloed op de rendabiliteit van het project goed kunnen inschatten. Voor elk scenario wordt het economisch model opnieuw uitgerekend. Deze scenario's komen in de volgende paragraaf aan bod.

## 7.7 Keuze van de scenario's voor de diverse parameters

### 7.7.1 Gas- en elektriciteitsprijzen

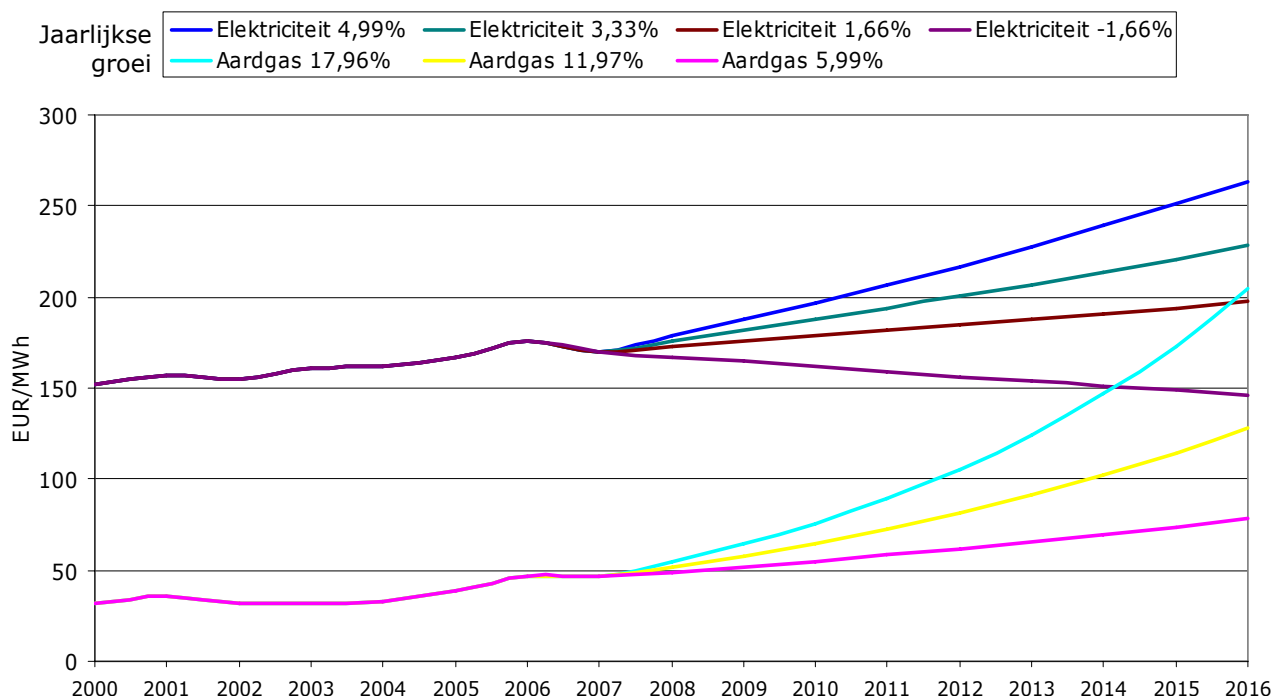
Voordat we veronderstellingen kunnen maken over de mogelijke evoluties van de energieprijzen moeten we eerst kijken naar de historische prijzen van aardgas en elektriciteit. De jaarlijkse gemiddelde prijzen voor huishoudelijk gebruik van 2000 tot 2007 worden hieronder weergegeven. (FOD Economie, 2008)

**Tabel 16: Historische evolutie van de energieprijzen**

Jaar	Aardgas [EUR/MWh]	Jaarlijkse evolutie [%/jaar]	Elektriciteit [EUR/MWh]	Jaarlijkse evolutie [%/jaar]
2000	31,80		152,0000	
2001	35,40	11,32%	157,00	3,29%
2002	31,90	-9,89%	155,00	-1,27%
2003	32,00	0,31%	161,00	3,87%
2004	33,00	3,13%	162,00	0,62%
2005	39,00	18,18%	167,00	3,09%
2006	47,00	20,51%	176,00	5,39%
2007*	46,21	-1,67%	170,11	-3,34%
<b>Gemiddelde prijsstijging</b>		<b>5,99%</b>		<b>1,66%</b>

\*Eigen berekening op basis van gegevens van de VREG (VREG, 2008g)

We zien dat de aardgasprijs de laatste jaren gemiddeld 5,99% per jaar gestegen is. Dit is een sterkere stijging dan deze van de elektriciteitsprijzen. Hier bedraagt de jaarlijkse stijging gemiddeld 1,66%. Aangezien de evolutie van deze prijzen van grote invloed is op de rendabiliteit gebruiken we verschillende scenario's zodat we kunnen nagaan welke scenario's gunstig en welke scenario's ongunstig zijn. Hierbij werken we met 'groefactoren'. Dit wil zeggen dat we bijvoorbeeld met groefactor twee, een verdubbeling van het stijgingspercentage veronderstellen. Ook beschouwen we de situatie waarbij het stijgingspercentage gelijk blijft. Voor elektriciteit veronderstellen we daarnaast ook een daling van de prijzen, aangezien die mogelijkheid in de toekomst bestaat moest bijvoorbeeld kernfusie doorbreken. Deze prijsevoluties voor gas en elektriciteit worden in de volgende figuur grafisch weergegeven.



**Figuur 32: Mogelijke evoluties van de energieprijzen**

Met deze mogelijke prijsevoluties kunnen we nu een aantal mogelijke combinaties maken van de aardgas- en elektriciteitsprijzen. Deze combinaties worden nu de scenario's voor de energieprijzen. Hierbij is scenario 2 de 'huidige' situatie, namelijk de situatie waarin de aardgasprijs jaarlijks 5,99% stijgt en de elektriciteitsprijs jaarlijks 1,66% stijgt. De 10 scenario's die we in deze economische analyse hanteren zijn de volgende:

**Tabel 17: 10 scenario's voor de evoluties van de energieprijzen**

<i>Jaarlijkse evolutie van de aardgasprijs</i>	<i>Jaarlijkse evolutie van de elektriciteitsprijs</i>			
	-1,66%	1,66%	3,33%	4,99%
5,99%	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	
11,97%	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	
17,96%	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10

### 7.7.2 Warmtekrachtcertificaten

Naast de energieprijzen is ook de prijs van de warmtekrachtcertificaten van invloed op de economische rendabiliteit van een project. Aangezien de prijs van de warmtekrachtcertificaten niet voor 20 jaar gegarandeerd is, zoals bij de productie van elektriciteit uit zonne-energie, gaan we hier ook gebruik maken van veronderstellingen. Een manier om de boeteprijs van deze WKC te bepalen, is deze baseren op de vermeden externe kosten. In hoofdstuk 5 werd dit aspect al besproken. We konden daar concluderen dat deze vermeden externe kosten zich tussen 3 EUR/MWh<sub>e</sub> en 90 EUR/MWh<sub>e</sub> situeerden, afhankelijk van de gekozen referentie. Daarom stellen we in onderstaand overzicht een vijftal scenario's voor, gebaseerd op deze vermeden externe kosten. Dit is interessant omdat we op die manier ook de invloed van de prijs van de WKC op de rendabiliteit van het project kunnen onderzoeken.

**Tabel 18: 5 scenario's voor de prijzen van de WKC**

	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E
Boeteprijs [EUR]	3,00	25,00	45,00	65,00	90,00
Marktprijs [EUR]	2,77	23,08	41,55	60,01	83,10

\*gebaseerd op de verhouding marktprijs/boeteprijs voor 2007 (92,33%)

## 7.8 Economische haalbaarheidsanalyse

### 7.8.1 Dimensionering op warmte

Zoals we reeds gezien hebben bij de technische dimensionering, is er in deze situatie een netto elektriciteitsoverschot. Dit overschot moeten we verkopen op de vrije markt. Deze verkoopprijs ligt veel lager dan de aankoopprijs van elektriciteit. De verkoopprijs die we hier hanteren

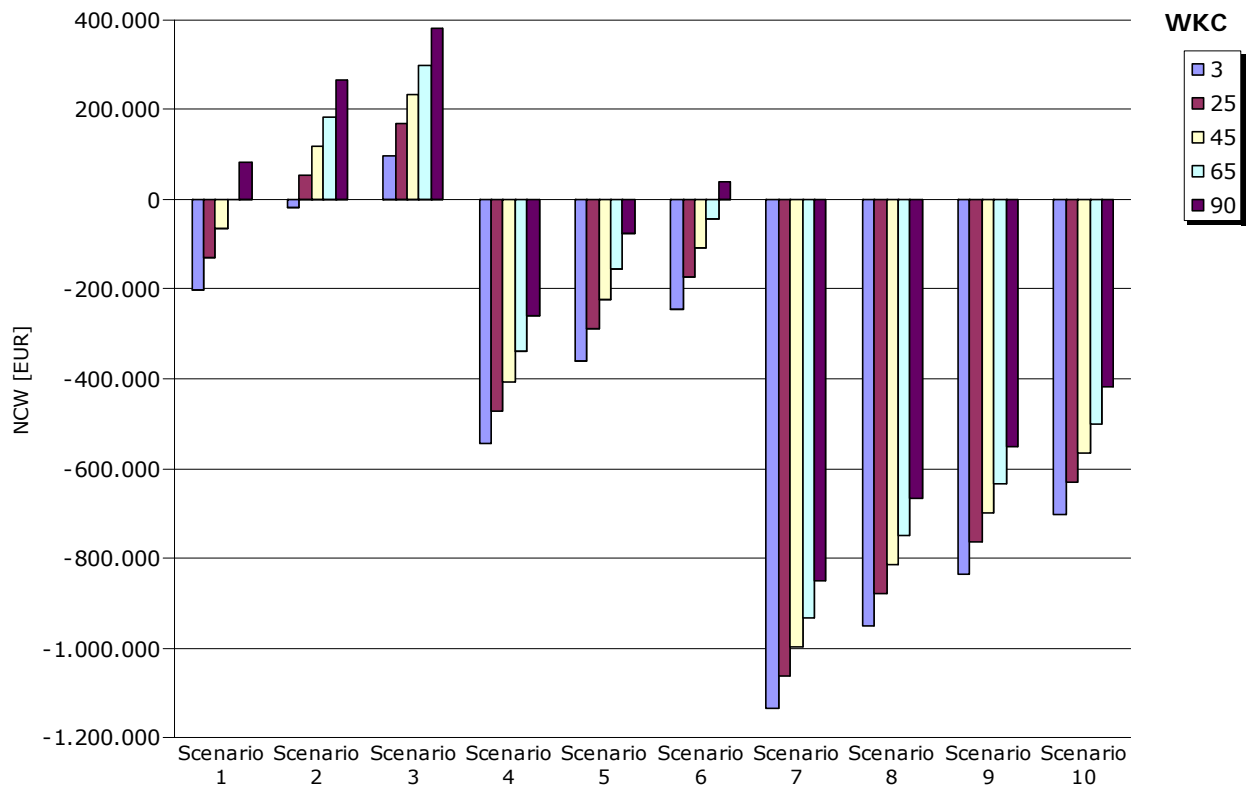
bedraagt 22,5 EUR/MWh voor het jaar 2005 (De Paepe et al., 2006). Omdat de verkoopprijs ook evolueert in de tijd koppelen we deze aan de evolutie van de aankoopprijs van elektriciteit zoals hiervoor werd beschreven.

De opzet van de berekeningen met alle kosten en opbrengsten over de verschillende jaren wordt weergegeven in bijlage 3. Deze geeft als voorbeeld de berekeningen weer voor scenario 1. We stellen hierbij de jaarlijkse cashflows op voor beide alternatieven (met en zonder warmtekrachtkoppeling) en rekenen daarna het verschil uit tussen de jaarlijkse cashflows van beide alternatieven. Dit verschil wordt vervolgens verdisconteert aan een percentage van 3%. Op deze manier verkrijgen we de netto contante waarde (NCW) van de investeringsbeslissing. Is deze waarde positief, dan betekent dit dat de keuze voor een warmtekrachtkoppeling economisch interessant is. Wanneer de NCW negatief is wilt dit zeggen dat een warmtekrachtkoppeling, vanuit economisch standpunt gezien, niet interessant is.

Deze economische analyse wordt uitgevoerd voor de 50 verschillende scenario's (5 scenario's voor de WKC x 10 scenario's voor de energieprijzen). De resultaten voor deze scenario's worden op de volgende figuur grafisch weergegeven. De figuur geeft de netto contante waarde weer voor elk scenario van de energieprijzen (zie Tabel 17), gecombineerd met de verschillende scenario's van de prijzen van de WKC (zie Tabel 18). De exacte cijfers van deze figuur zijn opgenomen in bijlage 4.

<i>Jaarlijkse evolutie van de aardgasprijs</i>	<i>Jaarlijkse evolutie van de elektriciteitsprijs</i>			
	-1,66%	1,66%	3,33%	4,99%
5,99%	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	
11,97%	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	
17,96%	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10

Bij deze dimensionering op warmte zien we duidelijk de invloed van de WKC op de rendabiliteit. Beschouwen we de huidige situatie (= scenario 2), dan zien we dat het project met de huidige WKC een rendabel project is. Enkel wanneer de prijs van de WKC zou dalen tot 3 EUR/MWh zou het economisch niet interessant zijn. Desondanks blijkt dat slechts in vier scenario's van de energieprijzen (1, 2, 3 en 6), een warmtekrachtkoppeling rendabel kan zijn. Kijken we meer specifiek naar de huidige situatie, met een boeteprijs van 45 EUR per certificaat, dan blijven er nog slechts twee scenario's (2 en 3) over waarbij het project rendabel kan zijn. De prijs van de WKC zou moeten worden verhoogd tot 90 EUR om in alle vier de scenario's een rendabel project te bekomen. De scenario's 7 tot en met 10 zijn nooit rendabel, ook niet met de hoogste WKC. Dit is te wijten aan de zeer hoge aardgasprijsstijging in deze scenario's (zie Tabel 17: jaarlijks 17,96% prijsstijging).



**Figuur 33: NCW voor de dimensionering op warmte**

Deze analyse toont ten eerste aan dat het zeer belangrijk is om de evolutie van de energieprijzen goed in te schatten, zodat de juiste conclusies getrokken kunnen worden omtrent de haalbaarheid van het project. Een verkeerde inschatting kan namelijk zware financiële gevolgen hebben. Ten tweede toont deze analyse aan dat de WKC belangrijk zijn om de projecten rendabel te maken. Met de laagste WKC prijs in deze analyse (3 EUR/MWh) zou de huidige situatie (scenario 2) niet rendabel zijn en zou enkel scenario 3 een gunstig resultaat opleveren.

In plaats van de NCW als maatstaf voor de economische rendabiliteit van een project kunnen we ook gebruik maken van het intern rendement (IR). Aangezien de conclusies toch dezelfde zijn, wordt het IR van het project hier niet verder behandeld. De waardes zijn wel opgenomen in bijlage 5 en kunnen dus daar bekeken worden. (Enkel de positieve rendementen zijn hierbij opgenomen.)

Om nu een beter overzicht te hebben op de rendabiliteit van dit project, wordt er nu een analyse gemaakt van de NCW voor de verschillende scenario's. We werken hierbij met het programma SPSS. De bedoeling is een inzicht te krijgen op de invloed van de 3 parameters



(aardgasprijs, elektriciteitsprijs en prijs WKC) op de NCW (afhankelijke variabele) van het project. Dit doen we door een lineaire regressie uit te voeren op deze data. De output van dit model is opgenomen in bijlage 6. Het voordeel van zulke analyse is dat de NCW zeer eenvoudig (benaderend) kan berekend worden door enkel deze drie parameters in te vullen in het model. Het lineair model dat we via SPSS verkregen hebben is het volgende:

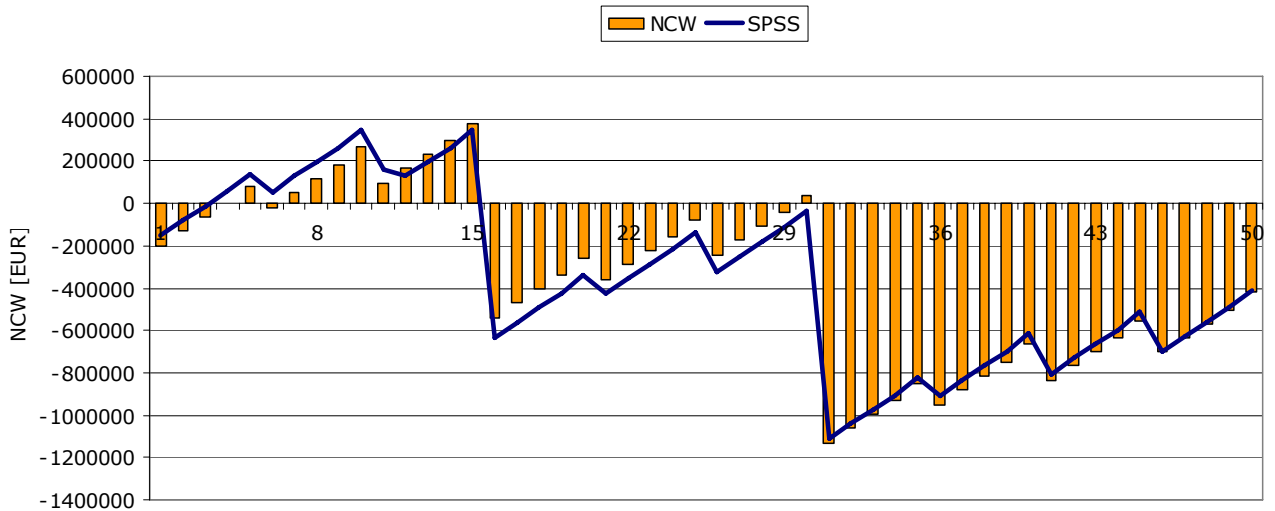
$$\begin{aligned} \text{NCW} &= 421\,720 \text{ EUR} \\ &- [80\,317 \text{ EUR} \times (\text{jaarlijkse prijsstijging aardgas in \%})] \\ &+ [61\,959 \text{ EUR} \times (\text{jaarlijkse prijsstijging elektriciteit in \%})] \\ &+ [3\,352 \text{ EUR} \times (\text{boeteprijs WKC})] \end{aligned}$$

Het model laat dus zien dat de NCW van het project (421 720 EUR):

- 1) Daalt met 80 317 EUR voor elke jaarlijkse % stijging van de aardgasprijs;  
(vb. stijgt de aardgasprijs jaarlijks met 7%, dan daalt de NCW met 562 219 EUR)
- 2) Stijgt met 61 959 EUR voor elke jaarlijkse % stijging van de elektriciteitsprijs;  
(vb. stijgt de elektriciteitsprijs jaarlijks met 3%, dan stijgt de NCW met 185 877 EUR)
- 3) Stijgt met 3 352 EUR per euro steun met warmtekrachtcertificaten.  
(vb. bedraagt de prijs van de WKC 45 EUR, dan stijgt de NCW met 150 840 EUR)

We zien hier ook goed de wisselwerking tussen de invloed van de prijsstijgingen van aardgas en elektriciteit op de rendabiliteit. In de situatie waarbij de elektriciteitsprijs sterker stijgt dan de aardgasprijs vormt er zich geen probleem, integendeel. Het is de (meer waarschijnlijke) situatie waarbij de aardgasprijs sterker stijgt dan de elektriciteitsprijs dat er voorzichtigheid geboden is. Beide prijsevoluties mogen niet teveel afwijken van elkaar om het project rendabel te maken. Dankzij dit eenvoudige model kan de NCW echter snel berekend worden.

Het model blijkt bijzonder goed de werkelijke NCW te benaderen, getuige de R-kwadraat waarde van 97,9%. Om de goede matching van het model aan te tonen zetten we in de volgende figuur de NCW voor de 50 beschouwde scenario's (5 scenario's voor de WKC x 10 scenario's voor de energieprijzen) naast elkaar. Vervolgens berekenen we voor elke situatie met behulp van het model opnieuw de NCW ('SPSS' genoemd in de figuur). Het is duidelijk dat dit eenvoudig model een goede indicatie is voor de werkelijke NCW die veel complexer berekend moet worden.



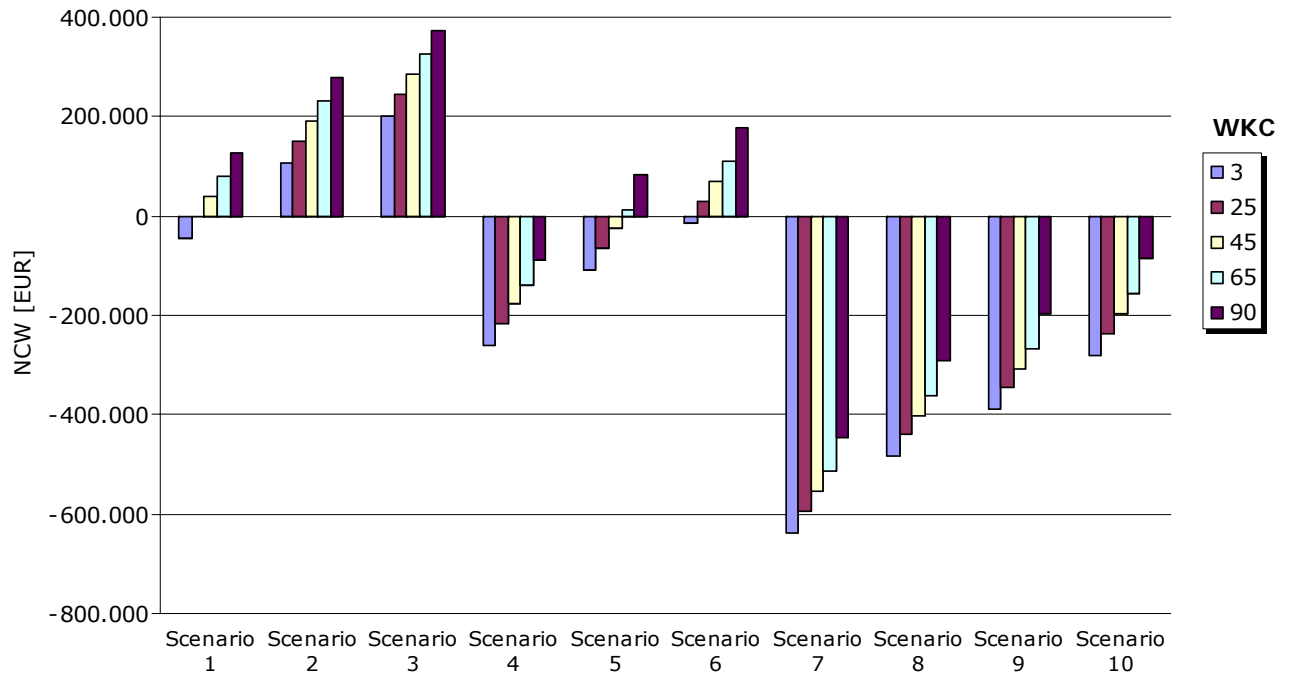
**Figuur 34: Matching van het model voor de dimensionering op warmte**

### 7.8.2 Dimensionering op elektriciteit

Aangezien er in deze situatie geen elektriciteit wordt verkocht aan het net, is de verkoopprijs ervan hier niet relevant. Zoals blijkt uit de technische dimensionering moet er wel nog een klein gedeelte elektriciteit (12%) jaarlijks worden aangekocht. Dit gebeurt tegen marktprijzen. De gedetailleerde berekeningen met alle kosten en opbrengsten over de verschillende jaren wordt voor deze dimensionering weergegeven in bijlage 7. Deze bijlage geeft als voorbeeld de berekeningen weer voor scenario 1. Ook hier stellen we de jaarlijkse cashflows op voor beide alternatieven zodat we het verschil kunnen bepalen tussen de jaarlijkse cashflows van beide alternatieven. Deze cashflows worden vervolgens verdisconteert aan een percentage van 3%.

Deze economische analyse wordt hier uitgevoerd voor dezelfde 50 scenario's (10 scenario's voor de energieprijzen x 5 scenario's voor de WKC). De NCW voor al deze scenario's worden op de volgende figuur weergegeven. De diverse scenario's worden hierna ook opgenomen. De exacte cijfers van de NCW zijn opgenomen in bijlage 8. Ook hier wordt het IR van het project niet verder behandeld. Deze waardes kunnen geraadpleegd worden in bijlage 9.

<i>Jaarlijkse evolutie van de aardgasprijs</i>	<i>Jaarlijkse evolutie van de elektriciteitsprijs</i>			
	-1,66%	1,66%	3,33%	4,99%
5,99%	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	
11,97%	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	
17,96%	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10



**Figuur 35: NCW voor de dimensionering op elektriciteit**

In de huidige situatie (scenario 2) is dit project duidelijker rendabeler dan de dimensionering op warmte. Er zijn voor de huidige situatie zelfs geen WKC nodig om het project rendabel te maken. Bij deze dimensionering zien we wel weer duidelijk de invloed van de WKC op de rendabiliteit in het algemeen. Er zijn hier echter vijf scenario's van de energieprijzen (1, 2, 3, 5 en 6), waarbij de warmtekrachtkoppeling rendabel kan zijn. Dit is één scenario meer dan bij de dimensionering op warmte. Bekijken we de huidige situatie (45 EUR per certificaat), dan zijn er vier scenario's (1, 2, 3 en 6) waarbij het project rendabel zou zijn. Dit is opmerkelijk beter dan bij de dimensionering op warmte waar slechts twee scenario's (2 en 3) rendabel blijken te zijn. De scenario's 7 tot en met 10 zijn ook hier nooit rendabel. Dit is te wijten aan de zeer hoge aardgasprijsstijging in deze scenario's (zie Tabel 17: 17,96% jaarlijkse prijsstijging).

Hier zien we dus ook weer het grote belang van de prijsevoluties van aardgas en elektriciteit op de rendabiliteit. Een goede inschatting van deze parameters is dus noodzakelijk om een juiste conclusie te kunnen trekken over de rendabiliteit.

Ook in voor deze dimensionering wordt een analyse gemaakt met SPSS van de verschillende scenario's om daarmee een model te kunnen opstellen. We krijgen dan een duidelijker beeld van de invloed van de 3 parameters (aardgasprijs, elektriciteitsprijs en prijs WKC) op de NCW van het project. De output van dit model is opgenomen in bijlage 10. Het lineair model voor deze situatie is gelijkaardig aan het vorige en wordt op de volgende pagina weergegeven.

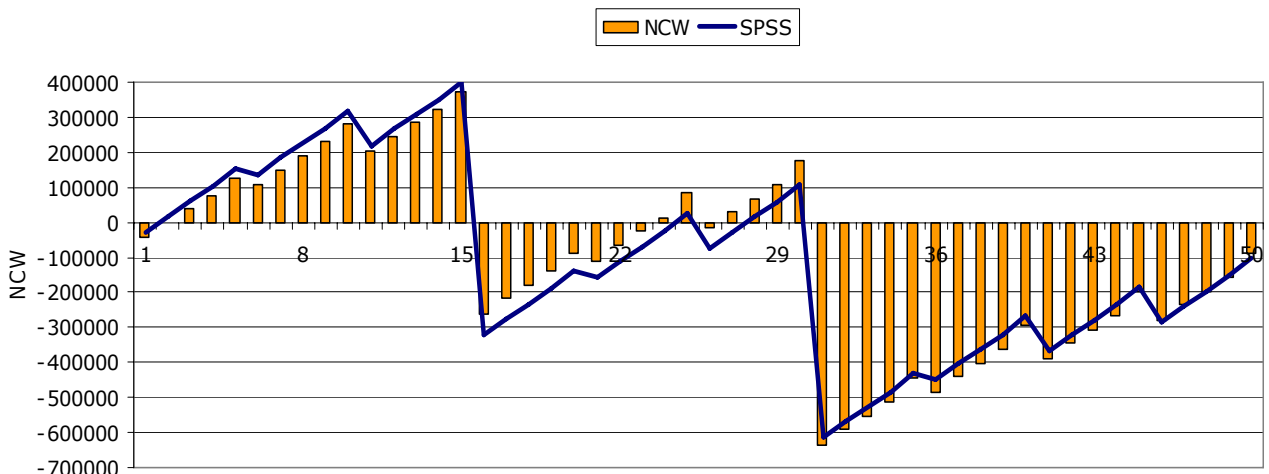
$$\begin{aligned} \text{NCW} &= 341\,555 \text{ EUR} \\ &- [48\,969 \times (\text{jaarlijkse prijsstijging aardgas in \%})] \\ &+ [49\,566 \text{ EUR} \times (\text{jaarlijkse prijsstijging elektriciteit in \%})] \\ &+ [2\,097 \text{ EUR} \times (\text{boeteprijs WKC})] \end{aligned}$$

Het model laat dus zien dat de NCW van het project (341 555 EUR):

- 1) Daalt met 48 969 EUR voor elke jaarlijkse % stijging van de aardgasprijs  
(vb. stijgt de aardgasprijs jaarlijks met 7%, dan daalt de NCW met 342 783 EUR)
- 2) En stijgt met 49 566 EUR voor elke jaarlijkse % stijging van de elektriciteitsprijs  
(vb. stijgt de elektriciteitsprijs jaarlijks met 3%, dan stijgt de NCW met 148 698 EUR)
- 3) En stijgt met 2 097 EUR per euro steun met warmtekrachtcertificaten.  
(vb. bedraagt de prijs van de WKC 45 EUR, dan stijgt de NCW met 94 365 EUR)

Nu kunnen we duidelijk de wisselwerking tussen de prijsevoluties van aardgas en elektriciteit aantonen. Voor dit project waarbij gedimensioneerd wordt op elektriciteit is de invloed van beide parameters zelfs (bijna) gelijk. Met de huidige WKC prijs kunnen we eenvoudig concluderen dat de NCW positief blijft zolang de aardgasprijs niet meer dan 8,9% meer stijgt per jaar dan de elektriciteitsprijs. Zolang de stijging onder deze grens zit is het project dus rendabel.

Het model benadert ook hier de werkelijke NCW zeer goed. De R-kwadraat bedraagt ook hier 97,9%. Visueel kunnen we dit goed aantonen door de werkelijke NCW van de 50 beschouwde scenario's naast de NCW van het eenvoudig model te plaatsen ('SPSS' genoemd in de figuur). De volgende figuur geeft dit weer. Ook dit eenvoudig model is dus een goede indicatie voor de werkelijke NCW (die veel complexer berekend moet worden).



**Figuur 36: Matching van het model voor de dimensionering op elektriciteit**

### **7.8.3 Bemerkingen bij de economische analyse**

Bij deze economische analyse moeten we een belangrijke bemerking maken. De vrije keuze voor een elektriciteitsleverancier heeft namelijk een negatieve invloed op de rendabiliteit. Indien niet alle bewoners ervoor zouden kiezen om de geproduceerde elektriciteit van de warmtekrachtkoppeling tegen marktprijzen aan te kopen, moet dit overschot tegen lagere prijzen worden verkocht op de vrije markt. Hierdoor kunnen de inkomsten aanzienlijk dalen. Bewoners zouden deze keuze kunnen maken omwille van overtuiging. Misschien wensen zij enkel hernieuwbare energie te consumeren. En de beschouwde installaties werken beide op aardgas. Een mogelijke oplossing die dit risico kan wegnemen is een warmtekrachtkoppeling op biogas. Ook het onderdimensioneren van een installatie kan een mogelijkheid zijn om toch voldoende 'eigen' afnemers van elektriciteit te hebben. Daarnaast kan er ook een lange termijn contract worden aangegaan waarbij de bewoners de afname van elektriciteit voor de levensduur van de installatie garanderen. Een eventuele schadevergoeding zou dan kunnen worden gevraagd wanneer een bewoner geen gebruik meer wenst te maken van de warmtekrachtkoppeling. Het nadeel van zo een lange termijn contract is dat het bewoners kan weerhouden om voor een warmtekrachtkoppeling te opteren.

## 8 Conclusies

### 8.1 *Inhoudelijke conclusies*

In deze eindverhandeling werd onderzocht of een warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector een rendabel project kan zijn. Naast de economische haalbaarheid werd ook nagegaan wat de voordelen en nadelen van een warmtekrachtkoppeling zijn.

Een belangrijk voordeel is de mogelijkheid om een primaire brandstofbesparing te realiseren. Zoals gebleken is, is deze besparing sterk afhankelijk van de rendementen van de gekozen referentietechnologie. Deze brandstofbesparing ligt ook aan de basis van de certificatensteun die men ontvangt. In 2007 kregen de eigenaars van een warmtekrachtkoppeling een steun van ongeveer 41,55 EUR/MWh<sub>e</sub> (92% van de boeteprijs). Een voorwaarde hiervoor is onder meer dat het om een kwalitatieve warmtekrachtkoppeling gaat. Andere, indirecte voordelen zijn onder meer de vermeden externe kosten, de economische toekomstvisie, de transgenerationale solidariteit, het technologisch, economisch en sociaal multiplicatoreffect, het sociaal effect en de netontlasting. Nadeliger zijn dan weer de hogere installatiekosten, de betrouwbaarheid en de (eventuele) geluidshinder.

De technologieën die voor warmtekrachtkoppeling kunnen worden gebruikt zijn zeer divers. Specifiek voor appartementsgebouwen blijken op dit moment enkel de verbrandingsmotoren een geschikte technologie. Er zijn natuurlijk ook nog andere, veelbelovende technologieën maar deze zijn nog niet op grote schaal op de markt aanwezig. Hierbij denken we dan aan de brandstofcellen, de Stirlingmotoren en de microturbines.

Een analyse van de prijs van de warmtekrachtcertificaten (WKC) in termen van vermeden externe kosten toonde aan hoe belangrijk de gekozen referentietechnologie is. In vergelijking met de steenkoolcentrales is een hogere certificatensteun verantwoord. Er is echter ook een verschil in externe kosten tussen de WKK-technologieën onderling. Zo veroorzaken motoren meer externe kosten dan turbines. Dit zorgt ervoor dat in vergelijking met een STEG centrale, een WKK met motoren zelfs meer externe kosten veroorzaakt. Op basis van vermeden externe kosten verdient deze technologie dus zelfs geen aanmoediging. Naast het belang van de gekozen referentietechnologie toont dit dus aan dat 'warmtekrachtkoppeling' een divers begrip is en dus ook moeilijk eenvoudig benaderd kan worden. Er zou beter een opsplitsing gemaakt worden in het certificatenstelsel naar de onderlinge technologieën toe, wilt men met certificaten streven naar een maatschappelijk optimum.

Voor de gevalstudie van een appartementsgebouw werd gekozen om twee alternatieven te onderzoeken. Het eerste alternatief is een dimensionering op warmtevraag, het tweede alternatief is een dimensionering op elektriciteitsvraag (met het elektriciteitsnet als buffer). Voor beide alternatieven wordt gekozen voor een WKK met motoren op aardgas. Naast deze alternatieven zijn er ook andere mogelijkheden. Zo kan er bijvoorbeeld gekozen worden voor een gecombineerde sturing op warmte en elektriciteit (met een warmwater buffer) of kan ook trigeneratie worden bestudeerd.

In het economisch model dat werd opgesteld, werd met de verschillende kosten rekening gehouden: investeringskosten, onderhoudskosten en energiekosten. Ook de opbrengsten van de warmtecertificaten en de verkoop van eventueel overtollige elektriciteit werden hierin opgenomen. In het model werden ook diverse scenario's opgenomen voor de WKC prijzen en de energieprijzen om hun invloed op de rendabiliteit in te schatten. Vervolgens werd de analyse gemaakt over een levensduur van 15 jaar met als resultaat de netto contante waarde (NCW).

Bij de dimensionering op warmtevraag zien we dat we een jaarlijkse primaire energiebesparing van 467 MWh aardgas kunnen realiseren in vergelijking met de gehanteerde referentietechnologieën (STEG en Hr-ketel). Dit is een relatieve primaire energiebesparing (RPE) van 24,87%. Dit betekent een jaarlijkse vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot met 78,8 ton en 26,2%. Hanteren we echter als referentietechnologie de gemiddelde Belgische elektriciteitscentrale, dan blijkt dat de jaarlijkse vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot slechts 12,9 ton en 5% bedraagt. Hier blijkt dus weer de grote invloed van de gekozen referentietechnologie op de energiebesparing en op de CO<sub>2</sub> vermindering.

Bovenstaande analyses werden ook gemaakt voor de dimensionering op elektriciteitsvraag. In vergelijking met een STEG en Hr-ketel bedraagt de primaire energiebesparing 298 MWh en de RPE 22,41%. Aangezien bij deze dimensionering nog 12% van de elektriciteitsvraag moet worden aangekocht, liggen de waardes van de vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot hier lager de RPE. Jaarlijks kan er met deze keuze 44,8 ton CO<sub>2</sub> bespaard worden, een vermindering met 16,9%. Vergelijken we ook hier weer met de gemiddelde Belgische elektriciteitscentrale, dan bedraagt de jaarlijkse vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot maar 4,7 ton en 2,1%. We kunnen dus vanuit energetisch en ecologisch standpunt concluderen dat beide mogelijkheden positief zijn maar dat een dimensionering op warmte de voorkeur verdient.

Kijken we vervolgens naar de economische analyse, dan ziet het resultaat er anders uit. Onder de huidige omstandigheden (een jaarlijkse gemiddelde prijsstijging van elektriciteit met 1,66% en van aardgas met 5,99%, gecombineerd met WKC van 45 EUR/MWh<sub>e</sub>) zijn beide alternatieven economisch rendabel. De interne rentabiliteit (IR) van de warmtegedimensioneerde installatie

ligt echter wel lager (10,63% ten opzichte van 15,67%) omwille van het beperkter aantal draaiuren en omwille van de verkoop van het elektriciteitsoverschot tegen relatief lagere prijzen. Hier blijkt dus duidelijk dat het aantal draaiuren best zo groot mogelijk is. Ook is een productieoverschot aan elektriciteit economisch niet interessant aangezien de verkoopprijzen veel lager zijn dan de aankooprijzen. Daarbij brengt de verkoop van deze elektriciteit extra administratief werk en dus kosten met zich mee.

Het belang van de warmtekrachtcertificaten is ook duidelijk. Zo zou het warmtegedimensioneerde systeem niet rendabel zijn onder de huidige omstandigheden indien er geen WKC werden uitgereikt. In de situatie waarbij we op elektriciteitsvraag hebben gedimensioneerd ligt het interne rendement hoog genoeg waardoor de WKC niet noodzakelijk zijn onder de huidige omstandigheden. Economisch gezien is een dimensionering op elektriciteit dus interessanter onder de huidige omstandigheden.

De verschillende scenario's die zijn opgesteld kunnen de rentabiliteit van een project weergeven onder veranderende omstandigheden. Met de resultaten van deze scenario's zijn vervolgens eenvoudige economische modellen gebouwd die de invloed van de diverse parameters (prijzen van aardgas, van elektriciteit en van WKC) op de netto contante waarde (NCW) op een overzichtelijke manier weergeven. Voor het warmtegedimensioneerde systeem bekomen we de volgende formule:

$$\begin{aligned} \text{NCW} &= 421\,720 \text{ EUR} \\ &- [80\,317 \text{ EUR} \times (\text{jaarlijkse prijsstijging aardgas in } \%) ] \\ &+ [61\,959 \text{ EUR} \times (\text{jaarlijkse prijsstijging elektriciteit in } \%) ] \\ &+ [3\,352 \text{ EUR} \times (\text{boeteprijs WKC}) ] \end{aligned}$$

We zien hier dat de negatieve invloed van de jaarlijkse prijsstijging van aardgas groter is dan de positieve invloed van de jaarlijkse prijsstijging van elektriciteit. Dit heeft te maken met het feit dat er een overschot aan elektriciteit moet worden verkocht tegen relatief lage verkooptarieven. Aangezien er bij het elektriciteitsgedimensioneerde systeem geen elektriciteitsoverschot is, stelt dit probleem zich hier niet. De volgende formulering geeft de NCW van het elektriciteitsgedimensioneerde systeem weer:

$$\begin{aligned} \text{NCW} &= 341\,555 \text{ EUR} \\ &- [48\,969 \times (\text{jaarlijkse prijsstijging aardgas in } \%) ] \\ &+ [49\,566 \text{ EUR} \times (\text{jaarlijkse prijsstijging elektriciteit in } \%) ] \\ &+ [2\,097 \text{ EUR} \times (\text{boeteprijs WKC}) ] \end{aligned}$$



Hier zien we dat de invloed van aardgasprijsstijgingen en elektriciteitsstijgingen ongeveer even groot en tegengesteld zijn. Met de huidige WKC prijs (45 EUR/MWh<sub>e</sub>) kunnen we eenvoudig concluderen dat de NCW van het project positief blijft zolang de aardgasprijs maximum 8,9% meer per jaar stijgt dan de elektriciteitsprijs. Zolang de stijging onder deze grens zit blijft het project dus rendabel.

Deze scenario's leren ons dus dat het voor de rentabiliteit zeer belangrijk is om de energieprijzen goed te kunnen inschatten. Een verkeerde inschatting kan zware economische gevolgen hebben. Los van deze bemerking blijkt dat een dimensionering op elektriciteit ook onder veranderende omstandigheden steeds de economisch interessantste keuze blijft. Dit heeft mede te maken met de lagere opbrengsten ten gevolge van een verkoop van overtollige elektriciteit op de vrije markt.

Het gebruik van een warmtekrachtkoppeling in appartementsgebouwen kent echter ook enkele belangrijke en specifieke moeilijkheden. Aangezien er een vrije keuze van energieleverancier bestaat heerst er onzekerheid over de afname van elektriciteit door de bewoners. Dit is echter een noodzakelijke voorwaarde aangezien verkopen op de markt financieel gezien niet interessant is. Daarnaast bestaat er ook een complexe situatie rondom de eigendom en het beheer van de (gemeenschappelijke) WKK installatie. Hierin schuilt een belangrijk verschil met de tertiaire sector (bv ziekenhuizen, kantoren, scholen ...) waar er slechts één eigenaar is. In appartementsgebouwen moeten er dus aparte meters worden geplaatst voor elke appartement en moet er een complexer kostentoewijzingssysteem worden opgesteld.

Natuurlijk is deze gevalstudie geen volwaardige haalbaarheidsstudie. Voor deze gevalstudie beschikten we niet over gedetailleerde gegevens betreffende het elektriciteit- en warmteverbruik. De bovenstaande besluiten moeten dan ook met de nodige voorzichtigheid worden gebruikt. Daarom moet er voor een concreet project altijd een gespecialiseerd ingenieursbureau worden aangesproken om tot een meer gedetailleerdere en dus juistere dimensionering te komen.

Warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector krijgt echter ook concurrentie van diverse hernieuwbare energietechnologieën. Hierbij denken we dan vooral aan de (populaire) zonne-energie systemen. Bij de keuze voor een milieuvriendelijkere energieopwekking zou zonne-energie wel eens veel overtuigender kunnen zijn voor het grote publiek dan een warmtekrachtkoppeling aangezien deze totaal geen CO<sub>2</sub> produceren. Nieuwe WKK-technologieën zoals brandstofcellen zouden dit probleem in de toekomst kunnen verhelpen.

## **8.2 Aanbevelingen**

Om het gebruik van warmtekrachtkoppeling aan te moedigen kunnen er enkele aanbevelingen gegeven worden om de specifieke moeilijkheden van de residentiële sector te verhelpen.

- 1) Des te groter het vermogen van een warmtekrachtkoppeling, des te groter de primaire brandstof besparing. Het nadeel hierbij is dat het eventuele overschot aan elektriciteit aan het net zal moeten verkocht worden tegen relatief lage (verkoop)prijzen. Dit komt de rentabiliteit van de installatie echter niet ten goede. Een extra financiële (overheid)steun voor deze aan het net geleverde elektriciteit kan de rentabiliteit en dus bijgevolg de implementatie van warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector bevorderen.
- 2) De moeilijkheden rond de eigendom van de gemeenschappelijke warmtekrachtkoppeling in een appartementsgebouw vraagt om een duidelijke en eenvoudige oplossing. Ook de vrije keuze van energieleverancier vereenvoudigt de situatie niet. Externe financiering en beheer van de warmtekrachtkoppeling in de residentiële sector kan dit probleem oplossen. Hierbij moeten de extra beheerskosten goed in kaart worden gebracht en worden afgewogen tegen de voordelen. Dit principe wordt ook al toegepast in de secundaire sector (industrie).

## **8.3 Mogelijkheden voor verder onderzoek**

Naast de behandelde aspecten in deze eindverhandeling zijn er natuurlijk nog verschillende aspecten die verder onderzocht kunnen worden. De resultaten van deze diepgaande studies zijn erg belangrijk om tot goede conclusies te komen. Ze worden hieronder opgesomd:

1. Voordat er wordt overgegaan tot een haalbaarheidsstudie voor een warmtekrachtkoppeling, is het belangrijk om te onderzoeken of er geen andere, goedkopere manieren zijn om energie te besparen. De beschikbare financiële middelen wensen we zo efficiënt mogelijk toe te kennen. We denken hierbij dan bijvoorbeeld aan de energiebesparing door plaatsing van extra isolatie in woningen en appartementsgebouwen.
2. In deze eindverhandeling is nagegaan wat de mogelijkheden zijn in de residentiële sector voor een appartementsgebouw. Er kan dus nog bijkomend worden onderzocht wat de mogelijkheden zijn voor warmtekrachtkoppeling in woningen. Aangezien de vereiste vermogens er veel lager liggen, zullen er waarschijnlijk ook andere technologieën geschikt zijn.

3. Een aspect dat in deze eindverhandeling niet aan bod is gekomen, is trigeneratie. Trigeneratie is de gezamenlijke opwekking van elektriciteit, warmte en koude. In de residentiële sector biedt deze mogelijkheid echter goede perspectieven aangezien de installatie hierdoor ook tijdens zomermaanden zou kunnen draaien. Dit kan de rendabiliteit ten goede komen als de extra kosten voor de trigeneratie niet te hoog zijn. Verder onderzoek is dus aangewezen.
4. Bij de klassiekere technologieën wordt meestal voor aardgas gekozen als brandstof. Het kan echter ook interessant zijn om te kijken naar de mogelijkheden van biobrandstoffen. Deze zullen waarschijnlijk duurder zijn in aankoop maar geven wel recht op groenestroomcertificaten.
5. In de economische analyse is gebleken hoe groot de impact is van de evoluties van de energieprijzen op de rendabiliteit van een warmtekrachtkoppeling. Een zo correct mogelijke inschatting van deze evoluties (eventueel met kansverdeling) is dan ook zeer waardevol. Ook onderzoek naar de onderlinge relatie tussen de prijs van aardgas en elektriciteit (via bv. de STEG's) kan waardevolle informatie opleveren die in de analyse meegenomen kan worden. Met deze gegevens kan dan een gedeelte van de onzekerheid en het risico worden weggenomen.
6. Naast de energieprijzen is de prijs van de WKC ook een belangrijke factor bij de rentabiliteitsberekeningen. Een onderzoek naar een correcte prijs van deze certificaten (afhankelijk van de vermeden externe kosten, toekomstvisie, multiplicatoreffecten, ...) kan zeer interessant zijn. Dit onderzoek kan passen in een groter kader waarbij alle certificatensteun aan hernieuwbare energie (zoals bv. zonne-energie) onderzocht en vergeleken wordt. Belangrijk hierbij is de gekozen referentie. Naarmate oude en vervuilende technologieën (steenkoolcentrales) vervangen worden door efficiëntere technologieën (STEG's), zal waarschijnlijk ook de prijs van de certificaten afnemen met de tijd. Dit gegeven is nadelig voor mogelijke investeerders daar zij een stabiel investeringsklimaat wensen.
7. Van een aantal nieuwe technologieën wordt verwacht dat ze binnen enkele jaren op de markt zullen doorbreken. We denken hierbij onder meer aan de brandstofcel (geluidloos), de Stirlingmotor en de microturbine. Een studie kan nagaan wat het potentieel is van deze technologieën in de residentiële sector. Dankzij hun moduleerbaarheid *kunnen* brandstofcellen bijvoorbeeld zeer geschikt zijn voor individuele woningen.

## Lijst van geraadpleegde werken

Ampere (2000) *Warmtekrachtkoppeling*, Rapport van de Commissie voor de Analyse van de Productiemiddelen van Elektriciteit en de Reoriëntatie van de Energievectoren, Brussel.

Geraadpleegd via [http://mineco.fgov.be/energy/ampere\\_commission/d7.pdf](http://mineco.fgov.be/energy/ampere_commission/d7.pdf)

Chase et al. (2006) *Operations Management, for Competitive Advantage*, 11th edition, McGraw-Hill International Edition

COGENchallenge (2008) *The European information campaign on small-scale cogeneration*.

Geraadpleegd via <http://www.cogen.org/cogen-challenge/index.htm>

COGEN Vlaanderen (2004) *WKK Wegwijzer*. Geraadpleegd via

<http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/0/977EBF3089953EDEC1256DDC004B810E>

COGEN Vlaanderen (2006) *Basishandboek Warmtekrachtkoppeling*. Geraadpleegd via

[http://www2.vlaanderen.be/ned/sites/economie/energiesparen/doc/wkk\\_basishandboekcogen.pdf](http://www2.vlaanderen.be/ned/sites/economie/energiesparen/doc/wkk_basishandboekcogen.pdf)

COGEN Vlaanderen (2008a) *Uitbatingsteun via certificaten voor WKK in Vlaanderen*.

Geraadpleegd via

<http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/webpages/B4BBDA84892A5CCDC125704B0030AE6D>

COGEN Vlaanderen (2008b) *Voorstelling en doelstellingen*. Geraadpleegd via

<http://www.cogenvlaanderen.be/>

COGEN Vlaanderen (2008c) *WKK-crisis in Nederland*, Nieuwsbrief COGEN Vlaanderen, Jaargang 2008, Nummer 1, Mei 2008

De Paepe et al. (2006) *Micro-CHP systems for residential applications*, Energy Conversion and Management 47. Geraadpleegd via [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

De Standaard (2005), *VN verwachten 40 procent groei wereldbevolking tot 2050*, 26 februari 2005. Geraadpleegd via <http://www.standaard.be/Artikel/Detail.aspx?artikelId=gp7creol>

Dexters, A. (2007) *Kleine WKK's*, KHLim. Geraadpleegd via <http://www.vei.be/technologie/documents/WKK.pdf>

Emis (2001) *Informatiepakket Warmtekrachtkoppeling (WKK)*, Het Energie en Milieu Informatiesysteem voor het Vlaams Gewest. Geraadpleegd via [http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie\\_wkk\\_volledig\\_document.pdf](http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie_wkk_volledig_document.pdf)

Energiesparen (2008a) *Milieuvriendelijke energieproductie*. Geraadpleegd via [http://www.energiesparen.be/duurzame\\_energie/index.php#doel](http://www.energiesparen.be/duurzame_energie/index.php#doel)

Energiesparen (2008b) *Verplicht haalbaarheidsonderzoek voor hernieuwbare energietoepassingen en warmtekrachtkoppeling voor gebouwen groter dan 1000 m<sup>2</sup>*. Geraadpleegd via [http://www.energiesparen.be/duurzame\\_energie/haalbaarheidsstudie.php](http://www.energiesparen.be/duurzame_energie/haalbaarheidsstudie.php)

Energiesparen (2008c) *Subsidies voor bedrijven*. Geraadpleegd via <http://www.energiesparen.be/subsidies/bedrijven.php>

Energiesparen (2008d) *Subsidies voor particulieren*. Geraadpleegd via [http://www.energiesparen.be/subsidies/subsidiemodule/subsidieregel\\_detail.php?id=1820&vers=769&doelgroep=1](http://www.energiesparen.be/subsidies/subsidiemodule/subsidieregel_detail.php?id=1820&vers=769&doelgroep=1)

Energiesparen (2008e) *Warmtekrachtkoppeling*. Geraadpleegd via [http://www.energiesparen.be/duurzame\\_energie/wkk.php#wkkcertificaat](http://www.energiesparen.be/duurzame_energie/wkk.php#wkkcertificaat)

Energik (2004) *Handboek Warmtekrachtkoppeling 2004*, Vlaamse vereniging voor energie- en milieutechnologie. Geraadpleegd via <http://www.energik.be/belcogen/index.html>

EPA (2002) *Catalog of CHP Technologies*, U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. Geraadpleegd via [http://www.epa.gov/chp/documents/catalog\\_of\\_%20chp\\_tech\\_entire.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_of_%20chp_tech_entire.pdf)

EPA (2008) *CHP Emissions Calculator*, U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, Geraadpleegd via <http://www.epa.gov/chp/basic/calculator.html>

Haywood, D. (z.d.) *An introduction to Stirling-cycle machines*, University of Canterbury. Geraadpleegd via [http://www.mech.canterbury.ac.nz/documents/sc\\_intro.pdf](http://www.mech.canterbury.ac.nz/documents/sc_intro.pdf)

Lemeire, F. (2003) *Seminarie Technologie, Thermodynamica en energieproductie*, Diepenbeek, Universiteit Hasselt

Mertens, D. (2005) *Warmtekrachtkoppeling: technische aspecten*, COGEN Vlaanderen.  
Geraadpleegd via  
[http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/Technologie.pdf/\\$FILE/Technologie.pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/Technologie.pdf/$FILE/Technologie.pdf)

MIRA (2008) *Milieurapport Vlaanderen: Reserves en voorraden van niet-hernieuwbare energiebronnen*, Vlaamse Milieu Maatschappij,  
Geraadpleegd via  
<http://www.milieurapport.be/default.aspx?PageID=86&ChapID=2186&NodeID=3738>

Ritter, F. E., en Schooler, L. J. (2002). *The learning curve*. In International encyclopaedia of the social and behavioural sciences, Amsterdam, Pergamon.  
Geraadpleegd via <http://ritter.ist.psu.edu/papers/ritterS01.pdf>

Ruijg, G.J. en Ribberink, J.S. (2004) *Rentabiliteitsanalyse van microwarmtekracht-systemen: invloed van opslag en regeling*. Geraadpleegd via  
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/c04023.pdf>

SenterNovem (2008) *Trias Energetica*. Geraadpleegd via  
[http://duurzaambouwen.senternovem.nl/begrippen/trias\\_energetica/](http://duurzaambouwen.senternovem.nl/begrippen/trias_energetica/)

Somers, W (2007) *Europese primeur! WKK-installatie AGFA*, PowerPoint presentatie, INDEA, 17 oktober 2007. Geraadpleegd via  
<http://www.indea.be/userfiles/files/20071007%20INDEA%20Presentatie%20ENERGIK%20WKK%20Agfa.pdf>

Stroobandt, A. (2007) *Warmtekrachtkoppeling: steunmaatregelen WKK in gebouwen*, COGEN Vlaanderen. Geraadpleegd via  
[http://onderzoek.khk.be/domein\\_Energiemanagement/documents/pdf8-presentatieAnStroobandt\\_000.pdf](http://onderzoek.khk.be/domein_Energiemanagement/documents/pdf8-presentatieAnStroobandt_000.pdf)

Viesmann (2008) *Condensatieketels op gas*. Geraadpleegd via  
<http://www.viessmann.be/nl/products/gas-brennwertkessel.html>

VITO (2004) *Microturbines, een nieuwe opportuniteit voor WKK*, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Geraadpleegd via  
[http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk\\_microturbine.pdf](http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk_microturbine.pdf)

VITO (2005a) *Internalisering van externe kosten voor de productie en de verdeling van elektriciteit in Vlaanderen*, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Geraadpleegd via [http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/03\\_GEVOLGEN/03\\_03/ECON\\_O&O\\_06.PDF](http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/03_GEVOLGEN/03_03/ECON_O&O_06.PDF)

VITO (2005b) *Prognoses voor hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling tot 2020*, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Geraadpleegd via [http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie\\_prognoses\\_heb\\_en\\_wkk\\_tot\\_2020\\_vo\\_lledig\\_rapport.pdf](http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie_prognoses_heb_en_wkk_tot_2020_vo_lledig_rapport.pdf)

Vlaams Agentschap Economie (2008a) *Lijst met CO<sub>2</sub> emissiefactoren en verbrandingswaarden*. Geraadpleegd via [http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/energieplanning\\_co2emissiefactoren.doc](http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/energieplanning_co2emissiefactoren.doc)

Vlaams Agentschap Economie (2008b) *Limitatieve Technologieën Lijst, Geldig van 4 januari 2008 tem 30 april 2008*. Geraadpleegd via <http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/Uploads/LTL-call-200801-opsomming,0.pdf>

Vlaams minister van Openbare Werken, Energie, Leefmilieu en Natuur (z.d.) *Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006 – 2012*, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie. Geraadpleegd via <http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaams-klimaatbeleidsplan-2006-2012>

Vlaamse Overheid (2007) *Folder milieuvriendelijk ondernemen*, Vlaams Agentschap Economie. Geraadpleegd via [http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/Uploads/Fol\\_milieuvr\\_ondernemen\\_EP\\_call,0.pdf](http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/Uploads/Fol_milieuvr_ondernemen_EP_call,0.pdf)

Voorspools, K. en D'haeseleer, W. (2001) *Mini en micro WKK: finaal rapport*, Departement Mechanica, KULeuven. Geraadpleegd via [http://www.kuleuven.be/ei/Public/publications/2001R07\\_WDH-01-01\(2\)\\_ab.pdf](http://www.kuleuven.be/ei/Public/publications/2001R07_WDH-01-01(2)_ab.pdf)

VREG (2007) *Marktmonitor 2007*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via <http://www.vreg.be/vreg/documenten/rapporten/RAPP-2007-7.pdf>

VREG (2008a) *Het systeem van warmtekrachtcertificaten – Certificatenverplichting*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via [http://www.vreg.be/nl/06\\_sector/05\\_wkkproducenten/01\\_systeem/06\\_certificatenverplichting.asp](http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/01_systeem/06_certificatenverplichting.asp)

VREG (2008b) *Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten en gemiddelde prijs, update 3/3/2008*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via <http://www.vreg.be/vreg/documenten/statistieken/54945.pdf>

VREG (2008c) *Het systeem van groenestroomcertificaten (GSC)*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via [http://www.vreg.be/nl/03\\_algemeen/02\\_energiemarkt/02\\_wiedoetwat/07\\_groenestroom.asp](http://www.vreg.be/nl/03_algemeen/02_energiemarkt/02_wiedoetwat/07_groenestroom.asp)

VREG (2008d) *Meteropneming – Gemiddeld verbruik*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via [http://www.vreg.be/nl/04\\_prive/05\\_meteropneming/04\\_verbruik.asp](http://www.vreg.be/nl/04_prive/05_meteropneming/04_verbruik.asp)

VREG (2008e) *Groenestroomproducenten - Handel en prijs - Minimumprijs van een groenestroomcertificaat - aankoopverplichting netbeheerders*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via [http://www.vreg.be/nl/06\\_sector/04\\_groenestroomproducenten/04\\_handelenprijs/04\\_handelenprijs/01\\_netbeheerders.asp](http://www.vreg.be/nl/06_sector/04_groenestroomproducenten/04_handelenprijs/04_handelenprijs/01_netbeheerders.asp)

VREG (2008f) *WKK-producenten - Handel en prijs - Minimumprijs van een warmtecertificaat*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via [http://www.vreg.be/nl/06\\_sector/05\\_wkkproducenten/04\\_handelenprijs/01\\_minimumprijs.asp](http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/04_handelenprijs/01_minimumprijs.asp)

VREG (2008g) *Marktmonitor 2007*, Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt. Geraadpleegd via <http://www.vreg.be/vreg/documenten/rapporten/RAPP-2007-7.pdf>



## Lijst van bijlagen

Bijlage 1: Warmtevraag van de appartementen: blok A.....	117
Bijlage 2: Warmtevraag van de appartementen: blok B.....	118
Bijlage 3: Economische analyse, voorbeeld voor scenario 1 (warmtevraag) .....	119
Bijlage 4: NCW voor de dimensionering op warmte met een verdisconteringpercentage van 3%.....	124
Bijlage 5: IR voor de dimensionering op warmte .....	125
Bijlage 6: Output SPSS voor de dimensionering op warmte.....	126
Bijlage 7: Economische analyse, voorbeeld voor scenario 1 (elektriciteitsvraag).....	127
Bijlage 8: NCW voor de dimensionering op elektriciteit met een verdisconteringpercentage van 3%.....	132
Bijlage 9: IR voor de dimensionering op elektriciteit.....	133
Bijlage 10: Output SPSS voor de dimensionering op elektriciteit .....	134

## Bijlage 1: Warmtevraag van de appartementen: blok A

APPARTEMENTEN\_A.pdf versie 10-01-2008

### Resultatenblad: APPARTEMENTEN

Dit formulier is aangemaakt met de EPB-software versie 1.1 op 10-01-2008.  
Subdossier "APPARTEMENTEN" van het deelproject "BLOK A".

Het resultatenblad is de weergave van een beperkt aantal invoergegevens en resultaten die respectievelijk ingevoerd werden en berekend werden door de EPB-software.

#### E-peil

E-peil: 80

Karakteristiek jaarlijks primair energieverbruik: 4.036.752 MJ

Referentiewaarde voor het karakteristiek jaarlijks primair energieverbruik: 4.509.576 MJ

Primair energieverbruik:

	JAN	FEB	MAA	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC	JAAR	
Verwarming	580043	480148	420469	238873	48501	162	0	0	8439	178177	414825	570447	2.938.894	MJ
Koeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MJ
Tapwater	93159	84143	93159	90154	93159	90154	93159	93159	90154	93159	90154	93159	1.086.868	MJ
Hulpenergie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MJ
PV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MJ

#### K-peil

K-peil: 35

Maximaal K-peil: 45

Verliesoppervlak: 10.586,00 m<sup>2</sup>

Beschermd Volume: 32.424,00 m<sup>3</sup>

Gemiddelde U-waarde: 0,60 W/m<sup>2</sup>K

Compactheid: 3,06 m

## Bijlage 2: Warmtevraag van de appartementen: blok B

APPARTEMENTEN\_B.pdf versie 10-01-2008

### Resultatenblad: APPARTEMENTEN

Dit formulier is aangemaakt met de EPB-software versie 1.1 op 10-01-2008.

Subdossier "APPARTEMENTEN" van het deelproject "BLOK B".

Het resultatenblad is de weergave van een beperkt aantal invoergegevens en resultaten die respectievelijk ingevoerd werden en berekend werden door de EPB-software.

#### Overzicht van de EPB-eisen

Aard	Bestemming	U-max/R-min	K-peil	E-peil	Risico op oververhitting	Ventilatie
nieuwbouw	wonen	x	K45	E100	x	x

#### E-peil

E-peil: 83

Karakteristiek jaarlijks primair energieverbruik:

1.815.624 MJ

Referentiewaarde voor het karakteristiek jaarlijks primair energieverbruik:

1.967.744 MJ

Primair energieverbruik:

	JAN	FEB	MAA	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC	JAAR
Verwarming	266540	220482	192241	107859	20994	80	0	0	3191	82942	191256	262194	1.347.679 MJ
Koeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 MJ
Tapwater	39743	35997	39743	39461	39743	39461	39743	39743	39461	39743	39461	39743	467.945 MJ
Hulpenergie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 MJ
FV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 MJ

#### K-peil

K-peil: 37

Maximaal K-peil:

45

Verliesoppervlakt:

m<sup>2</sup>

Beschermd Volume:

m<sup>3</sup>

Gemiddelde U-waarde:

W/m<sup>2</sup>K

Compactheid:

2,78

m

### Bijlage 3: Economische analyse, voorbeeld voor scenario 1 (warmtevraag)

A Marktprijs warmtekrachtcertificaten 2,77 EUR

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Netto-productie	Ontvangsten	
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-280.000			-280.000			-280.000
1	100,00%	467	1.291		-7.610	-69.586	-75.905	157	3.998	-71.907
2	100,00%	467	1.291		-7.610	-73.751	-80.071	157	3.932	-76.139
3	100,00%	467	1.291		-7.610	-78.166	-84.485	157	3.866	-80.619
4	100,00%	467	1.291		-7.610	-82.844	-89.164	157	3.802	-85.362
5	94,77%	442	1.224		-7.610	-87.803	-94.189	157	3.739	-90.450
6	85,13%	397	1.100		-7.610	-93.059	-99.570	157	3.677	-95.893
7	75,48%	352	975		-7.610	-98.629	-105.265	157	3.616	-101.649
8	65,83%	307	850		-7.610	-104.533	-111.293	157	3.555	-107.737
9	56,18%	262	726		-7.610	-110.790	-117.675	157	3.496	-114.178
10	46,53%	217	601		-7.610	-117.422	-124.431	157	3.438	-120.993
11	36,88%	172	476		-7.610	-124.450	-131.584	157	3.381	-128.203
12	27,24%	127	352		-7.610	-131.899	-139.158	157	3.325	-135.833
13	17,59%	82	227		-7.610	-139.794	-147.178	157	3.270	-143.908
14	7,94%	37	102		-7.610	-148.162	-155.670	157	3.215	-152.455
15	0,50%	2	6		-7.610	-157.031	-164.636	157	3.162	-161.474
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>										<b>-1.519.501</b>

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo	
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven			
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]			[EUR]	[EUR]	Kosten WKK - kosten gasketel
	[EUR]	[EUR]	[EUR]					[EUR]	
0	-15.014			-15.014			-15.014	-264.986	
1		-1.000	-39.126	-40.126	350	-58.551	-98.677	26.770	
2		-1.000	-41.468	-42.468	350	-57.577	-100.045	23.906	
3		-1.000	-43.950	-44.950	350	-56.620	-101.569	20.951	
4		-1.000	-46.581	-47.581	350	-55.678	-103.259	17.897	
5		-1.000	-49.369	-50.369	350	-54.752	-105.121	14.671	
6		-1.000	-52.324	-53.324	350	-53.842	-107.166	11.273	
7		-1.000	-55.456	-56.456	350	-52.946	-109.402	7.753	
8		-1.000	-58.775	-59.775	350	-52.066	-111.841	4.104	
9		-1.000	-62.293	-63.293	350	-51.200	-114.493	315	
10		-1.000	-66.022	-67.022	350	-50.349	-117.371	-3.622	
11		-1.000	-69.974	-70.974	350	-49.511	-120.485	-7.718	
12		-1.000	-74.162	-75.162	350	-48.688	-123.850	-11.983	
13		-1.000	-78.602	-79.602	350	-47.878	-127.480	-16.428	
14		-1.000	-83.307	-84.307	350	-47.082	-131.389	-21.066	
15		-1.000	-88.293	-89.293	350	-46.299	-135.592	-25.882	
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>							<b>-1.317.647</b>		<b>-201.854</b>
<b>Intern rendement</b>								<b>/</b>	

**B Marktprijs warmtekrachtcertificaten 23,08 EUR**

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Netto-productie	Ontvangsten	
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-280.000			-280.000			-280.000
1	100,00%	467	10.757		-7.610	-69.586	-66.439	157	3.998	-62.441
2	100,00%	467	10.757		-7.610	-73.751	-70.605	157	3.932	-66.673
3	100,00%	467	10.757		-7.610	-78.166	-75.019	157	3.866	-71.153
4	100,00%	467	10.757		-7.610	-82.844	-79.698	157	3.802	-75.896
5	94,77%	442	10.203		-7.610	-87.803	-85.211	157	3.739	-81.472
6	85,13%	397	9.164		-7.610	-93.059	-91.505	157	3.677	-87.828
7	75,48%	352	8.125		-7.610	-98.629	-98.114	157	3.616	-94.499
8	65,83%	307	7.087		-7.610	-104.533	-105.057	157	3.555	-101.501
9	56,18%	262	6.048		-7.610	-110.790	-112.352	157	3.496	-108.856
10	46,53%	217	5.009		-7.610	-117.422	-120.023	157	3.438	-116.585
11	36,88%	172	3.970		-7.610	-124.450	-128.090	157	3.381	-124.709
12	27,24%	127	2.932		-7.610	-131.899	-136.578	157	3.325	-133.253
13	17,59%	82	1.893		-7.610	-139.794	-145.512	157	3.270	-142.243
14	7,94%	37	854		-7.610	-148.162	-154.919	157	3.215	-151.703
15	0,50%	2	46		-7.610	-157.031	-164.595	157	3.162	-161.433
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>									<b>-1.447.879</b>	

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven		
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]			[EUR]	[EUR]
	[EUR]	[EUR]	[EUR]					[EUR]
0	-15.014			-15.014			-15.014	-264.986
1		-1.000	-39.126	-40.126	350	-58.551	-98.677	36.236
2		-1.000	-41.468	-42.468	350	-57.577	-100.045	33.372
3		-1.000	-43.950	-44.950	350	-56.620	-101.569	30.417
4		-1.000	-46.581	-47.581	350	-55.678	-103.259	27.363
5		-1.000	-49.369	-50.369	350	-54.752	-105.121	23.649
6		-1.000	-52.324	-53.324	350	-53.842	-107.166	19.337
7		-1.000	-55.456	-56.456	350	-52.946	-109.402	14.903
8		-1.000	-58.775	-59.775	350	-52.066	-111.841	10.340
9		-1.000	-62.293	-63.293	350	-51.200	-114.493	5.637
10		-1.000	-66.022	-67.022	350	-50.349	-117.371	786
11		-1.000	-69.974	-70.974	350	-49.511	-120.485	-4.224
12		-1.000	-74.162	-75.162	350	-48.688	-123.850	-9.403
13		-1.000	-78.602	-79.602	350	-47.878	-127.480	-14.763
14		-1.000	-83.307	-84.307	350	-47.082	-131.389	-20.315
15		-1.000	-88.293	-89.293	350	-46.299	-135.592	-25.841
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>							<b>-1.317.647</b>	<b>-130.231</b>
<b>Intern rendement</b>								<b>/</b>

**C Marktprijs warmtekrachtcertificaten 41,55 EUR**

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Netto-productie	Ontvangsten	
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-280.000			-280.000			-280.000
1	100,00%	467	19.362		-7.610	-69.586	-57.834	157	3.998	-53.836
2	100,00%	467	19.362		-7.610	-73.751	-61.999	157	3.932	-58.067
3	100,00%	467	19.362		-7.610	-78.166	-66.414	157	3.866	-62.547
4	100,00%	467	19.362		-7.610	-82.844	-71.092	157	3.802	-67.290
5	94,77%	442	18.365		-7.610	-87.803	-77.048	157	3.739	-73.310
6	85,13%	397	16.495		-7.610	-93.059	-84.174	157	3.677	-80.497
7	75,48%	352	14.626		-7.610	-98.629	-91.614	157	3.616	-87.998
8	65,83%	307	12.756		-7.610	-104.533	-99.387	157	3.555	-95.832
9	56,18%	262	10.886		-7.610	-110.790	-107.514	157	3.496	-104.018
10	46,53%	217	9.016		-7.610	-117.422	-116.016	157	3.438	-112.577
11	36,88%	172	7.147		-7.610	-124.450	-124.914	157	3.381	-121.533
12	27,24%	127	5.277		-7.610	-131.899	-134.233	157	3.325	-130.908
13	17,59%	82	3.407		-7.610	-139.794	-143.998	157	3.270	-140.728
14	7,94%	37	1.537		-7.610	-148.162	-154.235	157	3.215	-151.020
15	0,50%	2	83		-7.610	-157.031	-164.558	157	3.162	-161.396
							<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>			<b>-1.382.767</b>

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo		
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven				
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]			[EUR]	[EUR]	Kosten WKK - kosten gasketel	
	[EUR]	[EUR]	[EUR]				[EUR]	[EUR]		
0	-15.014			-15.014			-15.014	-264.986		
1		-1.000	-39.126	-40.126	350	-58.551	-98.677	44.841		
2		-1.000	-41.468	-42.468	350	-57.577	-100.045	41.978		
3		-1.000	-43.950	-44.950	350	-56.620	-101.569	39.022		
4		-1.000	-46.581	-47.581	350	-55.678	-103.259	35.968		
5		-1.000	-49.369	-50.369	350	-54.752	-105.121	31.811		
6		-1.000	-52.324	-53.324	350	-53.842	-107.166	26.668		
7		-1.000	-55.456	-56.456	350	-52.946	-109.402	21.404		
8		-1.000	-58.775	-59.775	350	-52.066	-111.841	16.009		
9		-1.000	-62.293	-63.293	350	-51.200	-114.493	10.475		
10		-1.000	-66.022	-67.022	350	-50.349	-117.371	4.793		
11		-1.000	-69.974	-70.974	350	-49.511	-120.485	-1.048		
12		-1.000	-74.162	-75.162	350	-48.688	-123.850	-7.058		
13		-1.000	-78.602	-79.602	350	-47.878	-127.480	-13.248		
14		-1.000	-83.307	-84.307	350	-47.082	-131.389	-19.632		
15		-1.000	-88.293	-89.293	350	-46.299	-135.592	-25.804		
							<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>		<b>-1.317.647</b>	<b>-65.120</b>
							<b>Intern rendement</b>		<b>/</b>	

**D Marktprijs warmtekrachtcertificaten 60,02 EUR**

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Netto-productie	Ontvangsten	
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-280.000			-280.000			-280.000
1	100,00%	467	27.968		-7.610	-69.586	-49.228	157	3.998	-45.230
2	100,00%	467	27.968		-7.610	-73.751	-53.394	157	3.932	-49.462
3	100,00%	467	27.968		-7.610	-78.166	-57.808	157	3.866	-53.942
4	100,00%	467	27.968		-7.610	-82.844	-62.487	157	3.802	-58.685
5	94,77%	442	26.527		-7.610	-87.803	-68.886	157	3.739	-65.147
6	85,13%	397	23.827		-7.610	-93.059	-76.843	157	3.677	-73.166
7	75,48%	352	21.126		-7.610	-98.629	-85.114	157	3.616	-81.498
8	65,83%	307	18.425		-7.610	-104.533	-93.718	157	3.555	-90.163
9	56,18%	262	15.724		-7.610	-110.790	-102.676	157	3.496	-99.180
10	46,53%	217	13.024		-7.610	-117.422	-112.008	157	3.438	-108.570
11	36,88%	172	10.323		-7.610	-124.450	-121.738	157	3.381	-118.357
12	27,24%	127	7.622		-7.610	-131.899	-131.888	157	3.325	-128.563
13	17,59%	82	4.921		-7.610	-139.794	-142.484	157	3.270	-139.214
14	7,94%	37	2.221		-7.610	-148.162	-153.552	157	3.215	-150.337
15	0,50%	2	120		-7.610	-157.031	-164.521	157	3.162	-161.360
							<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>			<b>-1.317.656</b>

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo Kosten WKK - kosten gasketel [EUR]	
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven			
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]			[EUR]		
	[EUR]	[EUR]	[EUR]			[EUR]			
0	-15.014			-15.014			-15.014	-264.986	
1		-1.000	-39.126	-40.126	350	-58.551	-98.677	53.446	
2		-1.000	-41.468	-42.468	350	-57.577	-100.045	50.583	
3		-1.000	-43.950	-44.950	350	-56.620	-101.569	47.628	
4		-1.000	-46.581	-47.581	350	-55.678	-103.259	44.574	
5		-1.000	-49.369	-50.369	350	-54.752	-105.121	39.974	
6		-1.000	-52.324	-53.324	350	-53.842	-107.166	34.000	
7		-1.000	-55.456	-56.456	350	-52.946	-109.402	27.904	
8		-1.000	-58.775	-59.775	350	-52.066	-111.841	21.678	
9		-1.000	-62.293	-63.293	350	-51.200	-114.493	15.314	
10		-1.000	-66.022	-67.022	350	-50.349	-117.371	8.801	
11		-1.000	-69.974	-70.974	350	-49.511	-120.485	2.129	
12		-1.000	-74.162	-75.162	350	-48.688	-123.850	-4.712	
13		-1.000	-78.602	-79.602	350	-47.878	-127.480	-11.734	
14		-1.000	-83.307	-84.307	350	-47.082	-131.389	-18.948	
15		-1.000	-88.293	-89.293	350	-46.299	-135.592	-25.767	
							<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>	<b>-1.317.647</b>	<b>-9</b>
							<b>Intern rendement</b>	<b>3,00%</b>	

E Marktprijs warmtekrachtcertificaten 83,10 EUR

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Netto-productie	Ontvangsten	
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-280.000			-280.000			-280.000
1	100,00%	467	38.725		-7.610	-69.586	-38.472	157	3.998	-34.473
2	100,00%	467	38.725		-7.610	-73.751	-42.637	157	3.932	-38.705
3	100,00%	467	38.725		-7.610	-78.166	-47.051	157	3.866	-43.185
4	100,00%	467	38.725		-7.610	-82.844	-51.730	157	3.802	-47.928
5	94,77%	442	36.730		-7.610	-87.803	-58.683	157	3.739	-54.944
6	85,13%	397	32.991		-7.610	-93.059	-67.679	157	3.677	-64.002
7	75,48%	352	29.251		-7.610	-98.629	-76.988	157	3.616	-73.373
8	65,83%	307	25.512		-7.610	-104.533	-86.632	157	3.555	-83.076
9	56,18%	262	21.772		-7.610	-110.790	-96.628	157	3.496	-93.132
10	46,53%	217	18.033		-7.610	-117.422	-106.999	157	3.438	-103.561
11	36,88%	172	14.293		-7.610	-124.450	-117.767	157	3.381	-114.386
12	27,24%	127	10.554		-7.610	-131.899	-128.956	157	3.325	-125.631
13	17,59%	82	6.814		-7.610	-139.794	-140.591	157	3.270	-137.321
14	7,94%	37	3.075		-7.610	-148.162	-152.698	157	3.215	-149.483
15	0,50%	2	166		-7.610	-157.031	-164.475	157	3.162	-161.313
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>									<b>-1.236.267</b>	

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven		
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik					
	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	Kosten WKK - kosten gasketel [EUR]
0	-15.014			-15.014			-15.014	-264.986
1		-1.000	-39.126	-40.126	350	-58.551	-98.677	64.203
2		-1.000	-41.468	-42.468	350	-57.577	-100.045	61.340
3		-1.000	-43.950	-44.950	350	-56.620	-101.569	58.385
4		-1.000	-46.581	-47.581	350	-55.678	-103.259	55.331
5		-1.000	-49.369	-50.369	350	-54.752	-105.121	50.176
6		-1.000	-52.324	-53.324	350	-53.842	-107.166	43.164
7		-1.000	-55.456	-56.456	350	-52.946	-109.402	36.029
8		-1.000	-58.775	-59.775	350	-52.066	-111.841	28.765
9		-1.000	-62.293	-63.293	350	-51.200	-114.493	21.362
10		-1.000	-66.022	-67.022	350	-50.349	-117.371	13.810
11		-1.000	-69.974	-70.974	350	-49.511	-120.485	6.099
12		-1.000	-74.162	-75.162	350	-48.688	-123.850	-1.781
13		-1.000	-78.602	-79.602	350	-47.878	-127.480	-9.841
14		-1.000	-83.307	-84.307	350	-47.082	-131.389	-18.094
15		-1.000	-88.293	-89.293	350	-46.299	-135.592	-25.721
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>							<b>-1.317.647</b>	<b>81.381</b>
							<b>Intern rendement</b>	<b>11,87%</b>



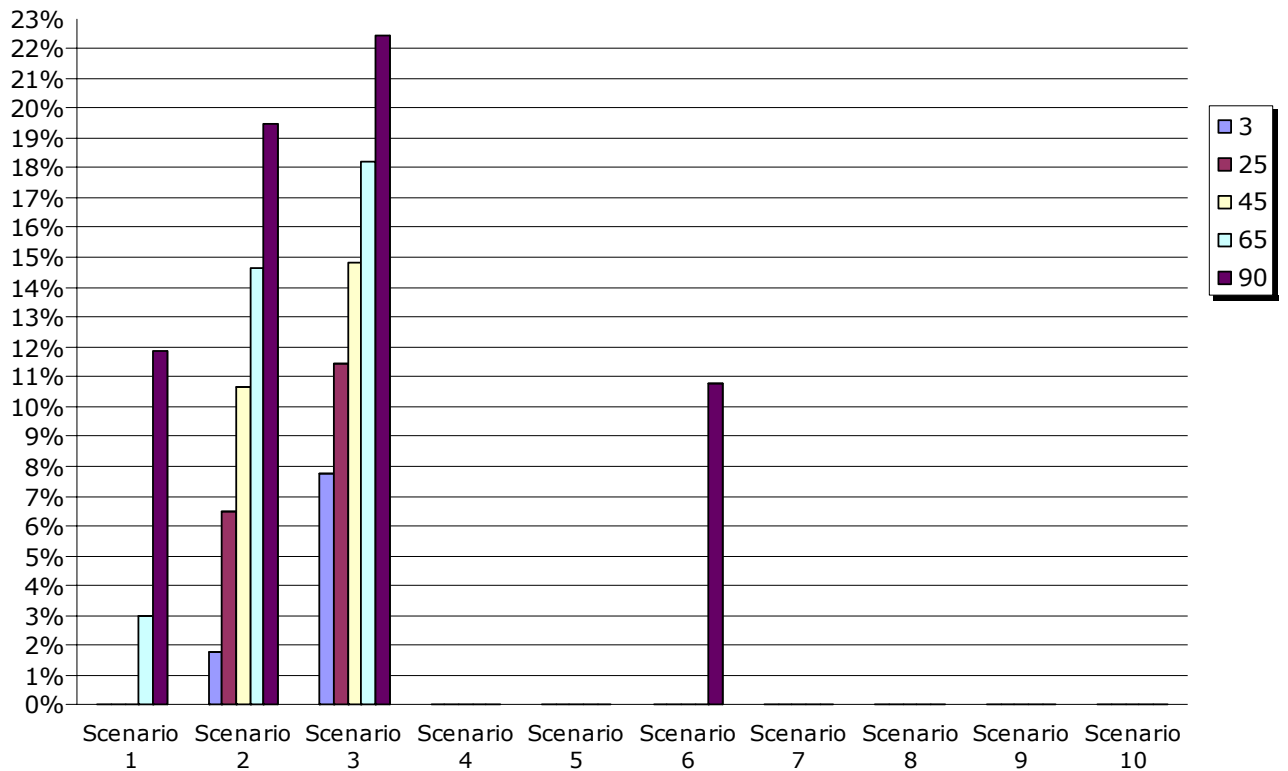
**Bijlage 4: NCW voor de dimensionering op warmte met een  
verdisconteringpercentage van 3% [in EUR]**

<b>Energieprijzen</b>	<b>Boeteprijs WKC</b>				
	3 EUR	25 EUR	45 EUR	65 EUR	90 EUR
Scenario 1	-201.854	-130.231	-65.120	-9	81.381
Scenario 2	-18.468	53.154	118.266	183.377	264.766
Scenario 3	95.938	167.561	232.672	297.783	379.173
Scenario 4	-542.375	-470.753	-405.642	-340.530	-259.141
Scenario 5	-358.990	-287.367	-222.256	-157.144	-75.755
Scenario 6	-244.583	-172.961	-107.850	-42.738	38.651
Scenario 7	-1.133.762	-1.062.140	-997.028	-931.917	-850.528
Scenario 8	-950.376	-878.754	-813.642	-748.531	-667.142
Scenario 9	-835.970	-764.347	-699.236	-634.125	-552.736
Scenario 10	-702.932	-631.309	-566.198	-501.087	-419.697

<i>Jaarlijkse evolutie van de aardgasprijs</i>	<i>Jaarlijkse evolutie van de elektriciteitsprijs</i>			
	-1,66%	1,66%	3,33%	4,99%
5,99%	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	
11,97%	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	
17,96%	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10

**Bijlage 5: IR voor de dimensionering op warmte**

Energieprijzen	Boeteprijs WKC				
	3 EUR	25 EUR	45 EUR	65 EUR	90 EUR
Scenario 1	/	/	/	3,00%	11,87%
Scenario 2	1,75%	6,50%	10,63%	14,61%	19,45%
Scenario 3	7,77%	11,43%	14,79%	18,19%	22,45%
Scenario 4	/	/	/	/	/
Scenario 5	/	/	/	/	/
Scenario 6	/	/	/	/	10,76%
Scenario 7	/	/	/	/	/
Scenario 8	/	/	/	/	/
Scenario 9	/	/	/	/	/
Scenario 10	/	/	/	/	/



**Bijlage 6: Output SPSS voor de dimensionering op warmte**

**Variables Entered/Removed<sup>b</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	WKC, aardgas, <sup>a</sup> elektriciteit	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: NCW

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,990 <sup>a</sup>	,980	,979	58703,39516

a. Predictors: (Constant), WKC, aardgas, elektriciteit

**ANOVA<sup>b</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	7,9E+012	3	2,643E+012	766,942	,000 <sup>a</sup>
	Residual	1,6E+011	46	3446088604		
	Total	8,1E+012	49			

a. Predictors: (Constant), WKC, aardgas, elektriciteit

b. Dependent Variable: NCW

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	421720,0	25805,629		16,342	,000
	aardgas	-8031683	173362,9	-,993	-46,329	,000
	elektriciteit	6195940	387806,9	,342	15,977	,000
	WKC	3351,659	274,154	,252	12,225	,000

a. Dependent Variable: NCW

### Bijlage 7: Economische analyse, voorbeeld voor scenario 1 (elektriciteitsvraag)

A Marktprijs warmtekrachtcertificaten 2,77 EUR

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Verbruik	Uitgaven	
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]					[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]
0				-220.000			-220.000			-220.000
1	100,00%	298	825		-4.640	-49.845	-53.660	41	-6.800	-60.460
2	100,00%	298	825		-4.640	-52.829	-56.644	41	-6.687	-63.331
3	100,00%	298	825		-4.640	-55.991	-59.806	41	-6.576	-66.382
4	100,00%	298	825		-4.640	-59.342	-63.158	41	-6.467	-69.624
5	94,20%	281	777		-4.640	-62.895	-66.758	41	-6.359	-73.117
6	83,49%	249	689		-4.640	-66.659	-70.611	41	-6.253	-76.864
7	72,78%	217	601		-4.640	-70.649	-74.689	41	-6.149	-80.838
8	62,08%	185	512		-4.640	-74.878	-79.006	41	-6.047	-85.053
9	51,37%	153	424		-4.640	-79.360	-83.577	41	-5.946	-89.523
10	40,66%	121	336		-4.640	-84.111	-88.415	41	-5.848	-94.263
11	29,95%	89	247		-4.640	-89.145	-93.538	41	-5.750	-99.289
12	19,25%	57	159		-4.640	-94.481	-98.963	41	-5.655	-104.617
13	8,54%	25	70		-4.640	-100.137	-104.706	41	-5.561	-110.267
14	0,47%	1	4		-4.640	-106.131	-110.767	41	-5.468	-116.235
15	0,00%	0	0		-4.640	-112.483	-117.124	41	-5.377	-122.501
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>										<b>-1.199.743</b>

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo	
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven			
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]				[EUR]	[EUR]
	[EUR]	[EUR]	[EUR]					[EUR]	
0	-7.750			-7.750			-7.750		-212.250
1		-500	-30.517	-31.017	350	-58.551	-89.568		29.108
2		-500	-32.344	-32.844	350	-57.577	-90.421		27.090
3		-500	-34.280	-34.780	350	-56.620	-91.400		25.018
4		-500	-36.332	-36.832	350	-55.678	-92.510		22.886
5		-500	-38.507	-39.007	350	-54.752	-93.759		20.643
6		-500	-40.812	-41.312	350	-53.842	-95.153		18.290
7		-500	-43.255	-43.755	350	-52.946	-96.701		15.863
8		-500	-45.844	-46.344	350	-52.066	-98.410		13.356
9		-500	-48.588	-49.088	350	-51.200	-100.288		10.765
10		-500	-51.496	-51.996	350	-50.349	-102.345		8.082
11		-500	-54.579	-55.079	350	-49.511	-104.590		5.301
12		-500	-57.846	-58.346	350	-48.688	-107.034		2.416
13		-500	-61.308	-61.808	350	-47.878	-109.686		-581
14		-500	-64.978	-65.478	350	-47.082	-112.560		-3.675
15		-500	-68.867	-69.367	350	-46.299	-115.666		-6.834
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>							<b>-1.155.002</b>		<b>-44.742</b>
<b>Intern rendement</b>								<b>-2,87%</b>	

**B Marktprijs warmtekrachtcertificaten 23,08 EUR**

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Verbruik	Uitgaven	[EUR]
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-220.000			-220.000			-220.000
1	100,00%	298	6.876		-4.640	-49.845	-47.609	41	-6.800	-54.409
2	100,00%	298	6.876		-4.640	-52.829	-50.593	41	-6.687	-57.280
3	100,00%	298	6.876		-4.640	-55.991	-53.755	41	-6.576	-60.331
4	100,00%	298	6.876		-4.640	-59.342	-57.106	41	-6.467	-63.573
5	94,20%	281	6.478		-4.640	-62.895	-61.057	41	-6.359	-67.416
6	83,49%	249	5.741		-4.640	-66.659	-65.558	41	-6.253	-71.812
7	72,78%	217	5.005		-4.640	-70.649	-70.285	41	-6.149	-76.434
8	62,08%	185	4.269		-4.640	-74.878	-75.250	41	-6.047	-81.297
9	51,37%	153	3.532		-4.640	-79.360	-80.468	41	-5.946	-86.415
10	40,66%	121	2.796		-4.640	-84.111	-85.955	41	-5.848	-91.802
11	29,95%	89	2.060		-4.640	-89.145	-91.726	41	-5.750	-97.476
12	19,25%	57	1.323		-4.640	-94.481	-97.798	41	-5.655	-103.453
13	8,54%	25	587		-4.640	-100.137	-104.190	41	-5.561	-109.750
14	0,47%	1	32		-4.640	-106.131	-110.739	41	-5.468	-116.207
15	0,00%	0	0		-4.640	-112.483	-117.124	41	-5.377	-122.501
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>										<b>-1.156.153</b>

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven	[EUR]	
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]				[EUR]
0	-7.750			-7.750			-7.750	-212.250
1		-500	-30.517	-31.017	350	-58.551	-89.568	35.159
2		-500	-32.344	-32.844	350	-57.577	-90.421	33.142
3		-500	-34.280	-34.780	350	-56.620	-91.400	31.069
4		-500	-36.332	-36.832	350	-55.678	-92.510	28.937
5		-500	-38.507	-39.007	350	-54.752	-93.759	26.343
6		-500	-40.812	-41.312	350	-53.842	-95.153	23.342
7		-500	-43.255	-43.755	350	-52.946	-96.701	20.267
8		-500	-45.844	-46.344	350	-52.066	-98.410	17.113
9		-500	-48.588	-49.088	350	-51.200	-100.288	13.873
10		-500	-51.496	-51.996	350	-50.349	-102.345	10.542
11		-500	-54.579	-55.079	350	-49.511	-104.590	7.114
12		-500	-57.846	-58.346	350	-48.688	-107.034	3.581
13		-500	-61.308	-61.808	350	-47.878	-109.686	-64
14		-500	-64.978	-65.478	350	-47.082	-112.560	-3.647
15		-500	-68.867	-69.367	350	-46.299	-115.666	-6.834
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>							<b>-1.155.002</b>	<b>-1.152</b>
<b>Intern rendement</b>								<b>2,86%</b>

**C Marktprijs warmtekrachtcertificaten 41,55 EUR**

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Verbruik	Uitgaven	[EUR]
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-220.000			-220.000			-220.000
1	100,00%	298	12.377		-4.640	-49.845	-42.108	41	-6.800	-48.908
2	100,00%	298	12.377		-4.640	-52.829	-45.092	41	-6.687	-51.779
3	100,00%	298	12.377		-4.640	-55.991	-48.254	41	-6.576	-54.830
4	100,00%	298	12.377		-4.640	-59.342	-51.605	41	-6.467	-58.072
5	94,20%	281	11.660		-4.640	-62.895	-55.875	41	-6.359	-62.234
6	83,49%	249	10.334		-4.640	-66.659	-60.965	41	-6.253	-67.219
7	72,78%	217	9.009		-4.640	-70.649	-66.281	41	-6.149	-72.430
8	62,08%	185	7.684		-4.640	-74.878	-71.835	41	-6.047	-77.882
9	51,37%	153	6.358		-4.640	-79.360	-77.642	41	-5.946	-83.589
10	40,66%	121	5.033		-4.640	-84.111	-83.718	41	-5.848	-89.566
11	29,95%	89	3.708		-4.640	-89.145	-90.078	41	-5.750	-95.828
12	19,25%	57	2.382		-4.640	-94.481	-96.739	41	-5.655	-102.394
13	8,54%	25	1.057		-4.640	-100.137	-103.720	41	-5.561	-109.281
14	0,47%	1	58		-4.640	-106.131	-110.713	41	-5.468	-116.181
15	0,00%	0	0		-4.640	-112.483	-117.124	41	-5.377	-122.501
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>										<b>-1.116.526</b>

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven	[EUR]	
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]				[EUR]
	[EUR]	[EUR]	[EUR]					
0	-7.750			-7.750			-7.750	-212.250
1		-500	-30.517	-31.017	350	-58.551	-89.568	40.660
2		-500	-32.344	-32.844	350	-57.577	-90.421	38.643
3		-500	-34.280	-34.780	350	-56.620	-91.400	36.570
4		-500	-36.332	-36.832	350	-55.678	-92.510	34.438
5		-500	-38.507	-39.007	350	-54.752	-93.759	31.525
6		-500	-40.812	-41.312	350	-53.842	-95.153	27.935
7		-500	-43.255	-43.755	350	-52.946	-96.701	24.271
8		-500	-45.844	-46.344	350	-52.066	-98.410	20.528
9		-500	-48.588	-49.088	350	-51.200	-100.288	16.699
10		-500	-51.496	-51.996	350	-50.349	-102.345	12.779
11		-500	-54.579	-55.079	350	-49.511	-104.590	8.762
12		-500	-57.846	-58.346	350	-48.688	-107.034	4.640
13		-500	-61.308	-61.808	350	-47.878	-109.686	406
14		-500	-64.978	-65.478	350	-47.082	-112.560	-3.621
15		-500	-68.867	-69.367	350	-46.299	-115.666	-6.834
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>							<b>-1.155.002</b>	<b>38.476</b>
<b>Intern rendement</b>								<b>7,23%</b>

**D Marktprijs warmtekrachtcertificaten 60,02 EUR**

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Verbruik	Uitgaven	TOTAAL
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-220.000			-220.000			-220.000
1	100,00%	298	17.879		-4.640	-49.845	-36.607	41	-6.800	-43.407
2	100,00%	298	17.879		-4.640	-52.829	-39.591	41	-6.687	-46.278
3	100,00%	298	17.879		-4.640	-55.991	-42.753	41	-6.576	-49.329
4	100,00%	298	17.879		-4.640	-59.342	-46.104	41	-6.467	-52.571
5	94,20%	281	16.842		-4.640	-62.895	-50.693	41	-6.359	-57.052
6	83,49%	249	14.927		-4.640	-66.659	-56.372	41	-6.253	-62.626
7	72,78%	217	13.013		-4.640	-70.649	-62.277	41	-6.149	-68.426
8	62,08%	185	11.098		-4.640	-74.878	-68.420	41	-6.047	-74.467
9	51,37%	153	9.184		-4.640	-79.360	-74.816	41	-5.946	-80.763
10	40,66%	121	7.270		-4.640	-84.111	-81.481	41	-5.848	-87.329
11	29,95%	89	5.355		-4.640	-89.145	-88.430	41	-5.750	-94.180
12	19,25%	57	3.441		-4.640	-94.481	-95.681	41	-5.655	-101.335
13	8,54%	25	1.527		-4.640	-100.137	-103.250	41	-5.561	-108.811
14	0,47%	1	83		-4.640	-106.131	-110.687	41	-5.468	-116.156
15	0,00%	0	0		-4.640	-112.483	-117.124	41	-5.377	-122.501
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>										<b>-1.076.899</b>

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven	TOTAAL	
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]				[EUR]
	[EUR]	[EUR]	[EUR]					[EUR]
0	-7.750			-7.750			-7.750	-212.250
1		-500	-30.517	-31.017	350	-58.551	-89.568	46.161
2		-500	-32.344	-32.844	350	-57.577	-90.421	44.144
3		-500	-34.280	-34.780	350	-56.620	-91.400	42.071
4		-500	-36.332	-36.832	350	-55.678	-92.510	39.939
5		-500	-38.507	-39.007	350	-54.752	-93.759	36.707
6		-500	-40.812	-41.312	350	-53.842	-95.153	32.528
7		-500	-43.255	-43.755	350	-52.946	-96.701	28.275
8		-500	-45.844	-46.344	350	-52.066	-98.410	23.943
9		-500	-48.588	-49.088	350	-51.200	-100.288	19.525
10		-500	-51.496	-51.996	350	-50.349	-102.345	15.016
11		-500	-54.579	-55.079	350	-49.511	-104.590	10.410
12		-500	-57.846	-58.346	350	-48.688	-107.034	5.698
13		-500	-61.308	-61.808	350	-47.878	-109.686	875
14		-500	-64.978	-65.478	350	-47.082	-112.560	-3.596
15		-500	-68.867	-69.367	350	-46.299	-115.666	-6.834
<b>Netto Contante Waarde (3%):</b>							<b>-1.155.002</b>	<b>78.103</b>
<b>Intern rendement</b>								<b>11,16%</b>

**E Marktprijs warmtekrachtcertificaten 83,10 EUR**

Jaar	WKK						Elektriciteitrekening		TOTAAL	
	Ontvangsten			Uitgaven			Saldo	Verbruik	Uitgaven	
	WKC		WKC	Investering	Onderhoud	Gasverbruik				
	[%]	[aantal]	[EUR]				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[MWh]
0				-220.000			-220.000			-220.000
1	100,00%	298	24.755		-4.640	-49.845	-29.731	41	-6.800	-36.531
2	100,00%	298	24.755		-4.640	-52.829	-32.714	41	-6.687	-39.401
3	100,00%	298	24.755		-4.640	-55.991	-35.876	41	-6.576	-42.452
4	100,00%	298	24.755		-4.640	-59.342	-39.228	41	-6.467	-45.694
5	94,20%	281	23.319		-4.640	-62.895	-44.216	41	-6.359	-50.575
6	83,49%	249	20.668		-4.640	-66.659	-50.631	41	-6.253	-56.884
7	72,78%	217	18.018		-4.640	-70.649	-57.272	41	-6.149	-63.421
8	62,08%	185	15.367		-4.640	-74.878	-64.151	41	-6.047	-70.198
9	51,37%	153	12.716		-4.640	-79.360	-71.284	41	-5.946	-77.231
10	40,66%	121	10.066		-4.640	-84.111	-78.685	41	-5.848	-84.533
11	29,95%	89	7.415		-4.640	-89.145	-86.370	41	-5.750	-92.121
12	19,25%	57	4.764		-4.640	-94.481	-94.357	41	-5.655	-100.012
13	8,54%	25	2.114		-4.640	-100.137	-102.663	41	-5.561	-108.224
14	0,47%	1	116		-4.640	-106.131	-110.655	41	-5.468	-116.123
15	0,00%	0	0		-4.640	-112.483	-117.124	41	-5.377	-122.501

**Netto Contante Waarde (3%): -1.027.365**

Jaar	Condenserende gasketel			Saldo	Elektriciteitrekening		TOTAAL	Saldo
	Uitgaven				Verbruik	Uitgaven		
	Investering	Onderhoud	Gasverbruik	[MWh]				[EUR]
	[EUR]	[EUR]	[EUR]					[EUR]
0	-7.750			-7.750			-7.750	-212.250
1		-500	-30.517	-31.017	350	-58.551	-89.568	53.038
2		-500	-32.344	-32.844	350	-57.577	-90.421	51.020
3		-500	-34.280	-34.780	350	-56.620	-91.400	48.948
4		-500	-36.332	-36.832	350	-55.678	-92.510	46.816
5		-500	-38.507	-39.007	350	-54.752	-93.759	43.184
6		-500	-40.812	-41.312	350	-53.842	-95.153	38.269
7		-500	-43.255	-43.755	350	-52.946	-96.701	33.280
8		-500	-45.844	-46.344	350	-52.066	-98.410	28.211
9		-500	-48.588	-49.088	350	-51.200	-100.288	23.057
10		-500	-51.496	-51.996	350	-50.349	-102.345	17.812
11		-500	-54.579	-55.079	350	-49.511	-104.590	12.469
12		-500	-57.846	-58.346	350	-48.688	-107.034	7.022
13		-500	-61.308	-61.808	350	-47.878	-109.686	1.463
14		-500	-64.978	-65.478	350	-47.082	-112.560	-3.564
15		-500	-68.867	-69.367	350	-46.299	-115.666	-6.834

**Netto Contante Waarde (3%): -1.155.002**

**Intern rendement 15,71%**



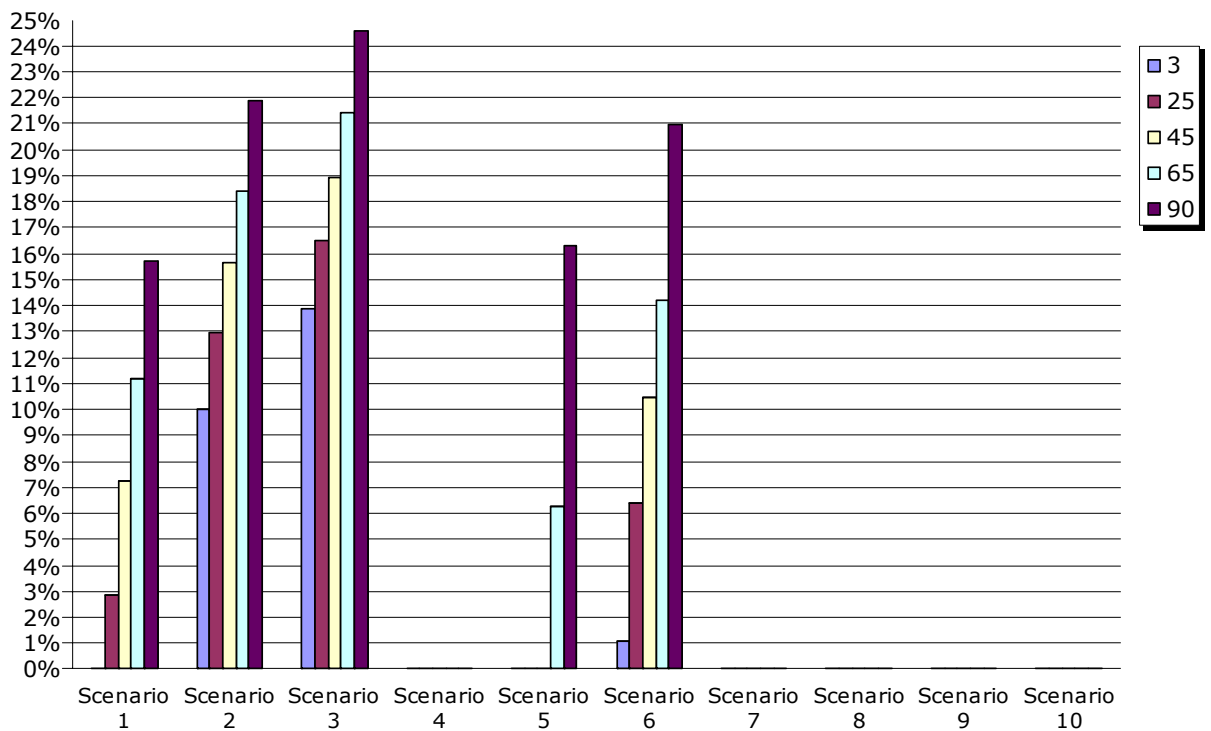
**Bijlage 8: NCW voor de dimensionering op elektriciteit met een verdisconteringpercentage van 3% [in EUR]**

<b>Energieprijzen</b>	<b>Boeteprijs WKC</b>				
	3 EUR	25 EUR	45 EUR	65 EUR	90 EUR
Scenario 1	-44.742	-1.152	38.476	78.103	127.637
Scenario 2	106.984	150.574	190.202	229.829	279.363
Scenario 3	201.639	245.229	284.857	324.484	374.018
Scenario 4	-260.812	-217.222	-177.594	-137.967	-88.433
Scenario 5	-109.086	-65.496	-25.868	13.759	82.916
Scenario 6	-14.431	29.159	68.787	108.414	178.217
Scenario 7	-636.062	-592.472	-552.845	-513.218	-445.312
Scenario 8	-484.336	-440.746	-401.119	-361.492	-292.335
Scenario 9	-389.681	-346.091	-306.464	-266.837	-197.033
Scenario 10	-279.611	-236.021	-196.393	-156.766	-86.303

<i>Jaarlijkse evolutie van de aardgasprijs</i>	<i>Jaarlijkse evolutie van de elektriciteitsprijs</i>			
	-1,66%	1,66%	3,33%	4,99%
5,99%	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	
11,97%	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	
17,96%	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10

**Bijlage 9: IR voor de dimensionering op elektriciteit**

Energieprijzen	Boeteprijs WKC				
	3 EUR	25 EUR	45 EUR	65 EUR	90 EUR
Scenario 1	-2,87%	2,86%	7,23%	11,16%	15,71%
Scenario 2	9,99%	12,95%	15,67%	18,42%	21,86%
Scenario 3	13,88%	16,49%	18,92%	21,41%	24,56%
Scenario 4	/	/	/	/	/
Scenario 5	/	/	/	6,29%	16,33%
Scenario 6	1,10%	6,40%	10,47%	14,18%	20,95%
Scenario 7	/	/	/	/	/
Scenario 8	/	/	/	/	/
Scenario 9	/	/	/	/	/
Scenario 10	/	/	/	/	/



**Bijlage 10: Output SPSS voor de dimensionering op elektriciteit**

**Variables Entered/Removed<sup>b</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	WKC, elektriciteit, aardgas	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: NCW

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,990 <sup>a</sup>	,980	,979	38132,83589

a. Predictors: (Constant), WKC, elektriciteit, aardgas

**ANOVA<sup>b</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3,3E+012	3	1,100E+012	756,430	,000 <sup>a</sup>
	Residual	6,7E+010	46	1454113173		
	Total	3,4E+012	49			

a. Predictors: (Constant), WKC, elektriciteit, aardgas

b. Dependent Variable: NCW

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	341555,3	16794,304		20,338	,000
	aardgas	-4896894	110352,8	-,938	-44,375	,000
	elektriciteit	4956614	239994,8	,437	20,653	,000
	WKC	2096,629	178,043	,245	11,776	,000

a. Dependent Variable: NCW