

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef

*De toepassing van micro-warmtekrachtkoppeling in
woningen*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Tim Henkens

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur , afstudeerrichting operationeel management
en logistiek*

Woord vooraf

Deze masterproef over warmtekrachtkoppeling vertegenwoordigt het eindresultaat van een vijfjarige opleiding als Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt. Tijdens deze periode heb ik kennis opgedaan in verschillende opleidingsonderdelen die zijn aangewend bij het schrijven van deze masterproef. De keuze voor dit onderwerp is te vinden in mijn interesse voor technologische vernieuwingen op het gebied van milieubeleid. De energieproblematiek is een ernstig en actueel probleem dat vraagt voor de nodige aandacht. Met deze masterproef wil ik een bijdrage leveren om het wereldwijde energieprobleem aan te pakken. Het feit dat warmtekrachtkoppeling kan worden toegepast op residentiële schaal maakt het onderwerp voor mij des te boeiender.

Voor de realisatie van dit werk bedank ik een aantal mensen: mijn promotor prof. dr. Theo Thewys, die mij steeds heeft bijgestaan met de gepaste uitleg en professionele begeleiding; Alain Thijs van het bedrijf FaCoTherm die mij voorzien heeft van belangrijke informatie omtrent micro-warmtekrachtkoppeling; de gezinnen Wuyts, Knoops en Piccart voor het openstellen van hun woning, waardoor ik de nodige data kon vergaren; tot slot mijn familie en vrienden die mij niet alleen tijdens het schrijven van deze masterproef hebben gesteund, maar gedurende mijn volledige studies.

Diepenbeek, Mei 2012

Tim Henkens

Samenvatting

De wereldwijde energieproblematiek is al lang geen geheim meer. De gevolgen beginnen steeds meer en meer zichtbaar te worden en de tijd om er iets aan te doen is nu. Een eenduidige oplossing voor het probleem bestaat niet, maar vergt inspanningen op verschillende domeinen. Diverse hernieuwbare energiebronnen kennen een stijgende populariteit, maar zijn nog steeds niet voldoende om aan de steeds groeiende energiebehoefte te voldoen. De overige energie wordt nog steeds opgewekt met fossiele, vervuilende brandstoffen. Het is essentieel dat de energie die opgewekt wordt met fossiele brandstoffen zo efficiënt mogelijk wordt opgewekt. Warmtekracht-koppeling is hiervoor een mogelijke oplossing. Warmtekrachtkoppeling (WKK) is de gecombineerde productie van thermische en elektrische energie uitgaande van dezelfde primaire energiebron. Dit leidt tot een verminderde CO₂-uitstoot. Naast ecologische voordelen is ook de economische kant van het verhaal belangrijk. Op grote schaal (> 50 kWe) wordt WKK al veelvuldig toegepast en heeft het zijn economische aantrekkelijkheid reeds bewezen. Op kleine schaal (1-2 kWe) is de rentabiliteit echter onvoldoende onderzocht, mede door het feit dat het vrij recent ontstaan is. In deze masterproef wordt onderzocht of warmtekrachtkoppeling op kleine schaal (micro-warmtekrachtkoppeling) economisch aantrekkelijk is en welke variabelen hierop een invloed uitoefenen.

Er zijn een aantal technologieën die het principe van warmtekrachtkoppeling toepassen, die worden bekeken in hoofdstuk 3. Zo zijn er de klassieke zuigermotoren die gebruik maken van inwendige verbranding en de Stirlingmotoren en ORC-installaties (Organische Rankine Cyclus) die uitwendige verbranding toepassen. Daarnaast zijn er nog brandstofcellen en microturbines die ook gebruik maken van warmtekrachtkoppeling. Elke technologie heeft zijn voor- en nadelen, maar de Stirlingmotor is voor micro-WKK op dit moment de beste keuze. WhisperGen is in Vlaanderen de pionier wat betreft micro-WKK en in deze masterproef wordt verder gewerkt op basis de WhisperGen EU1.

In het vierde hoofdstuk gaat het uitsluitend over het dimensioneren van de WKK-installatie. Dit houdt in dat de grootte en capaciteit van de installatie moet bepaald worden. Om dit te kunnen bepalen, moet de jaarlijkse warmte- en elektriciteitsvraag eerst nauwkeurig geanalyseerd worden. Zo een dimensionering van de WKK-installatie is in tegenstelling tot bij een conventionele warmteketel geen eenvoudige opdracht, maar is essentieel voor zijn rentabiliteit. Een methode om de WKK te dimensioneren is door het opstellen van jaarbelastingsduurcurves van de warmtevraag en de elektriciteitsvraag. Op basis hiervan en enkele andere praktische factoren kan uiteindelijk de juiste capaciteit bepaald worden. De jaarbelastingsduurcurves worden opgesteld aan de hand van verbruiksgegevens van het gemiddelde van alle Vlaamse gezinnen. Dergelijke curves geven echter niet het correcte beeld van één enkele residentiële woning. Daarom wordt ook een curve opgesteld die realistischer lijkt voor één woning.

In het belangrijke vijfde hoofdstuk wordt de economische haalbaarheid van micro-WKK in een residentiële woning nagegaan met behulp van Excel. De Netto Contante Waarde en het Intern Rendement zijn goede parameters om de economische aantrekkelijkheid van een bepaalde investering te analyseren. Om de NCW en het IR van micro-WKK te berekenen zijn er verschillende variabelen die allen op hun eigen, unieke manier een invloed uitoefenen. Deze variabelen worden eerst afzonderlijk uitgelegd en er wordt aangehaald welke waarde ze aannemen in het basismodel. Van daaruit kan de NCW en het IR berekend worden.

Aangezien een groot aantal variabelen mee de NCW en het IR bepalen, is het belangrijk dat er wordt nagegaan welke van deze variabelen nu een belangrijke invloed uitoefenen. Een sensitiviteitsanalyse is geschikt om dit na te gaan. Op basis van twee verschillende Monte Carlo-simulaties wordt onderzocht welke variabelen de grootste invloed uitoefenen. Als we weten welke variabelen belangrijk zijn, weten we ook op welke manier we de economische aantrekkelijkheid van micro-WKK kunnen vergroten.

Micro-warmtekrachtkoppeling wordt pas rendabel als de installatie voldoende draaiuren kan realiseren. Hiervoor moet de warmtevraag voldoende hoog zijn. Nieuwbouwwoningen hebben tegenwoordig zulke strenge isolatienormen dat de warmtevraag heel beperkt is. Daarom richt micro-WKK zich vooral op de renovatiemarkt. In hoofdstuk 7 wordt het marktpotentieel van micro-WKK onderzocht door het gebouwenpark in Vlaanderen te analyseren. Zo kunnen we schatten hoeveel residentiële woningen in Vlaanderen het juiste profiel hebben om warmtekrachtkoppeling toe te passen. Zoals al werd aangehaald realiseert warmtekrachtkoppeling door een efficiënte opwekking van warmte en elektriciteit een CO₂-besparing. In deze masterproef wordt ook nagegaan hoe groot deze besparing is.

Inhoudsopgave

Woord vooraf

Samenvatting

Inhoudsopgave

Lijst van figuren

1. Centrale Onderzoeksvraag	1
2. Inleiding	3
2.1. Situering	3
2.2. Wat is warmtekrachtkoppeling?	6
2.3. Conventionele wijze	6
2.4. Micro-WKK	8
3. Technologieën	11
3.1. Klassieke zuigermotoren (inwendige verbranding)	11
3.2. Stirlingmotoren	12
3.3. Organische Rankine Cyclus (ORC)	13
3.4. Brandstofcellen	13
3.5. Microturbines	14
4. Dimensionering	15
4.1. Algemeen	15
4.2. Toepassing dimensionering	18
5. Economische haalbaarheid	25
5.1. Eenheidsprijs Micro-WKK	27
5.2. Rendementen micro-WKK	28
5.3. Elektriciteitsvraag	29
5.4. Warmtevraag	29
5.5. Jaarlijkse kost	31
5.5.1. Jaarlijkse kost decentrale opwekking	33
5.5.2. Jaarlijkse kost centrale opwekking	33
5.6. Ontwikkeling energieprijzen	35
5.6.1. Aardgas	35
5.6.2. Elektriciteit	36

5.7.	Warmtekrachtcertificaten	38
5.7.1.	Toekenning	39
5.7.2.	Verkoop warmtekrachtcertificaten.....	40
5.7.3.	Bepaling Aantal Warmtekrachtcertificaten.....	43
5.7.4.	Degressiviteit	44
5.8.	Verwachte levensduur.....	49
5.9.	Discontovoet.....	50
5.10.	Conclusie Basismodel	50
6.	Sensitiviteitsanalyse.....	55
6.1.	Uniform model	57
6.1.1.	Verdeling.....	57
6.1.2.	Monte Carlo-simulatie	58
6.1.3.	Invloed variabelen	59
6.2.	Realistisch model	62
6.2.1.	Verdeling.....	62
6.2.2.	Correlaties.....	64
6.2.3.	Monte Carlo-simulatie	65
6.2.4.	Invloed variabelen	66
6.3.	Conclusie sensitiviteitsanalyse	69
7.	Marktpotentieel	73
7.1.	Warmtevraag.....	73
7.1.1.	Type woning	73
7.1.2.	Bouwjaar woning.....	74
7.1.3.	Grootte woning	75
7.2.	Type verwarming	75
7.3.	Vervangingsnelheid	76
7.4.	Hindernissen.....	77
7.5.	Conclusie marktpotentieel	77
8.	Milieu.....	79
8.1.	Absolute CO2-besparing	79
8.2.	Relatieve CO2-besparing	80
9.	Conclusie	83

Literatuurlijst.....	89
-----------------------------	-----------

Bijlagen.....	93
----------------------	-----------

Bijlage 1: Jaarlijkse elektriciteits- en warmtevraag per maand	93
Bijlage 2: Berekening jaarlijkse elektriciteitsproductie	95
Bijlage 3: Fractie X warmtekrachtcertificaten	96
Bijlage 4: Monte Carlo-simulatie IR Uniform model	97
Bijlage 5: Invloed variabelen IR Uniform model	98
Bijlage 6: Verdeling variabelen Realistisch model.....	99
Bijlage 7: Correlaties Realistisch model	102
Bijlage 8: Monte Carlo-simulatie IR Realistisch model.....	104
Bijlage 9: Invloed variabelen IR Realistisch model	105

Lijst van figuren

Figuur 1: Totale Energieconsumptie op wereldschaal in Mtoe (Megaton Oil Equivalent)	3
Figuur 2: Primaire energielevering op wereldschaal in Mtoe.....	5
Figuur 3: Globale CO ₂ -uitstoot in Mt (Megaton).....	5
Figuur 4: Verschil conventionele wijze en WKK	7
Figuur 5: Evolutie energieverbruik Vlaanderen per sector.....	9
Figuur 6: Voorbeeld Jaarbelastingsduurcurve.....	17
Figuur 7: Jaarlijks verbruik elektriciteit per uur in kW	19
Figuur 8: Jaarlijks verbruik warmte per uur in kW	19
Figuur 9: Jaarbelastingsduurcurve.....	21
Figuur 10: Jaarbelastingsduurcurve één residentiële woning	23
Figuur 11: JBDC met capaciteit WhisperGen EU1	27
Figuur 12: Elektriciteit-eenheidsprijs	31
Figuur 13: Aardgas-eenheidsprijs.....	32
Figuur 14: Evolutie van de fossiele brandstofprijzen	36
Figuur 15: Evolutie Gemiddelde elektriciteitsprijs Vlaanderen	37
Figuur 16: Samenvatting systeem WKC	40
Figuur 17: Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten per maand, vanaf 2006	41
Figuur 18: Prijs van een warmtekrachtcertificaat per maand, vanaf januari 2011	42
Figuur 19: Degressiviteit Warmtekrachtcertificaten	48
Figuur 20: Basismodel	53
Figuur 21: Monte Carlo-simulatie Uniform model	58
Figuur 22: Invloed variabelen NCW Uniform model.....	60
Figuur 23: Monte Carlo-simulatie Realistisch model	65
Figuur 24: Invloed variabelen NCW Realistisch model	67

1. Centrale Onderzoeksvraag

Warmtekrachtkoppeling is een technologie die op grote schaal (> 50 kWe) al bewezen heeft een rendabele oplossing te zijn om op een alternatieve manier energie op te wekken. Niet alleen wordt er minder CO_2 uitgestoten, maar de hoge investeringskost wordt door een verlaagde elektriciteits-factuur terugverdiend over de levensduur. Recent is men op de markt gekomen met warmtekrachtkoppeling voor residentiële woningen (1-2 kWe). De rentabiliteit van zulke micro-WKK's is echter onvoldoende onderzocht. Daarom wijd ik deze masterproef aan het onderzoeken van de rentabiliteit van micro-WKK voor residentiële woningen in Vlaanderen, wat leidt tot volgende centrale onderzoeksvraag:

IS MICRO-WARMTEKRACHTKOPPELING VOOR RESIDENTIËLE WONINGEN
RENDABEL IN VLAANDEREN?

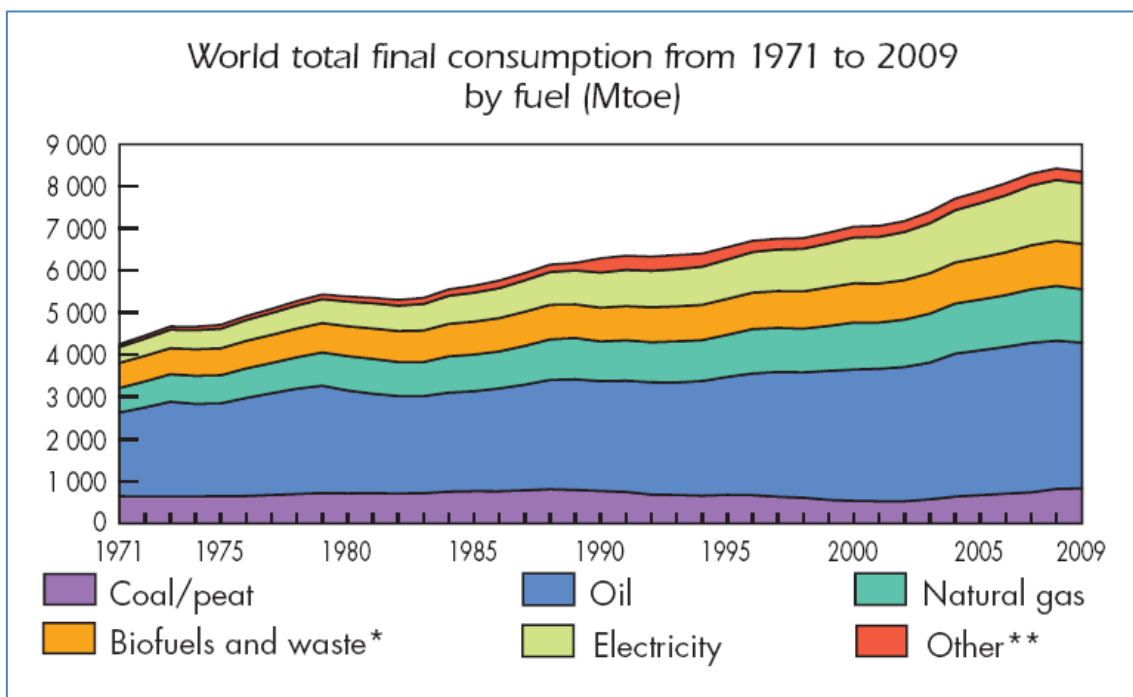
Enkele deelvragen die bij het beantwoorden van de centrale onderzoeksvraag kunnen helpen zijn:

- Welke variabelen spelen een belangrijke rol voor de rentabiliteit van een micro-WKK?
- Wat kan er nog veranderen/verbeteren om de rentabiliteit te verhogen?
- Hoe ziet de toekomst eruit voor micro-warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen?

2. Inleiding

2.1. Situering

De huidige maatschappij wordt gekarakteriseerd door de steeds groeiende behoefte aan welvaart en comfort. Om deze behoefte te vervullen, verbruiken wij dagelijks enorme hoeveelheden energie. In Figuur 1 is de totale energieconsumptie op wereldschaal te zien van 1971 tot 2009. We zien dat deze in ongeveer 40 jaar bijna verdubbeld is. Een vaststelling is wel dat de afgelopen jaren een lichte daling te zien is. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de bewustwording van de bevolking van de ernst van het probleem. Vele mensen proberen inspanningen te leveren om hun energieconsumptie te beperken omdat het besef steeds groter en groter wordt wat de gevolgen voor henzelf en volgende generaties kunnen betekenen.

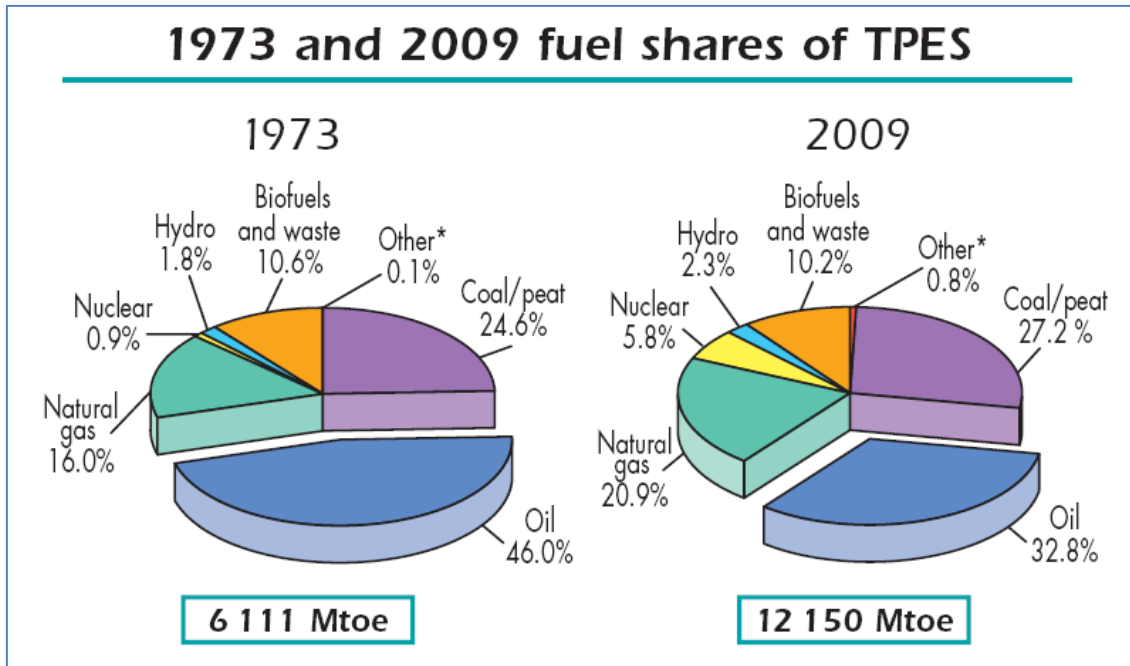


Figuur 1: Totale Energieconsumptie op wereldschaal in Mtoe (Megaton Oil Equivalent) (Bron: International Energy Agency, 2011)

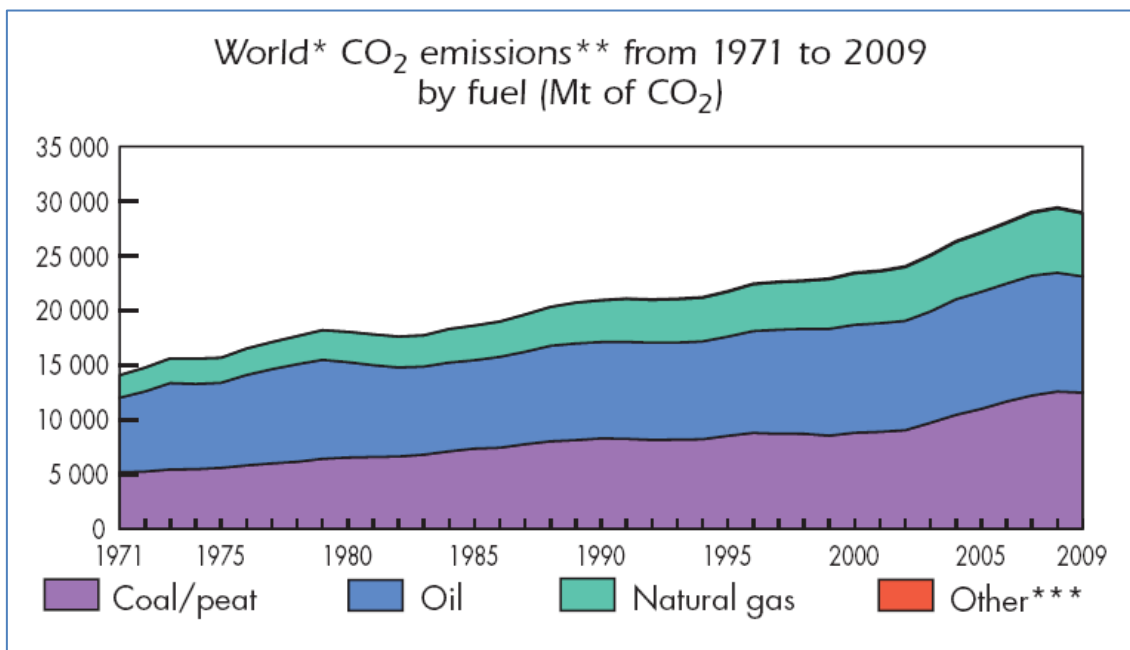
In Figuur 2 zien we uit welke bronnen we deze energie halen. Onze energie is voornamelijk afkomstig uit fossiele brandstoffen (zoals kolen, olie en gas) en kernenergie. We weten dat de verbranding van de fossiele brandstoffen schadelijke emissies (CO_2 , roet, NO_x , ...) met zich meebrengt en bij het gebruik van kernenergie is er het probleem van het radioactief afval. In Figuur 3 wordt de globale CO_2 -uitstoot getoond. We zien dat deze grafiek een gelijkaardig patroon vertoont als de energieconsumptie met een quasi verdubbeling tijdens de afgelopen 40 jaar en een lichte daling gedurende de laatste jaren. Over de schadelijkheid van deze primaire energievormen zijn echter genoeg wetenschappelijke artikels geschreven en valt dan ook buiten het doel van deze masterproef. Buiten de schadelijkheid van de fossiele brandstoffen, is er tevens het probleem van de eindigheid van deze brandstoffen. Dit alles verplicht ons om meer rationeel gebruik te maken van energie. Hiervoor kunnen we terugvallen op de bekende Trias Energetica (*Bron: Fernand van Heuveln, 2009*) die het volgende stelt:

1. Beperk het energieverbruik door verspilling tegen te gaan.
2. Gebruik duurzame energiebronnen, zoals wind-, water- en zonne-energie.
3. Zet fossiele brandstoffen zo efficiënt mogelijk in om aan de resterende energiebehoefte te voldoen.

De volgorde die de Trias Energetica vooropstelt, dient gerespecteerd te worden. We proberen dus eerst het energieverbruik te beperken, het overige deel proberen we zoveel mogelijk op te wekken met duurzame energiebronnen en wat er dan nog overblijft gaan we zo efficiënt mogelijk opwekken met fossiele brandstoffen. Deze masterproef handelt over de derde regel, hoewel eventueel ook de tweede regel van toepassing kan zijn indien een combinatie wordt gemaakt van micro-warmtekrachtkoppeling en bio-olie of PV-panelen. In deze masterproef zal het uitsluitend gaan over micro-warmtekrachtkoppeling op basis van aardgas, aangezien micro-WKK's die draaien op duurzame energiebronnen nog in ontwikkeling zijn.



Figuur 2: Primaire energielevering op wereldschaal in Mtoe (Bron: International Energy Agency, 2011)



Figuur 3: Globale CO₂-uitstoot in Mt (Megaton) (Bron: International Energy Agency, 2011)

2.2. Wat is warmtekrachtkoppeling?

Een definitie van warmtekrachtkoppeling (WKK) die veelvuldig in de literatuur voorkomt, luidt als volgt (*Bron: Handboek WKK COGEN Vlaanderen, 2006*):

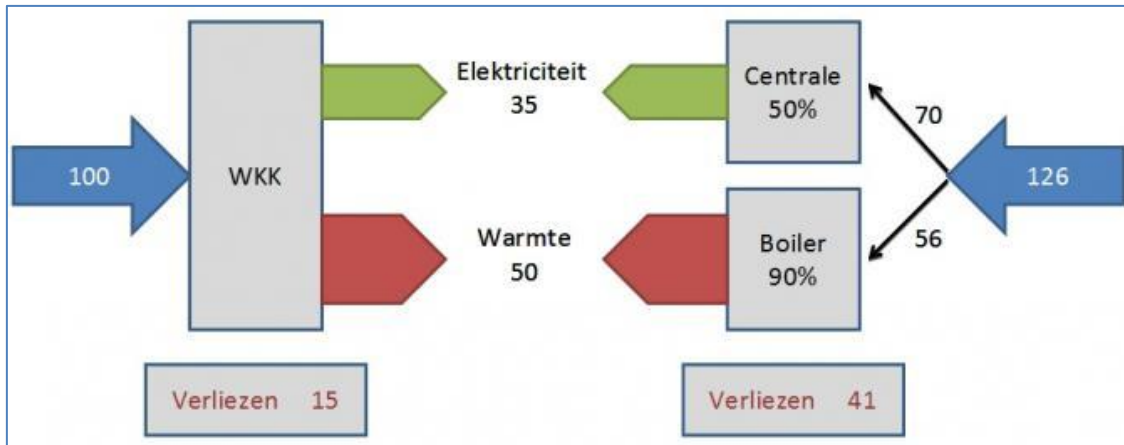
'Warmtekrachtkoppeling is de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische energie) en nuttige thermische energie, uitgaande van dezelfde primaire energiebron.'

De geproduceerde thermische energie kan zowel voor verwarming als voor koeling gebruikt worden, waarbij de koeling gerealiseerd wordt door een absorptiekoelmachine.

2.3. Conventionele wijze

De conventionele manier om te voldoen aan onze behoefte aan elektriciteit en warmte, is door enerzijds elektriciteit aan te kopen uit het lokale net en anderzijds door warmte te genereren in een verwarmingsketel, stoomketel, enz. Dit wordt de gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit genoemd. (*Bron: Handboek WKK COGEN Vlaanderen, 2006*)

Door de toepassing van warmtekrachtkoppeling (gecombineerde opwekking), kan men een aanzienlijke daling in het primaire brandstofverbruik bekomen. Dit verschil tussen de conventionele manier en de gecombineerde productie en de gevolgen daarvan voor het primair brandstofverbruik kunnen we uitleggen aan de hand van onderstaande figuur.



Figuur 4: Verschil conventionele wijze en WKK (Bron: VREG¹)

Als we Figuur 4 nauwkeuriger analyseren, zien we dat van dezelfde energiebron (vb. aardgas) bij de gescheiden opwekking (rechts op Figuur 4) 126 eenheden energie-input nodig zijn om 35 eenheden elektriciteit en 50 eenheden warmte op te wekken. Bij de gecombineerde opwekking (links op Figuur 4) zijn daarentegen slechts 100 eenheden energie-input nodig om dezelfde hoeveelheid elektriciteit en warmte te verkrijgen. De gecombineerde productie (warmtekracht-koppeling) levert een 'nettowinst' op van 26 eenheden. De vraag die dan rest, is hoe we aan die nettowinst komen.

Het antwoord op deze vraag kan gevonden worden in de 'kwaliteit van een energievorm' of 'exergie' zoals het in de thermodynamica ook wel genoemd wordt. De eerste wet van thermodynamica zegt dat energie van de ene vorm in de andere kan veranderen, maar de totale hoeveelheid energie blijft altijd constant. Er kan nooit energie verloren gaan. De tweede wet van thermodynamica zegt dat energie naast kwantiteit ook een bepaalde kwaliteit bezit en dat de kwaliteit van de energie afneemt in de richting van een bepaald proces. Het is in deze tweede wet dat we exergie kunnen situeren. (Bron: Cengel, Dincer, Kanoglu, 2008) Exergie geeft aan in welke mate een bepaalde energievorm kan omgezet worden in andere energievormen. Zo kan elektriciteit bijna volledig omgezet worden in andere energievormen (denk maar aan licht, beweging enz.) en heeft elektriciteit bijgevolg

¹ www.vreg.be/algemene-ingo-0

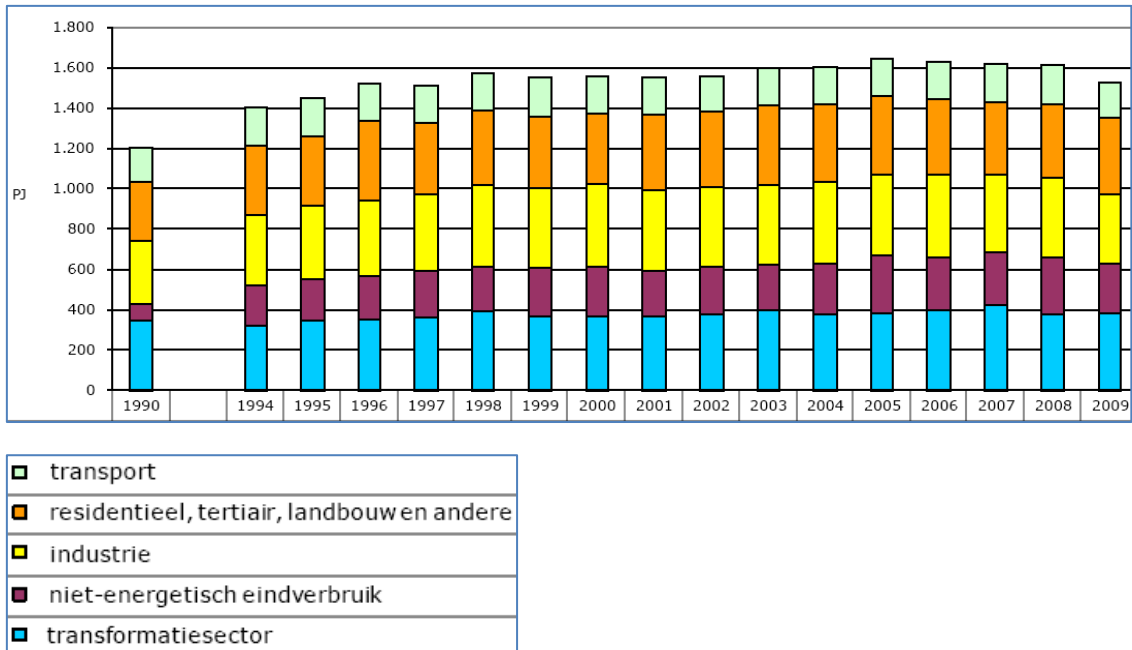
een hoge kwaliteit. Bij warmte neemt de omzetbaarheid in andere energievormen af met de temperatuur. *(Bron: Handboek WKK COGEN Vlaanderen, 2006)*

Conventioneel produceert men warmte door een brandstof te verstoken in boilers, fornuizen of ketels, die dichtbij de eindgebruiker gelegen zijn. Een energievorm van hoge kwaliteit (brandstof) wordt omgezet naar een energievorm van lage kwaliteit (warmte op lage temperatuur), die zelf slechts in beperkte mate kan omgezet worden in nog andere energievormen. De energieverliezen bij de afzonderlijke opwekking zijn beperkt, maar er is wel sprake van een aanzienlijk kwaliteitsverlies. *(Bron: Handboek WKK COGEN Vlaanderen, 2006)*

Bij warmtekrachtkoppeling wordt hoogwaardige energie (warmte op hoge temperatuur) die is vrijgekomen bij de verbranding van een brandstof eerst gebruikt voor de productie van mechanische energie. Deze mechanische energie wordt dan aangewend om elektriciteit te genereren, meestal via een alternator. Hierna blijft er nog laagwaardige restwarmte over die gebruikt kan worden om warmte te produceren. Dit laatste is precies de reden waarom een WKK-installatie best op de warmtevraag gedimensioneerd wordt. De dimensionering van de warmtevraag komt in een later hoofdstuk meer in detail aan bod. WKK kan dus een belangrijke rol spelen in de strijd tegen het energieprobleem omdat er primaire brandstof bespaard wordt en tevens minder CO₂-uitstoot is. *(Bron: Handboek WKK COGEN Vlaanderen, 2006)*

2.4. Micro-WKK

In Figuur 5 zien we de evolutie van het energieverbruik in Vlaanderen per sector. We zien dat het residentiële energieverbruik een aanzienlijk deel van het totale energieverbruik in Vlaanderen voor zijn rekening neemt. Dit betekent dat er op dit gebied mogelijk opportuniteiten zijn voor verbeteringen.



Figuur 5: Evolutie energieverbruik Vlaanderen per sector (Bron: Aernouts, Jespers en Vangeel, 2010)

Het idee achter micro-WKK is hetzelfde als WKK zoals het eerder werd uitgelegd. Het verschil is dat de elektrische en thermische vermogens aangepast (lager) zijn om te voldoen aan de noden van een residentiële woning. Een eenduidige grens om aan te geven vanaf welke hoeveelheid vermogen er sprake is van μ WKK, is er niet en leidt ook vaak tot discussie. In deze masterproef gaat het over micro-WKK's voor strikt residentieel gebruik en nemen we aan dat we werken met elektrische vermogens in de grootteorde van 1-2 kWe. (Bron: Dexters en Six, 2009)

3. Technologieën

Er zijn momenteel een aantal technologieën voorhanden die qua elektrisch vermogensbereik in aanmerking komen voor de toepassing van micro-WKK in residentiële woningen. Deze kunnen als volgt worden ingedeeld:

- Klassieke zuigermotoren → Inwendige verbranding
- Stirlingmotoren } Uitwendige verbranding
- Organische rankine cyclus }
- Brandstofcellen
- Micro-turbines

Hieronder worden kort de verschillende technologieën besproken samen met de voor- en nadelen. (*Bron: Cetinkaya en Lemmens, 2008*) Voor een meer uitgebreid overzicht van de technologie verwijst ik graag naar het handboek van COGEN Vlaanderen².

3.1. Klassieke zuigermotoren (inwendige verbranding)

Een mengsel van brandstof en lucht ontbrandt in een cilinder waardoor een zuiger een heen- en weergaande beweging maakt. Door een krukas wordt die beweging omgezet in een roterende beweging, waarvan een alternator gebruik maakt om elektriciteit op te wekken. Bijkomend produceert een verbrandingsmotor veel warmte die gebruikt kan worden, meestal in de vorm van warm water.

De bruikbare brandstof is afhankelijk van het type motor. Meestal functioneren de motoren van een micro-WKK op gas (methaan (aardgas), butaan, propaan, rioolgas, biogas, ...). Door het gebruik van hernieuwbare brandstoffen (biobrandstoffen) zijn we in staat een dubbel

² COGEN Vlaanderen vzw, Basishandboek Warmtekrachtkoppeling, Leuven, 2006.

voordeel te creëren. Enerzijds het voordeel van WKK en anderzijds het voordeel van hernieuwbare brandstoffen.

De voordelen van de klassieke zuigermotoren zijn de lage investeringskost van de installaties, de betrouwbaarheid en de hoge rendementen die de motoren halen, zelfs bij kleine vermogens. Daarnaast is het de meest geavanceerde technologie en heeft het een hoge beschikbaarheid. De nadelen zijn echter het hoge geluidsniveau van de installaties en het vergt heel wat onderhoudswerk. Ook stoten de klassieke zuigermotoren heel wat polluerende emissies uit zoals NO_x en SO_x .

3.2. Stirlingmotoren

Stirlingmotoren werken met uitwendige verbranding wat toelaat een groot aantal brandstoffen te gebruiken (vloeibaar, gas, kolen, ...). Stirlingmotoren werken via een zuigermechanisme dat het gas verplaatst van het warme naar het koude gedeelte via de regenerator. Hierdoor ontstaat expansie en compressie van het arbeidsmedium. Het is een gesloten systeem, waarbij geen stofuitwisseling plaatsvindt met de omgeving, enkel energiewisseling.

Doordat de verbranding extern en continu is, kan in principe elk type primaire brandstof gebruikt worden: vaste, vloeibare en gasvormige fossiele brandstoffen, houtpellets, biobrandstof, ...

Voordelen van de Stirlingmotor is het hoge rendement dat het kan behalen en de goede prestaties bij deellast. Ook de flexibiliteit betreffende de brandstof is een goede eigenschap. In tegenstelling tot de klassieke zuigermotoren stoten de Stirlingmotoren weinig emissies uit en is er weinig last van lawaaihinder of trillingen. Het nadeel is echter dat de technologie nog in volle ontwikkeling is, waardoor beschikbaarheid vrij laag is (zoals we verderop zullen zien).

Van alle technologieën is de Stirlingmotor het meest waarschijnlijk om op korte termijn commercieel door te breken, daarom zal in het vervolg van deze masterproef met deze technologie worden gewerkt om de economische aspecten van micro-WKK in residentiële woningen te onderzoeken.

3.3. Organische Rankine Cyclus (ORC)

ORC-installaties zijn een variant op de klassieke stoomturbines. Maar door met organische vloeistoffen (pentaan, hexaan, toluen, ammoniak, ...) in de plaats van met water als arbeidsmedium te werken, kunnen de prestaties van het systeem verbeterd worden. Na verdamping van de vloeistof, expandeert de stoom over een stoomturbine waardoor deze een mechanisch vermogen levert dat kan aangewend worden om bijvoorbeeld een generator aan te drijven.

Net zoals bij de Stirlingmotor maakt deze machine gebruik van uitwendige verbranding waardoor ze met eender welke brandstof kan functioneren.

De voordelen van organische vloeistoffen in vergelijking met water zijn de lagere turbinekosten en de lagere verdampingstemperaturen door hun betere eigenschappen. Nadelen zijn echter dat deze organische vloeistoffen vrij duur zijn, gevaarlijk zijn (vb. toluen) en hun thermische stabiliteit is beperkt.

3.4. Brandstofcellen

Een brandstofcel zet waterstof en zuurstof via een elektrochemisch proces om in elektrische energie. Er komt geen verbranding of mechanische energie aan te pas. Omdat het over een exotherme reactie gaat, is het mogelijk brandstofcellen in WKK-toepassingen te gebruiken.

Brandstofcellen worden gezien als een groeiende en beloftevolle technologie, maar zitten voorlopig (voor WKK) nog in de ontwikkelingsfase.

Brandstofcellen bezitten een aantal eigenschappen die het een beloftevolle technologie maken. De cellen produceren heel weinig geluid en de onderhoudskosten zijn laag. Deze technologie heeft net als de Stirlingmotoren een goed gedrag bij deellast en het stoot ook zeer weinig emissies uit. Het is daarom een technologie die zeker een groot toekomstperspectief heeft. De nadelen zijn zeker op dit moment nog de hoge investeringskost en de korte levensduur van de cellen. Ook moet waterstof eerst nog gevormd worden door reforming. Hierbij wordt koolwaterstof in aanwezigheid van stoom en/of zuurstofgas omgezet in een waterstofrijk gasmengsel.

3.5. Microturbines

Microturbines werken volgens dezelfde principes als de klassieke grote gasturbines maar dan op veel kleinere schaal. De vermogens die er nu te vinden zijn in de literatuur zijn echter nog te groot om toepasbaar te kunnen zijn op residentieel niveau. De voordelen van microturbines bestaan uit de hoge brandstofflexibiliteit, de lage onderhoudskosten en de lage uistoot van schadelijke stoffen. Ook is er slecht één warmtewisselaar nodig. De elektrische vermogens liggen echter (voorlopig) nog veel te hoog.

De klassieke zuigermotoren die via inwendige verbranding werken worden ook gebruikt voor grotere vermogens. Enkele voorbeelden daarvan zijn Viessmann, Ecopower en Senertec. Voorbeelden van interne verbrandingsmotoren voor kleine vermogens zijn Freewatt (Honda), Ecowill (Honda) en Aisin (Toyota). De Stirlingmotor wordt enkel gebruikt voor kleine vermogens en voorbeelden hiervan zijn WhisperGen, Buderus en Baxi/Remeha/Viessmann. Van Whispergen is reeds een product op de markt, van de andere merken wordt er een product op de markt verwacht in 2012.

4. Dimensionering

4.1. Algemeen

Dimensioneren kan als volgt omschreven worden: dimensioneren is jargon voor het op basis van ervaring en met behulp van relatief eenvoudige vuistregels globaal bepalen van de afmetingen (dimensies) van bouwconstructies. (*Bron: Wikipedia*) In deze masterproef gaat het om het bepalen van de capaciteit van de micro-WKK. Bij de dimensionering van een gewone verwarmingsketel zijn er een aantal vuistregels die men kan toepassen om de grootte van de ketel te bepalen. Hij wordt zodanig gedimensioneerd dat hij de pieklast kan dragen. Als hij te groot wordt gedimensioneerd is dit geen drama, aangezien de meerprijs hiervan niet zo hoog ligt (50-100€ per kW_{th}).

Voor de dimensionering van een WKK zijn er echter geen vuistregels. Een WKK is namelijk geen verwarmingsketel. Voor een WKK is warmte een afvalproduct. Door het produceren van elektriciteit moet een WKK zichzelf terugverdienen. WKK's met verbrandingsmotoren hebben een grote thermische traagheid, wat wil zeggen dat het een tijdje duurt voor er warmte beschikbaar is. Daarom kan een WKK niet gedimensioneerd worden op de pieklast, maar op de basislast. De pieklast wordt opgevangen door een bijkomende HR-ketel en/of een aangepaste warmtebuffer. Dit is echter niet enkel voor het opvangen van de pieklast, maar is ook belangrijk voor het opvangen van de start-stopcyclussen, de thermische traagheid, de fluctuaties in de vraag en het niet-synchroon verloop van de warmte- en elektriciteitsvraag. Bij de simultane productie van warmte en elektriciteit kan het zijn dat op een bepaald moment een teveel aan elektriciteit geproduceerd wordt. Dit overschot aan geproduceerde elektriciteit kan worden afgegeven aan het net. Als de nettoproductie van elektriciteit negatief is (dit wil zeggen dat er meer elektriciteit geproduceerd is dan er verbruikt is), kunnen we dit teveel aan elektriciteit verkopen aan het net. De vergoeding hiervan ligt echter zeer laag in Vlaanderen (rond €50/MWh). De verkoop van elektriciteit zal dan ook

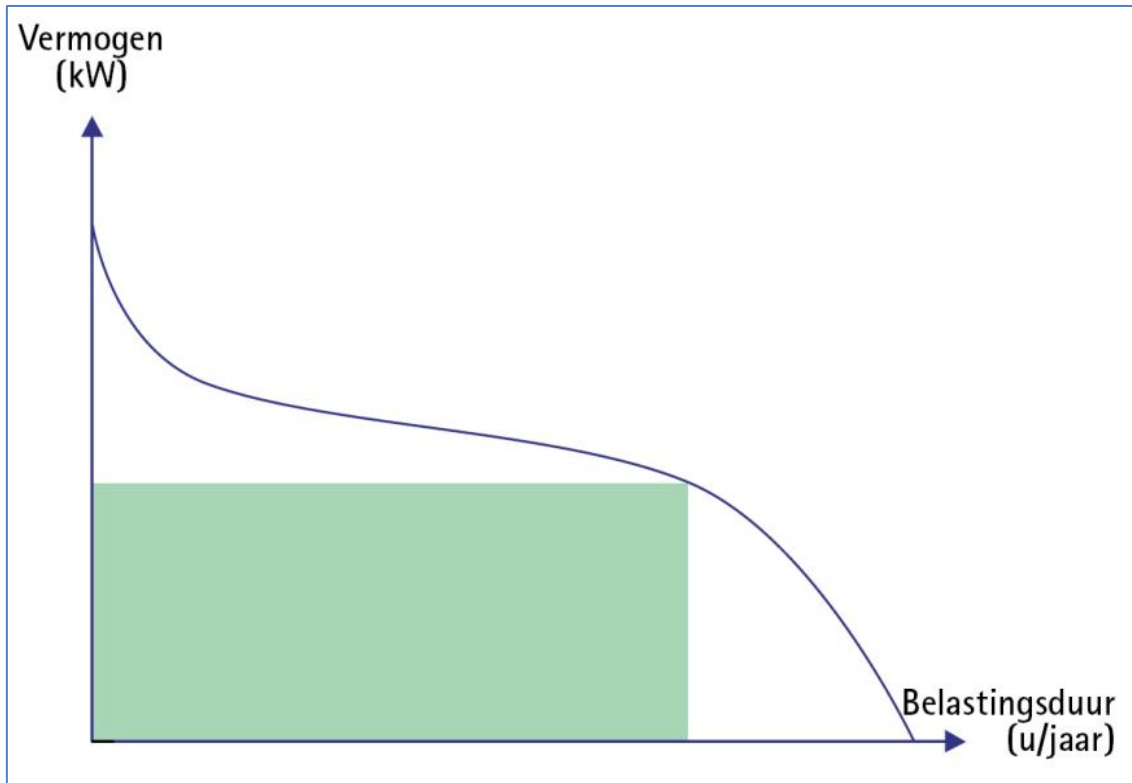
verwaarloosd worden, aangezien een overproductie van enkele MWh elektriciteit onrealistisch is. *(Bron: Dexters, Hoe dimensioneert men een WKK?)*

De rendementen van de meeste WKK's zakken snel als de WKK in deellast werkt. De meeste schakelen zelfs helemaal uit eens de last kleiner wordt dan 50%. Daarom is het belangrijk dat de WKK zoveel mogelijk in vollast werkt. Herhaald starten en stoppen moet ook absoluut vermeden worden, aangezien veelvuldige startcyclussen de onderdelen van de machine erg belasten. Dit alles wijst erop dat de dimensionering van een WKK zeer belangrijk is en dat het gedimensioneerd moet worden op de basislast en niet op de pieklast. Een overdimensionering van een WKK is fataal voor zijn rentabiliteit. Om te vermijden dat de beveiligingen de machine stilleggen, moet een WKK ten allen tijde zijn warmte kunnen afgeven. Al deze voorgaande principes gelden ook voor een micro-WKK. *(Bron: Dexters, Hoe dimensioneert men een WKK?)*

Vooraleer er in een residentiële woning een micro-WKK geïnstalleerd kan worden, is het belangrijk dat er eerst alles is aan gedaan om het warmteverbruik van de residentie te verminderen vb. isolatie, dubbele beglazing, ... Als men het warmteverbruik echter nog verlaagt na de installatie van de micro-WKK, gaat de micro-WKK in deellast draaien met de gevolgen die hierboven beschreven staan. Het valt dus te verwachten dat micro-WKK's eerst in oudere minder geïsoleerde woningen geïnstalleerd zullen worden. In een nieuwbouwwoning ligt de warmtevraag door de huidige strenge bouwvoorschriften zo laag dat een micro-WKK onvoldoende in vollast kan werken.

Om te dimensioneren moeten eerst de warmte- en elektriciteitsbehoeften in kaart gebracht worden. Dit wordt gedaan aan de hand van facturen en metingen waarmee we een jaarbelastingcurve kunnen opstellen. Zo een curve geeft aan hoeveel uren gedurende een jaar een welbepaald vermogen overschreden wordt. Een jaarbelastingcurve heeft meestal een typische convexe vorm zoals in figuur 6 wordt aangegeven. De dimensionering gebeurt

dan door de rechthoek te zoeken onder de curve met de grootste oppervlakte, zoals de rechthoek aangeeft in onderstaande figuur.



Figuur 6: Voorbeeld Jaarbelastingsduurcurve (Bron: Cogen Energy, 2004)

In de praktijk wordt er echter ook rekening gehouden met andere factoren zoals:

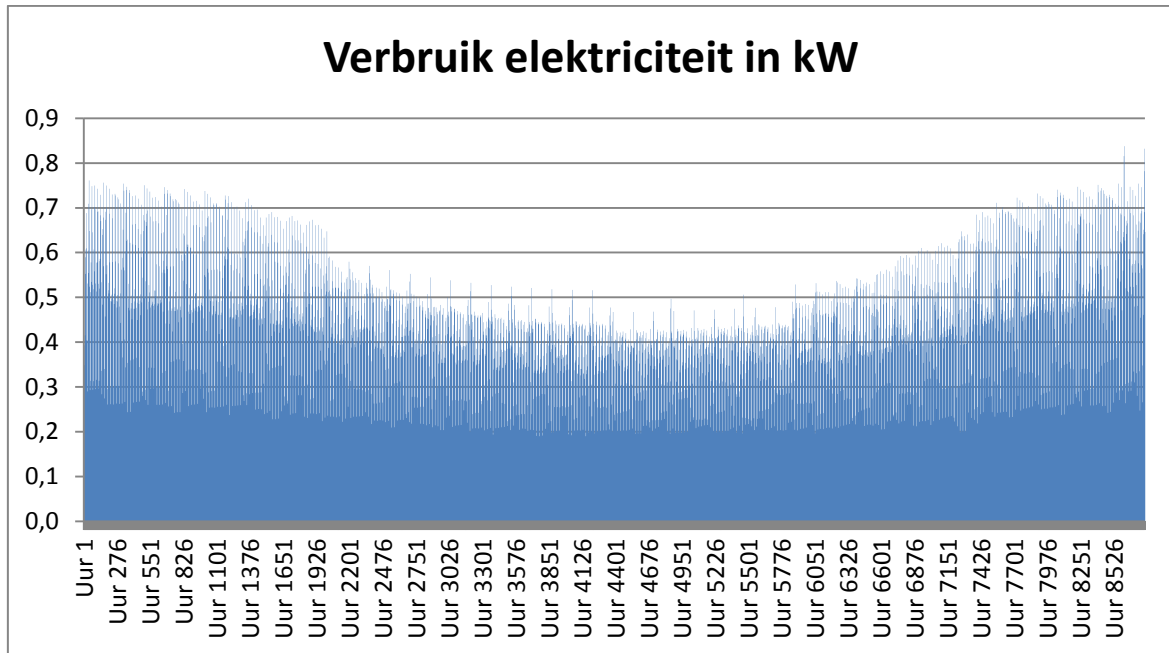
- Op de markt beschikbare installaties (niet alle vermogens zijn beschikbaar)
- Warmtekrachtverhouding
- Is deellastwerking mogelijk?
- Aantal start-stops (herstarten is soms pas mogelijk na een bepaalde tijd)
- Synchronisme tussen warmte- en elektriciteitsvraag: anders buffer voorzien
- Betrouwbaarheid installatie: meerdere kleine in plaats van één grote (enkel van toepassing op grote schaal)

(Bron: Kleine WKK's, Annick Dexters, KHLim)

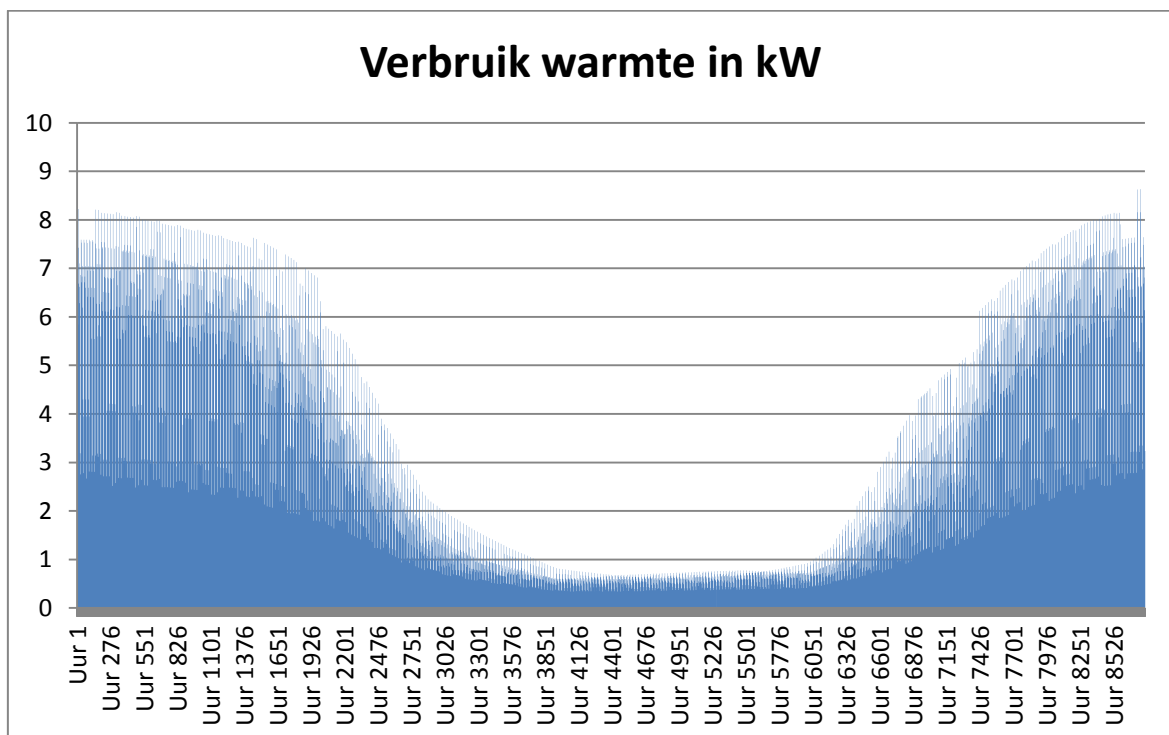
4.2. Toepassing dimensionering

De dimensionering van een WKK moet voor elke installatie opnieuw uitgevoerd worden, maar om een idee te geven van de methode is hieronder een voorbeeld uitgeschreven, waarbij gewerkt wordt met gegevens die de VREG (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt) op haar website vrijgeeft. De VREG stelt jaarlijks synthetische lastprofielen van de huishoudelijke en niet-huishoudelijke elektriciteits- en aardgasverbruikers op in Excel. De focus ligt hier op de huishoudelijke verbruikers. In dit voorbeeld worden de synthetische lastprofielen voor 2012 gebruikt. Het totale energieverbruik waarmee in het voorbeeld gewerkt wordt, zijn de waarden die de VREG aanziet als het gemiddeld verbruik van alle Vlaamse gezinnen. Voor elektriciteit is dit 3.500 kWh en voor warmte is dit 23.260 kWh. Deze lastprofielen geven per uur weer welk percentage van het totale energieverbruik verbruikt wordt (voor elektriciteit worden de lastprofielen per kwartier gegeven, maar deze zijn omgevormd zodat ze per uur weergegeven worden).

In zo een lastprofiel kunnen we bijvoorbeeld zien dat op 1 januari 2012 van 00:00u tot 01:00u enerzijds 0,50 kWh elektriciteit verbruikt wordt en anderzijds 2,79 kWh aardgas. Deze waarden zeggen op zich natuurlijk heel weinig. Maar als we dit weten voor alle 8784 uren van het jaar voor zowel elektriciteit als aardgas en dit dan in een grafiek zetten, geeft dit wel belangrijke informatie. Het resultaat hiervan staat weergegeven in de twee onderstaande grafieken.



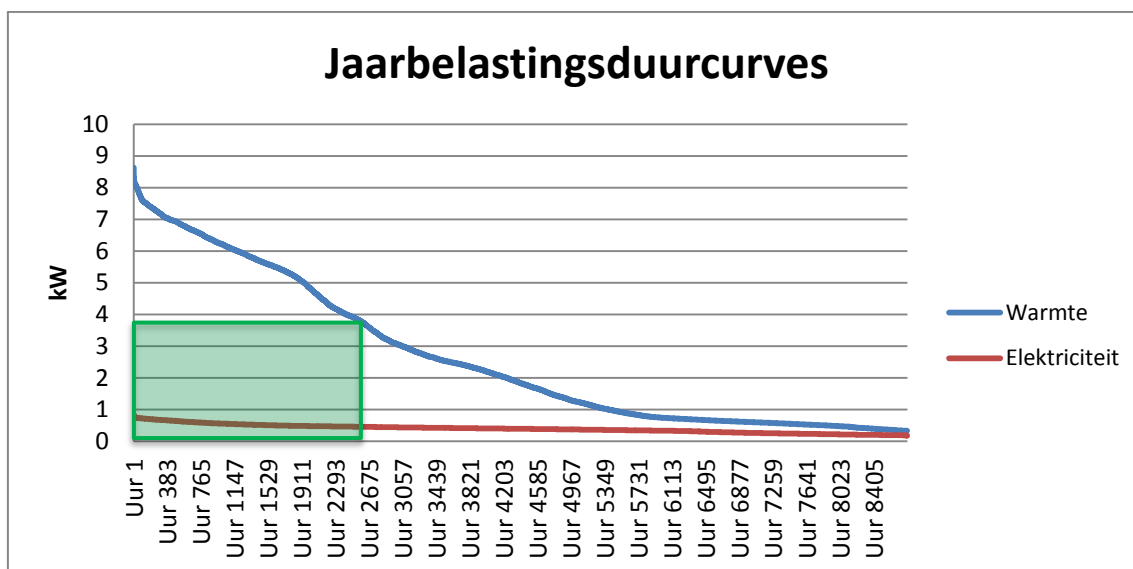
Figuur 7: Jaarlijks verbruik elektriciteit per uur in kW



Figuur 8: Jaarlijks verbruik warmte per uur in kW

Wat meteen opvalt, is dat de spreiding tussen de verschillende maanden bij aardgas veel groter is. Dit wijst erop dat in de wintermaanden veel meer aardgas verbruikt wordt dan in de zomermaanden. Dit was te verwachten aangezien het grootste deel ($\pm 90\%$) van de verbruikte warmte naar de verwarming van de woning gaat. Het overige deel gaat naar de verwarming van het water, koken, enz. Het verschil tussen de winter- en zomermaanden is in het geval van elektriciteit veel kleiner. Het verschil is daar te wijten aan het feit dat verlichting in huizen meer en langer aan staat in de wintermaanden. Met deze spreiding moeten we rekening houden als we gaan dimensioneren. Aangezien we de capaciteit gaan bepalen op basis van de warmtevraag, zal de WKK-ketel (net zoals een conventionele ketel) vooral draaien in de winter. Aangezien er gelijktijdig warmte en elektriciteit wordt opgewekt bij een WKK, zal er bijgevolg ook meer elektriciteit geproduceerd worden in de wintermaanden. Dit zal ervoor zorgen dat er in de winter een overschot aan elektriciteit zal zijn (dat aan het net zal worden afgegeven) en in de zomer zal er een tekort aan elektriciteit zijn. Dit tekort aan elektriciteit zal onttrokken worden aan het net.

In de huidige vorm kan er met deze gegevens nog steeds niet gedimensioneerd worden. Hiervoor moeten we de lastprofielen rangschikken van groot naar klein. Als we dit voor beide lastprofielen (aardgas en elektriciteit) doen en vervolgens opnieuw een grafiek opstellen, bekomen we onderstaand resultaat.



Figuur 9: Jaarbelastingsduurcurve

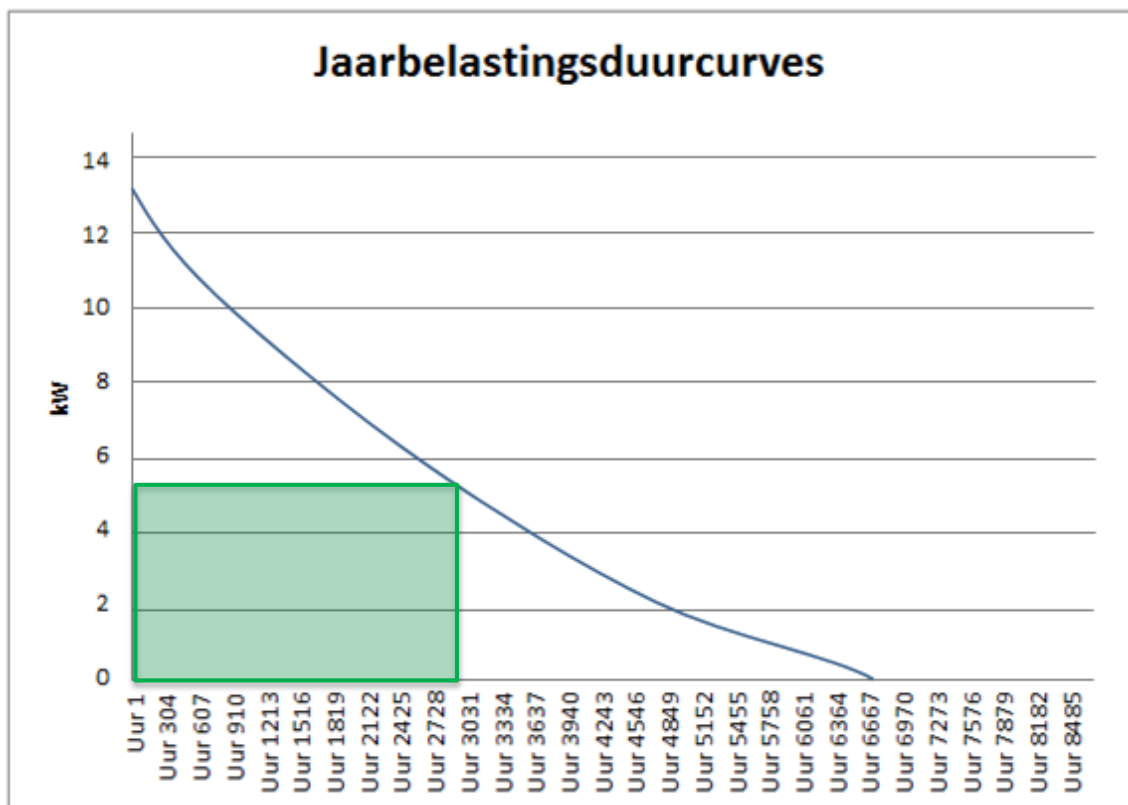
Met deze curven is het uiteindelijk mogelijk om de WKK-ketel te dimensioneren. Zoals eerder aangehaald zoeken we de rechthoek onder de jaarbelastingscurve van warmte met de grootste oppervlakte. In dit voorbeeld is de de rechthoek met de grootste oppervlakte te vinden op een capaciteit van 3,81 kW en 2.567 draaiuren. Enkel rekening houdend met die oppervlakte bezit de ideale WKK-installatie dus een capaciteit van 3,81 kW en een bijbrander met een capaciteit van iets meer dan 5 kW, zodat de pieklast van ongeveer 9kW kan opgevangen worden. In combinatie met de andere factoren waarmee rekening moet gehouden worden (beschikbaarheid installaties, start-stops, deellastwerking, ...) kan de WKK-ketel gekozen worden die het best past bij dit profiel.

Dergelijke jaarbelastingscurves moeten voor elke residentiële woning die een micro-WKK wensen te installeren opgesteld worden. Door het beperkte marktaanbod van beschikbare systemen, zal hier echter voorlopig nog niet altijd rekening mee kunnen gehouden worden. Het zijn dus op dit moment enkel de woningen waarvan de jaarbelastingscurves overeenkomen met een systeem dat op de markt aangeboden wordt, die in aanmerking komen voor de installatie van een micro-WKK. Het gaat hier over oudere huizen die slecht geïsoleerd zijn en dus een hoge warmtevraag hebben. In zulke woningen moet men eerst kijken naar de mogelijkheden tot een betere isolatie, aangezien na-isoleren kostenefficiënter

is dan het installeren van een dure micro-WKK. Isoleren is echter niet altijd een mogelijkheid, omdat oude huizen vaak volle muren hebben die niet geïsoleerd kunnen worden. Pas bij de eerste oliecrisis in de jaren '70 werd het belang van een goede isolatie duidelijk. (Bron: *Dexters en Six, 2009*) Het gebouwenpark in Vlaanderen is vrij oud met ongeveer 55 à 60% van de woningen gebouwd vóór 1970. (Bron: *FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie*) In een volgend hoofdstuk wordt in detail ingegaan op het gebouwenpark in Vlaanderen.

Zoals we hebben aangehaald, is het bovenstaande voorbeeld van de twee jaarbelastingsduurcurves gebaseerd op het gemiddeld elektriciteits- en warmteverbruik van alle Vlaamse gezinnen. Wat we in deze masterproef echter willen onderzoeken, is of een micro-WKK een economisch interessante investering is voor één residentiële woning. De jaarbelastingsduurcurves (JBDC) van één enkele woning zal er vermoedelijk anders uitzien als bovenstaande figuur 9 aantoont. De JBDC uit figuur 9 geeft aan dat er het volledige jaar door (8.760 uren) een warmtevraag is. Als gemiddelde voor heel Vlaanderen is dat een realistische assumptie, aangezien er gezinnen zijn waar er 's nachts meer geleefd (en dus verwarmd) wordt door werkomstandigheden en er zijn gezinnen die tijdens de zomermaanden hun zwembad verwarmen wat ook leidt tot een verhoogde warmtevraag. Als we echter voor één woning gaan kijken, is een continue warmtevraag gedurende het hele jaar eerder onrealistisch. Eén enkele woning zal nooit het hele jaar door een warmtevraag hebben. Tijdens de zomermaanden en 's nachts is de warmtevraag nul. Daarom gaan we een gewijzigde JBDC opstellen die realistischer is voor één residentiële woning. We gaan dit enkel doen voor de warmtevraag aangezien de WKK op de warmtevraag gedimensioneerd zal worden. We kunnen een aantal veronderstellingen maken voor het opstellen van zo een JBDC van een enkele woning. Het gemiddelde jaarlijkse warmteverbruik van alle Vlaamse gezinnen bedraagt 23.260 kWh. Deze hoeveelheid behouden we als totale warmtevraag voor één woning. We gaan deze hoeveelheid warmte echter anders verdelen. Zo gaan we er allereerst vanuit dat er een paar duizenden uren per jaar geen warmtevraag is. De JBDC zal dus op een bepaald punt de horizontale as raken, in tegenstelling tot de jaarbelastings-

duurcurve uit figuur 9 waar er het hele jaar door een warmtevraag is en de curve de horizontale as nooit raakt. Een tweede assumptie volgt uit de eerste assumptie. Aangezien er gedurende vele uren geen warmtevraag is, zal gedurende de overige uren de warmtevraag hoger zijn, aangezien de totale warmtevraag gelijk blijft. De JBDC zal de verticale as dus hoger snijden en zal bijgevolg ook steiler zijn. Met deze twee assumpties zou de JBDC er als volgt kunnen uitzien.



Figuur 10: Jaarbelastingsduurcurve één residentiële woning

Als we in figuur 10 gaan kijken naar de optimale installatie op basis van de grootste rechthoek zou de installatie bestaan uit een vermogen van 5-6 kW en een hulpbrander die de piek van ongeveer 13 kW kan opvangen. Zoals al eerder werd aangehaald zijn er een aantal andere factoren die ook een rol spelen in het bepalen van de installatie. In het volgende hoofdstuk wordt een economische analyse gemaakt voor de installatie van een micro-WKK in een woning met een profiel gelijkend op bovenstaande JBDC.

5. Economische haalbaarheid

In dit belangrijke hoofdstuk zal nagegaan worden of de installatie van een micro-WKK een economisch interessante opportuniteit is. De installatie ervan mag dan wel een positieve impact op het milieu, het is niet onbelangrijk dat de hoge kostprijs van een micro-WKK zichzelf terugverdient over zijn totale levensduur. Om dit na te gaan, is er met behulp van Excel een economische analyse gemaakt, waarvan de belangrijkste resultaten in dit hoofdstuk beschreven worden. In deze analyse zullen de Netto Contante Waarde (NCW), het Intern Rendement (IR) en de dynamische Terugverdientijd onderzocht worden. Om de interpretatie van de Excel-tabellen overzichtelijker te maken, zullen we eerst de belangrijkste variabelen overlopen:

- Eenheidsprijs micro-WKK
- Rendementen (elektrisch en warmte) micro-WKK
- Warmtevraag
- Elektriciteitsvraag
- Jaarlijkse kost
- Ontwikkeling energieprijzen
- Warmtekrachtcertificaten
- Verwachte levensduur
- Discontovoet

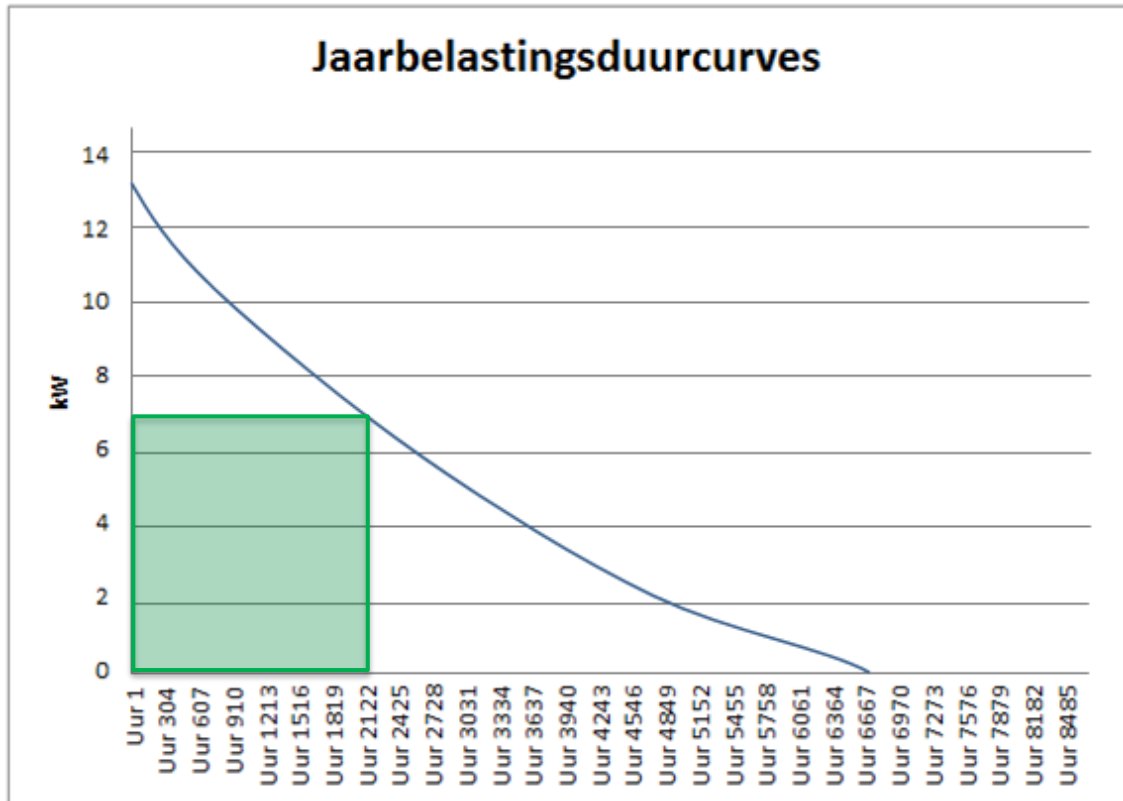
In Vlaanderen zijn er nog maar weinig leveranciers van micro-WKK's. De pionier in Vlaanderen omtrent micro-WKK is WhisperGen, dat in 2010 al op de markt kwam met een toestel. Vervolgens is er Remeha, één van de leiders in de Nederlandse markt, die in januari 2012 ook in Vlaanderen op de markt kwam met het model eVita. In april 2012 wil ook Viessmann zich op de Vlaamse markt begeven met de Vitotwin 300. Deze drie toestellen werken allemaal met een Stirlingmotor op basis van aardgas, waarvan het principe eerder al werd uitgelegd. Het verschil tussen de drie toestellen ligt in de warmtekrachtverhouding. De

micro-WKK van WhisperGen (WhisperGen EU1) heeft een warmtekracht-verhouding van 7:1, wat wil zeggen dat per 7 kW thermische energie (warmte) 1 kW elektriciteit wordt opgewekt. De eVita van Remeha heeft een warmtekrachtverhouding van 4,5:1, terwijl de Vitotwin 300 een verhouding heeft van 6:1. *(Bron: Cerga)*

Zoals hierboven aangehaald, is WhisperGen het langst aanwezig op de Vlaamse markt en heeft ook het grootste aantal micro-WKK's geïnstalleerd in Vlaanderen. De VREG geeft ook aan dat er nog geen warmtekrachtcertificaten voor een ander systeem als WhisperGen werden aangevraagd. Het is om die twee redenen dat het onderzoek voortgezet wordt op basis van dit systeem. Hiervoor is contact opgenomen met het bedrijf FaCoTherm, dat als distributeur voor WhisperGen fungeert. FaCoTherm heeft zes vestigingen over heel België, waarvan enkel de vestiging in Houthalen zich in Vlaanderen bevindt. Vier vestigingen zijn gelegen in Wallonië en de zesde vestiging ligt in de hoofdstad Brussel. De vestiging in Houthalen heeft zelf een micro-WKK geïnstalleerd in hun gebouw. Hiermee verwarmen zij deels het gebouw en genereren ze een deel van hun elektriciteit. Dit is niet voldoende om het hele gebouw te voorzien van warmte en elektriciteit, maar zij hebben dit geïnstalleerd om zelf ook kennis op te bouwen over het systeem, gezien het vrij recent ontstaan is en FaCoTherm instaat voor de installatie en het onderhoud.

Het systeem dat WhisperGen via FaCoTherm aanbiedt werkt met een combinatie van enerzijds de Stirlingmotor die de basislast opvangt en anderzijds een hulpbrander die inspringt als de warmtevraag te hoog is. De brandstof om het systeem te laten werken is aardgas, dus het is belangrijk dat de residenties waar een micro-WKK geïnstalleerd wordt, een gasaansluiting hebben. De Stirlingmotor kan 7 kW warmte en 1 kW elektriciteit produceren per draaiuur. De hulpbrander kan nog eens 7 kW warmte bij produceren op momenten dat de warmtevraag hoog is (vb. koude winteravond). Als we de jaarbelastingsduurcurve van figuur 10 bekijken, valt op dat een installatie met een basisvermogen van 7 kW en een bijbrander van nog eens 7 kW te verantwoorden is. De rechthoek die we kunnen

tekenen op 7 kW is voldoende groot en ook het totale vermogen van 14 kW kan de piek van 13 kW opvangen. De rechthoek met capaciteit van 7 kW is te zien in onderstaande figuur 11.



Figuur 11: JBDC met capaciteit WhisperGen EU1

5.1. Eenheidsprijs Micro-WKK

Het grootste probleem waarom micro-WKK nog niet op grote schaal geïntroduceerd is, is de hoge kostprijs van het systeem. Dit is te wijten aan het feit dat micro-WKK nog maar enkele jaren geleden ontstaan is en er alleen nog maar enkele prototypen gemaakt zijn. Als de producenten op grote schaal kunnen produceren, zullen er schaalvoordelen ontstaan, die de hoge kostprijs zullen doen dalen. (Bron: Six en Dexters, 2009) De kostprijs van een micro-WKK inclusief BTW en installatie ligt rond €15.000. De installatie van het systeem op zich is niet speciaal en is in grote mate hetzelfde als voor een conventionele ketel.

In de economische analyse wordt de micro-WKK vergeleken met een conventionele ketel. De aanschafprijs van een conventionele ketel inclusief BTW en installatie wordt geraamd op €3.000. Dit bedrag wordt mee opgenomen in de analyse.

Tot voor 1 januari 2012 kreeg de particulier bij de aankoop van een micro-WKK een federale belastingvermindering van 40% (€6.000) op het totale factuurbedrag indien de woning ouder is dan 5 jaar, met een maximum van €2.830 per jaar. Het bedrag daarboven mag overgedragen worden naar de drie daarop volgende jaren. De nieuwe wetgeving die ingegaan is op 1 januari 2012 heeft deze belastingvermindering echter geschrapt. Dit is een slok op de borrel voor de economische aantrekkelijkheid van micro-WKK aangezien dit betekent dat het volledige factuurbedrag van €15.000 moet terugverdiend worden over de levensduur van het systeem. De opportuniteitskost van de conventionele ketel wordt hier echter wel nog van afgetrokken. Het blijft echter nog steeds een bedrag van €12.000 dat over een periode van 15 tot 20 jaar moet terugverdiend worden, terwijl particulieren die voor 1 januari 2012 hun systeem geïnstalleerd hebben een belastingvermindering van €6.000 kregen, wat dus betekent dat ze 'slechts' €6.000 moeten terugverdienen.

5.2. Rendementen micro-WKK

De rendementen van de Whispergen EU1 op aardgas zijn afgeleid uit een testrapport uitgevoerd door de KVBG (Koninklijke Vereniging van Belgische Gasvaklieden). Deze constanten worden gebruikt voor alle installaties van dit merk en type. Navraag bij de VREG toonde ook dat geen andere constanten gekend zijn wat er op wijst dat er nog geen warmtekrachtcertificaten van andere types zijn aangevraagd. Het warmterendement (Q) van de micro-WKK bedraagt 87,76% en het elektrisch rendement (E) bedraagt 10,02%. Het Q-rendement van micro-WKK ligt iets lager dan het rendement van een conventionele aardgasketel, dat op 90% geraamd wordt.

5.3. Elektriciteitsvraag

De jaarlijkse elektriciteitsvraag ligt voor een gemiddeld gezin in Vlaanderen op 3.500 kWh. De micro-WKK heeft een E-rendement van 10,02%, wat ongeveer zal overeenkomen met de productie van 1 kW elektriciteit per draaiuur zoals we verderop zullen berekenen. Het is dus belangrijk dat we voldoende draaiuren kunnen realiseren om zoveel mogelijk van die hoeveelheid elektriciteit op te wekken. Dit aantal draaiuren wordt bepaald door de warmtevraag. Als we niet voldoende elektriciteit kunnen genereren, wordt de resterende hoeveelheid van het net getapt. Als we meer kunnen produceren dan we verbruiken, wordt de overschot aan het net afgegeven. We kunnen dit teveel aan elektriciteit ook verkopen, maar de opbrengst hiervan is zo minimaal dat deze te verwaarlozen is. In de economische analyse zal in het basismodel uitgegaan worden van een jaarlijkse elektriciteitsvraag van 3.500 kWh. Het aantal draaiuren wordt op maandelijkse basis bepaald, dus deze jaarlijkse elektriciteitsvraag dient opgesplitst te worden per maand. In Bijlage 1 zien we hiervan het resultaat. In de berekening van de jaarlijkse kost zal duidelijk worden waarom dergelijke opsplitsing gemaakt wordt.

5.4. Warmtevraag

De jaarlijkse warmtevraag speelt technisch gezien een veel belangrijkere rol dan de jaarlijkse elektriciteitsvraag zoals in het hoofdstuk aangaande de dimensionering al werd aangehaald. De warmtevraag kan sterk variëren tussen verschillende residenties. Het is belangrijk dat de warmtevraag hoog genoeg ligt zodat de WKK-installatie voldoende draaiuren kan maken. Eén draaiuur zorgt namelijk voor ongeveer 1 kW elektriciteit en het is voornamelijk op de elektriciteitsfactuur dat we onze investering willen terugverdienen. De warmtevraag van een gemiddeld gezin in Vlaanderen bedraagt 23.260 kWh en zal ook gebruikt worden in het basismodel. Ook voor de warmtevraag maken we een opsplitsing per maand, zoals te zien is in Bijlage 2.

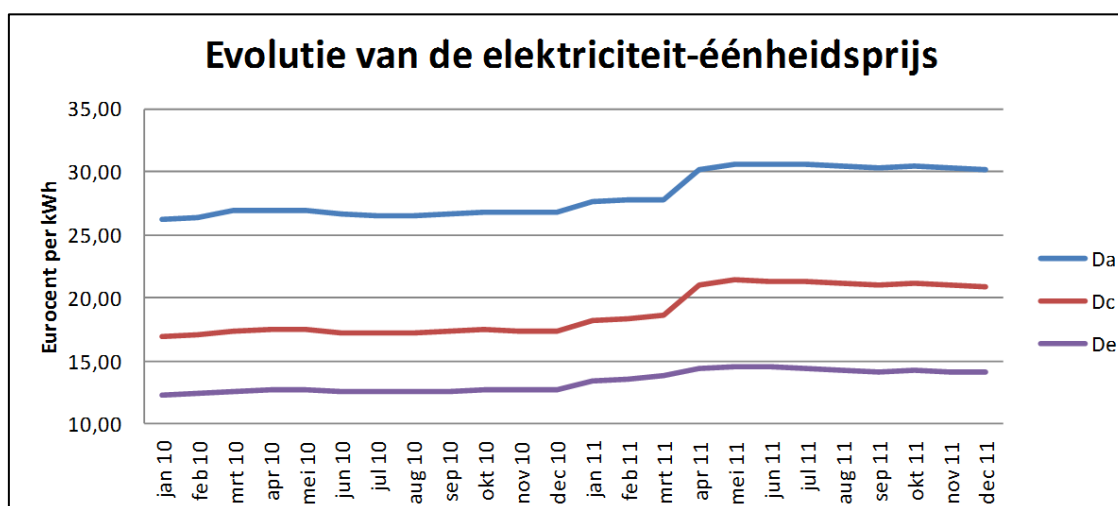
De micro-WKK heeft, zoals we weten, twee branders. De eerste brander kan per draaiuur 7 kW warmte opwekken en produceert tegelijk ongeveer 1 kW elektriciteit. Als de warmtevraag op een bepaald moment te hoog ligt, is er een hulpbrander die kan bijspringen. Deze kan ook nog eens 7 kW warmte produceren per draaiuur. Als de hulpbrander aanspringt, houdt dit dus in dat er op dat moment 14 kW warmte wordt geproduceerd op één draaiuur. Deze hulpbrander zal dus in de koudere maanden vaker aanspringen dan in de warme maanden. De hulpbrander wekt echter wel geen bijkomende elektriciteit op, omdat deze hulpbrander niet is uitgerust met een Stirlingmotor. Als we de jaarlijkse warmtevraag opsplitsen per maand (zie Bijlage 2), zien we dat de maanden november, december, januari, februari en maart een hoge warmtevraag hebben. In deze maanden zal de hulpbrander vaker moeten inspringen. In het basismodel van de economische analyse gaan we ervan uit dat in de vijf bovengenoemde 'koude' maanden de micro-WKK samen met de ingebouwde hulpbrander gemiddeld 10 kW warmte per draaiuur opwekt. In de overige maanden gaan we ervan uit dat de hulpbrander minder aanspringt en dat er dus gemiddeld 8 kW warmte per draaiuur wordt opgewekt.

De jaarlijkse warmtevraag van 23.260 kWh van ons gemiddeld gezin, is de netto warmtevraag. De conventionele ketel waarmee we vergelijken heeft een rendement van 90%, wat betekent dat de bruto warmtevraag $25.844,44 \text{ kWh} (= 23.260 / 0,90)$ bedraagt in het geval we geen WKK zouden installeren. Dit is belangrijk voor de kostprijs aangezien het deze bruto warmtevraag is die we moeten aankopen (in de vorm van aardgas). Het warmterendement van de micro-WKK bedraagt 87,76% wat betekent dat de bruto warmtevraag $26.504,10 \text{ kWh} (= 23.260 / 0,8776)$ is. Omdat het warmterendement van de micro-WKK iets lager ligt dan het rendement van de conventionele ketel, zal de kostprijs voor warmte (in de vorm van aardgas) hoger zijn in het geval van de WKK. Dit wordt echter ruimschoots gecompenseerd door de elektriciteitsfactuur die een stuk lager zal uitvallen en door de opbrengst uit warmtekrachtcertificaten die hieronder uitgelegd worden.

5.5. Jaarlijkse kost

De jaarlijkse kost kan opgesplitst worden in twee delen. Aan de ene kant is er de jaarlijkse kost die de gebruiker moet betalen voor de aardgas om zijn micro-WKK te laten functioneren. Aan de andere kant is er de jaarlijkse kost die de verbruiker zou moeten betalen indien hij geen micro-WKK had geïnstalleerd en zou werken met een conventionele ketel. Dit houdt in dat hij enerzijds voor aardgas betaalt om de conventionele ketel warmte te laten opwekken en anderzijds betaalt hij voor de elektriciteit die hij van het net onttrekt.

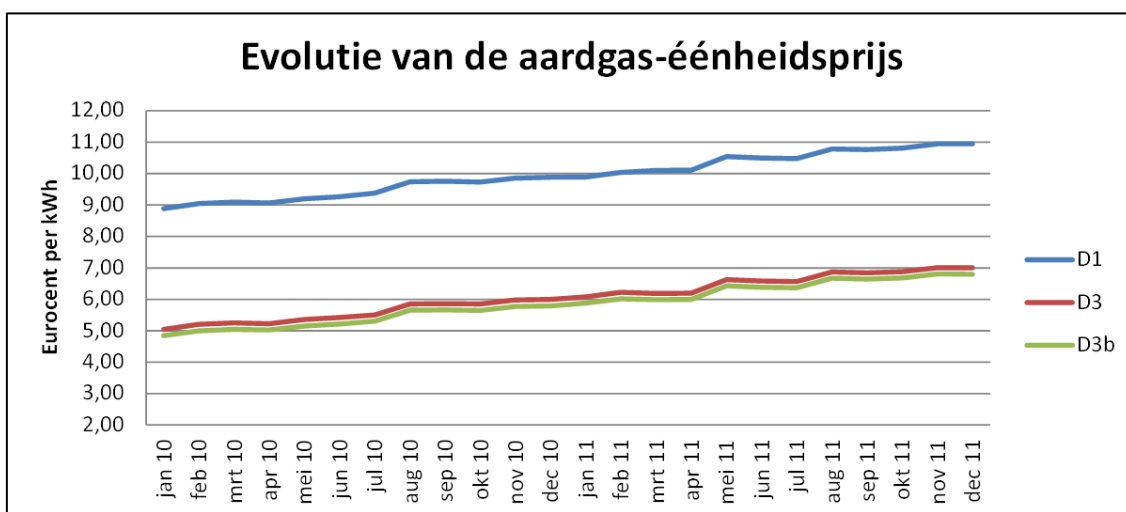
Om dit voor de twee situaties te kunnen berekenen, dienen we de gemiddelde aardgas- en elektriciteitsprijzen te kennen. De VREG heeft gegevens van de jaren 2010 en 2011, weergegeven in de volgende grafieken.



Figuur 12: Elektriciteit-eenheidsprijs

In Figuur 12 zien we drie verschillende prijsevoluties. Deze staan voor verschillende types van verbruikers. De blauwe lijn (Da) staat voor residenties met een laag verbruik (600 kWh). De rode lijn (Dc) staat voor residenties met een gemiddeld verbruik (3.500 kWh). De paarse lijn (De) staat van residenties met een hoog verbruik (7.500 kWh). De reden waarom deze prijzen verschillen is dat er een vaste kost verbonden is aan de aankoop van elektriciteit (vb. huur meter). Deze vaste kost is hetzelfde ongeacht het type gebruiker, wat ervoor zorgt dat

de prijs per kWh hoger ligt voor residenties met een laag verbruik. We zullen zien dat er nog ongeveer 800 kWh elektriciteit moet aangekocht worden van het net indien we een micro-WKK installeren. Dit komt overeen met het Da-profiel. Deze extra elektriciteit zal aangekocht worden aan 30,00 Eurocent per kWh. In het alternatieve geval (als we geen micro-WKK zouden aankopen) moeten we 3.500 kWh elektriciteit van het net aankopen (Dc-profiel). De kostprijs hiervan zal 21,00 Eurocent per kWh bedragen.



Figuur 13: Aardgas-eenheidsprijs

Ook in Figuur 13 zien we drie verschillende types van verbruikers. In deze figuur zijn we enkel geïnteresseerd in de rode lijn (D3), die overeenkomt met een gemiddeld verbruik van 23.260 kWh warmte. Als we kijken naar deze lijn, kunnen we concluderen dat de aardgas-eenheidsprijs 7,00 Eurocent per kWh bedraagt aan het begin van 2012.

Met prijzen uit figuren 12 en 13 kunnen we vervolgens de jaarlijkse kost berekenen. Om te kunnen berekenen hoeveel we uitsparen, moeten we de jaarlijkse kost berekenen van enerzijds het opwekken van warmte in een conventionele ketel en het afnemen van elektriciteit van het net (decentrale opwekking) en anderzijds moeten we de jaarlijkse kost berekenen zodat de micro-WKK de warmte en elektriciteit gelijktijdig kan opwekken (centrale opwekking).

5.5.1. Jaarlijkse kost decentrale opwekking

Indien we een micro-WKK installeren, moeten we ook de prijs weten die we zouden moeten betalen in het geval er geen WKK geïnstalleerd werd.

5.5.1.1. Elektriciteit

De berekening van elektriciteit in het geval van decentrale opwekking is heel eenvoudig. Als we de jaarlijkse elektriciteitsvraag (3.500 kWh) vermenigvuldigen met de gemiddelde elektriciteit-eenheidsprijs van het DC-profiel (€0,21 / kWh), bekomen we een jaarlijkse kost van €735,00 voor elektriciteit.

5.5.1.2. Warmte

Voor de berekening van warmte (in de vorm van aardgas) is de berekening gelijkaardig, maar we moeten wel rekening houden met de bruto warmtevraag en niet met de netto warmtevraag. De bruto vraag voor decentrale opwekking bedraagt 25.844,44 kWh (rendement 90%). Als we deze hoeveelheid vermenigvuldigen met de aardgas-eenheidsprijs van €0,07 / kWh bekomen we een jaarlijkse kost voor warmte van €1.809,11.

Naast deze berekening op basis van de eenheidsprijzen zijn er heel wat hulpmiddelen beschikbaar om dit op een andere manier te berekenen die vrij snel en nauwkeurig is. Zo heeft de VREG de V-Test ontwikkeld waarbij het enkel nodig is de postcode en het jaarlijks verbruik van zowel elektriciteit als aardgas in kWh in te geven. Ook vraagt het of er met of zonder nachtmeter gewerkt wordt. Als dit is ingegeven verschijnt een overzicht van alle mogelijke leveranciers en de daarbij horende prijzen. Ook Test-Aankoop biedt een dergelijke webtoepassing aan.

5.5.2. Jaarlijkse kost centrale opwekking

Bij de centrale opwekking van warmte en elektriciteit met de micro-WKK bestaat de grootste kost uit de aankoop van aardgas om de micro-WKK te laten draaien. Het is echter mogelijk dat er onvoldoende elektriciteit gegenereerd wordt, waardoor de netto-afname van

elektriciteit groter is dan nul. In dit geval zal er een bijkomende kost ontstaan voor de aankoop van deze elektriciteit.

5.5.2.1. Warmte

Het warmterendement van de micro-WKK bedraagt 87,76%, dus de warmte-input bedraagt 26.504,10 kWh. Als we dit vermenigvuldigen met de aardgas-eenheidsprijs bekomen we een jaarlijkse kost van €1.855,29 voor warmte. Dit bedrag ligt iets hoger dan bij decentrale opwekking, maar we gaan zien dat de elektriciteitsfactuur een stuk daalt.

5.5.2.2. Elektriciteit

Een micro-WKK wordt op de warmtevraag gedimensioneerd. Deze warmtevraag bepaalt vervolgens hoeveel elektriciteit er geproduceerd zal worden. De netto warmtevraag bedraagt 23.260 kWh. Met een Q-rendement van 87,76% betekent dit dat er 26.504,10 kWh warmte-input zal zijn. Van deze warmte-input gaat er 10,02% naar de productie van elektriciteit. Er wordt dus 2.655,71 kWh ($= 26.504,10 \cdot 0,1002$) elektriciteit geproduceerd.

Aangezien per draaiuur ongeveer 1 kW elektriciteit wordt opgewekt, gaan we eens nagaan wat het aantal draaiuren ongeveer zal zijn. Zoals in het begin van het hoofdstuk werd aangehaald, is de elektriciteitsproductie van de micro-WKK per draaiuur niet hetzelfde tijdens de verschillende maanden (10 kW in de vijf 'koude' maanden en 8 kW in de overige maanden). Daarom wordt voor de berekening van het aantal draaiuren de warmte- en elektriciteitsvraag opgesplitst per maand, zoals in Bijlage 1 te zien is. In de maand januari bijvoorbeeld is er een warmte-input van 4.625,80 kWh nodig. Dit bekomen we door de netto warmtevraag van 4.059,60 kWh te delen door het rendement van 87,76%. Omdat januari een 'koude' maand is, delen we deze hoeveelheid door 10 kW om het aantal draaiuren in januari te kennen. Dit komt neer op 462,58 draaiuren in de maand januari. Herhalen we deze oefening voor alle maanden, bekomen we uiteindelijk 2.810,54 draaiuren per jaar. De tabel met de berekening voor alle maanden is te vinden in Bijlage 2. Uit deze tabel kunnen we concluderen dat de assumptie dat er 1 kW elektriciteit per draaiuur geproduceerd wordt,

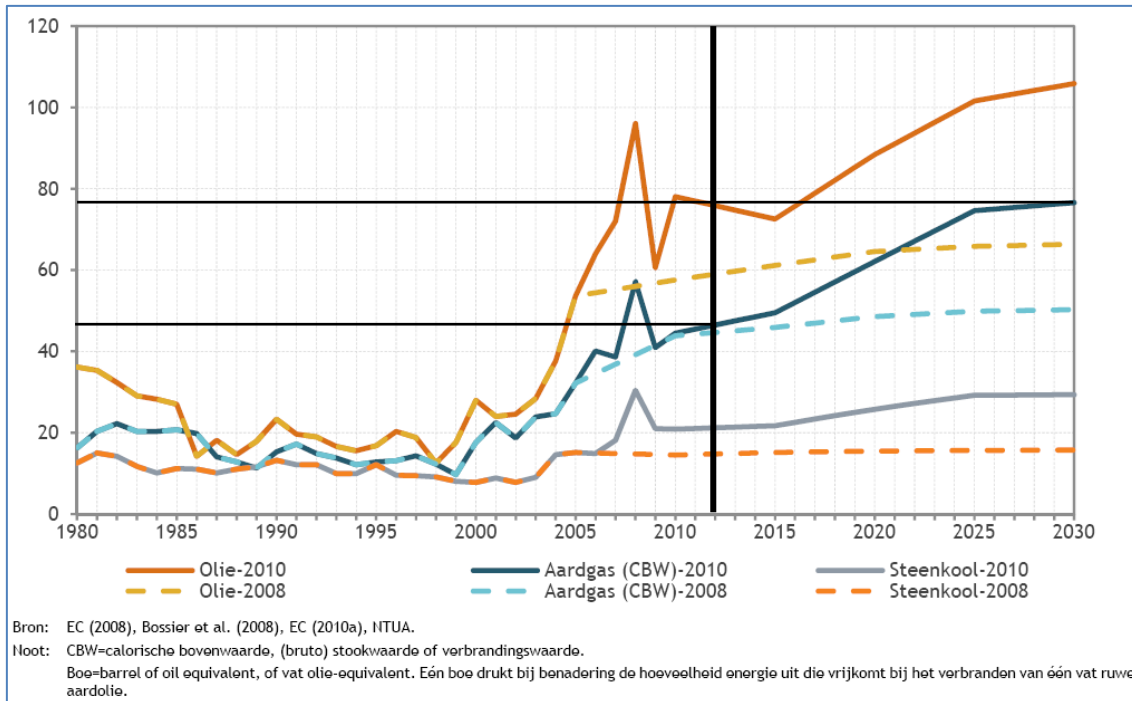
in grote mate klopt. Als we de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit berekenen aan de hand van het aantal draaiuren, bekomen we 2.810,54 kWh elektriciteit (= 2.810,54 draaiuren * 1 kW), wat niet ver ligt van de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit op basis van de rendementen (2.655,71 kWh). We werken in het model echter met de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit op basis van de rendementen.

De jaarlijkse elektriciteitsvraag bedraagt 3.500 kWh, wat dus betekent dat er nog 844,29 kWh (3.500 kWh – 2.655,71 kWh) moet aangekocht worden van het net. De elektriciteits-eenheidsprijs bedraagt nu echter €0,30 / kWh, dus de jaarlijkse kost voor elektriciteit bedraagt €253,29.

5.6. Ontwikkeling energieprijzen

5.6.1. Aardgas

De fossiele brandstofprijzen zijn in Vlaanderen de laatste tien jaren enorm gestegen met een piek in 2008. De economische crisis zorgde er echter voor dat de prijzen hierna terug daalden. Onderstaande figuur maakt dit fenomeen duidelijk. In 2008 heeft het Federaal Planbureau prognoses gemaakt betreffende de verwachte ontwikkeling van de fossiele brandstofprijzen. De stippellijnen geven de prognoses van 2008 weer. In 2010 heeft het Federaal Planbureau de prognoses van 2008 echter aangepast, weergegeven door de volle lijnen.



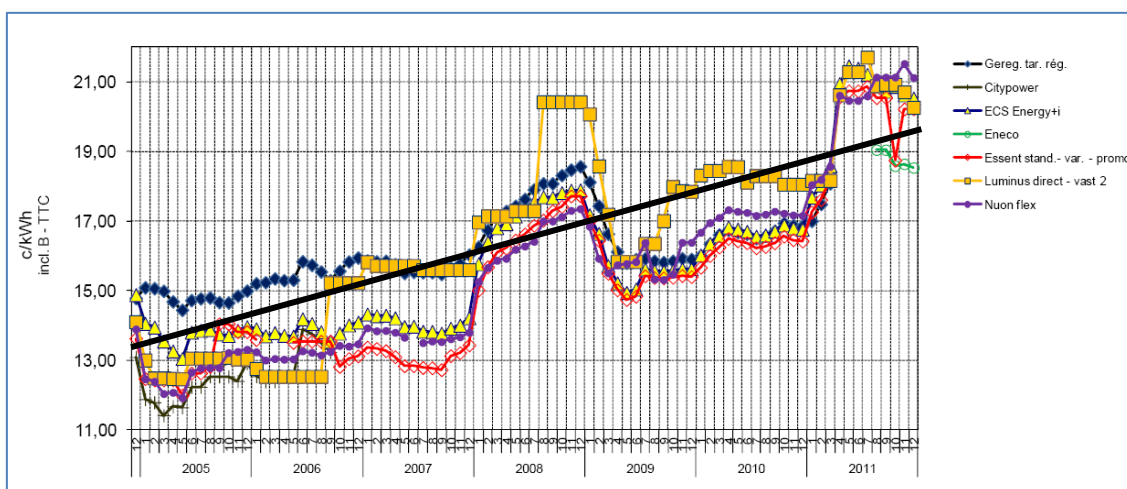
Figuur 14: Evolutie van de fossiele brandstofprijzen (Bron: Federaal Planbureau)

Wat ons interesseert is de evolutie die de prijzen vermoedelijk zullen doormaken de komende 20 jaar, overeenkomstig de levensduur van de micro-WKK. De prijs van aardgas voor een vat olie-equivalent (drukt bij benadering de hoeveelheid energie uit die vrijkomt bij het verbranden van één vat ruwe aardolie) ligt in 2012 rond \$48 (volle blauwe lijn). In 2030 zal de prijs toegenomen zijn tot ongeveer \$76 uitgaande van de prognoses gemaakt in 2010. Dit komt overeen met een procentuele prijsstijging van 58% over een periode van 18 jaar, of een jaarlijkse prijsstijging van 2,8%. Deze prijsstijging is een reële stijging, dus gecorrigeerd voor de verwachte inflatie. Deze prijsstijging zal mee opgenomen worden in de economische analyse. (Bron: Federaal Planbureau)

5.6.2. Elektriciteit

De CREG (Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas) heeft eind 2011 een document opgesteld waarin het de evolutie van de prijzen op de markt van de aan de huishoudelijke klanten verkochte elektriciteit sinds de vrijmaking van de energiemarkt wil illustreren. Er werd een staal van een beperkt aantal tarieven genomen om de leesbaarheid

van de grafieken te waarborgen. Dit staat streeft naar diversiteit zonder in elk gewest per se het interessantste tarief bij elke leverancier in aanmerking te nemen. In elk gewest werden de prijzen berekend door het gemiddelde te maken van de prijzen toegepast in de vier grootste distributie-intercommunales. In Vlaanderen werden Gaselwest, IMEWO, Inter-Energa en IVERLEK in aanmerking genomen (meer dan 60 % van het in Vlaanderen verkochte volume wordt verdeeld door deze netbeheerders). De CREG stelde drie profielen op met een elektriciteitsverbruik van 1.200 kWh, 3.500 kWh en 7.500 kWh. In deze analyse wordt enkel uitgegaan van het tweede profiel met een verbruik van 3.500 kWh, aangezien dit het elektriciteitsverbruik van een gemiddeld gezin in Vlaanderen vertegenwoordigd. Onderstaande figuur is het resultaat. (Bron: CREG)



Figuur 15: Evolutie Gemiddelde elektriciteitsprijs Vlaanderen

In deze grafiek valt ook weer de piek in 2008 op, net zoals die aanwezig is bij de aardgasprijzen. Als we deze piek buiten beschouwing laten, kunnen we een trendlijn toevoegen, weergegeven door de volle zwarte lijn. Deze trendlijn begint in januari 2005 op 13,20 Eurocent per kWh en eindigt eind 2011 op 19,20 Eurocent. Dit betekent een procentuele prijsstijging van 45% over een periode van zeven jaar, dus een jaarlijkse prijsstijging van 6,4%. Dit betekent dat een dergelijke jaarlijkse prijsstijging de jaarlijkse kost voor elektriciteit op 12 jaar zou doen verdubbelen en op 20 jaar zelfs zou doen verdrievoudigen.

De kans dat deze trend zich voortzet in de toekomst is vrij klein. Enerzijds gezien het feit er nu al vele gezinnen zijn die problemen ondervinden om de energiefactuur te betalen. Zo waren er in 2010 maar liefst 200.000 gezinnen die na een waarschuwingsbrief gekregen te hebben nog steeds niet betaalden en bijgevolg een aangetekende brief in de bus kregen. De helft daarvan sloot een afbetalingsplan af met zijn leverancier. (*Bron: ACW*) Anderzijds is er de beslissing van de regering na een voorstel van minister voor Economie Johan Vande Lanotte en staatssecretaris voor Energie Melchior Wathelet om de energieprijzen (zowel elektriciteit als aardgas) vanaf 1 april 2012 te bevriezen tot het einde van het jaar. Daarom zal in de NCW-analyse voor de jaarlijkse prijsstijging van elektriciteit dezelfde waarde als voor aardgas gebruikt worden, namelijk 2,8%. Ook deze prijsstijging is een reële prijsstijging, die rekening houdt met de verwachte inflatie.

5.7. Warmtekrachtcertificaten

Het primaire doel bij de plaatsing van een micro-WKK is energiebesparing. Vaak volstaat deze energiebesparing echter niet om de investering in het WKK-systeem rendabel te maken. Daarom voorziet de wetgeving een extra steun voor deze technologie. Het systeem van de warmtekrachtcertificaten (WKC's) is door de Vlaamse regering opgezet om primaire energiebesparing te bevorderen door de aanwending van kwalitatieve warmtekrachtinstallaties voor de productie van elektriciteit en warmte. Het systeem bestaat uit twee delen:

1. Enerzijds krijgen eigenaars van kwalitatieve warmtekrachtinstallaties (WKK-producenten) warmtekrachtcertificaten van de VREG (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt).
2. Anderzijds moeten elektriciteitsleveranciers een bepaald aantal WKC's (het quotum) inleveren bij de VREG.

(*Bron: VREG*)

Hieronder staan een aantal technologieën die in het Vlaamse Gewest als kwalitatieve warmtekrachtkoppeling beschouwd worden:

- Gasturbine met warmteterugwinning
- Interne verbrandingsmotor
- Stirlingmotor
- Brandstofcel
- Overige technologieën of combinaties van technologieën die aan de definitie van warmtekrachtinstallatie voldoen volgens het Elektriciteitsdecreet, namelijk 'de opwekking in één proces van warmte en elektriciteit en/of mechanische energie'.

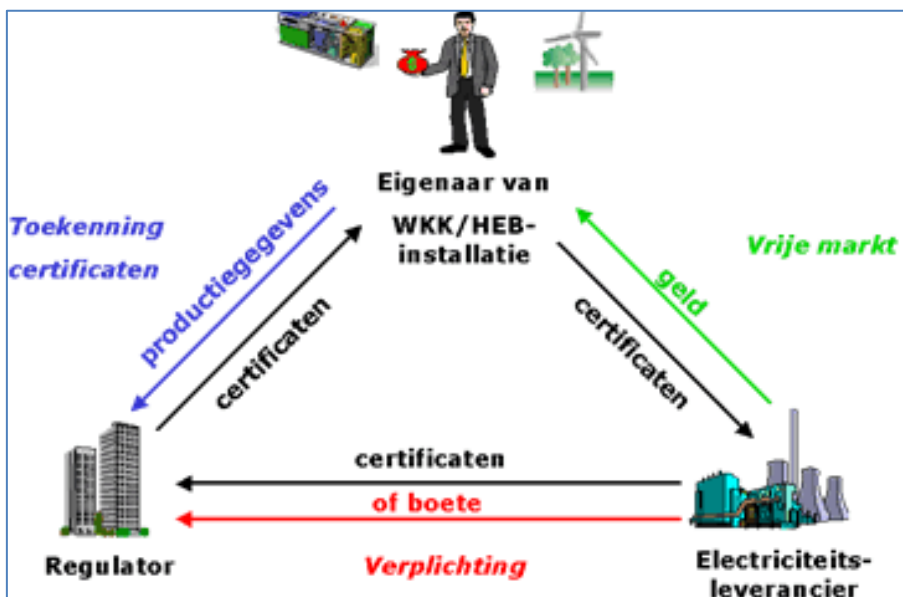
(Bron: VREG)

5.7.1. Toekenning

De VREG reikt warmtekrachtcertificaten uit aan WKK-producenten voor de primaire energiebesparing van hun kwalitatieve warmtekrachtinstallatie in het Vlaams Gewest. Een warmtekrachtcertificaat wordt toegekend per 1000 kilowattuur (1000 kWh = 1 MWh) primaire energie die bespaard wordt in een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie in vergelijking met de gescheiden opwekking van dezelfde hoeveelheid elektriciteit en/of mechanische energie en warmte. Een WKC wordt niet op papier ontvangen door de producenten, maar wordt bijgehouden in de online databank van de VREG.

De producenten hebben de mogelijkheid om de warmtekrachtcertificaten te verkopen aan elektriciteitsleveranciers die moeten voldoen aan hun certificatenverplichting. Als de WKK-producent zelf een elektriciteitsleverancier is, kan hij ze uiteraard zelf gebruiken om aan zijn verplichting te voldoen. Leveranciers die niet voldoen aan hun certificatenverplichting, dienen een boete te betalen van 45 euro per ontbrekend warmtekrachtcertificaat. Vanaf 31 maart 2012 bedraagt deze boete 41 euro per ontbrekend certificaat. Deze boeteprijs is bepaald in artikel 13.3.5, §1, 2° van het Energiedecreet. *(Bron: VREG; het Energiedecreet)*

Onderstaande figuur vat nog eens de werking van het systeem van warmtekrachtcertificaten samen. De eigenaar van een WKK-installatie krijgt certificaten toegekend in ruil voor zijn primaire energiebesparing. De eigenaar kan deze certificaten verkopen aan elektriciteitsleveranciers aan een bepaalde marktprijs of de certificaten zelf gebruiken om aan de quota te voldoen. De elektriciteitsleverancier is verplicht een vooraf bepaald aantal certificaten voor te leggen aan de regulator. Als de leverancier hier niet toe in staat is, dient hij een boete te betalen.



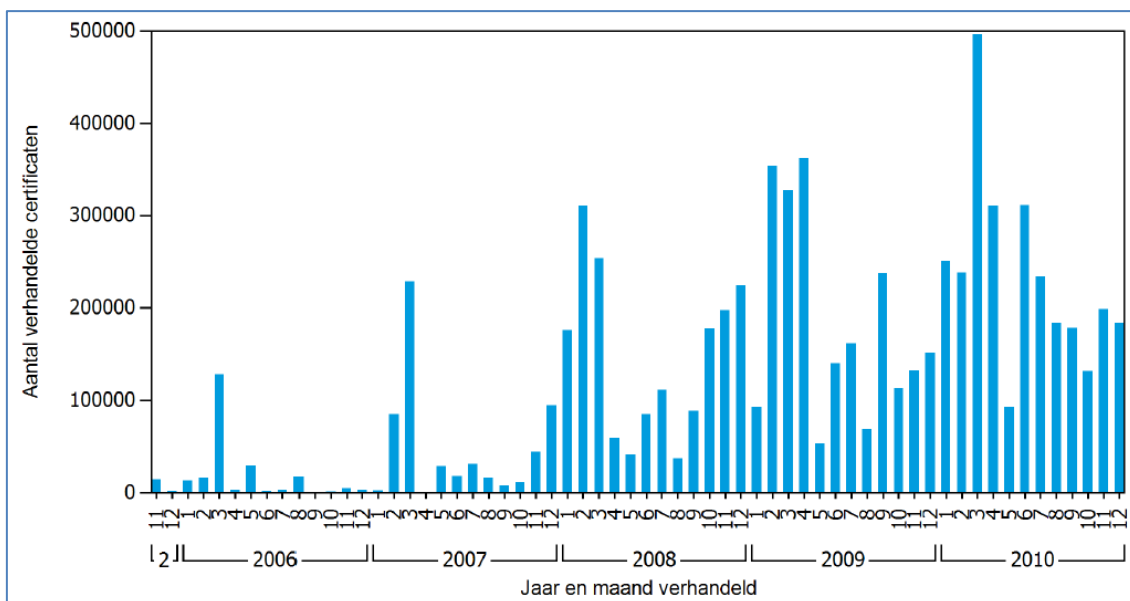
Figuur 16: Samenvatting systeem WKC (Bron: Van den Bergh)

5.7.2. Verkoop warmtekrachtcertificaten

Producenten krijgen dan wel warmtekrachtcertificaten (bijgehouden in de online databank) door primaire energie te besparen, maar dit brengt pas opbrengsten met zich mee van zodra ze deze WKC's kunnen verkopen. In 2009 werd een elektronisch beursplatform opgestart waar warmtekrachtcertificaten (en ook groenestroomcertificaten) verhandeld worden. Dit ontstond door de verbinding van de certificatedatabank van de VREG en de Green Certificate Exchange (GCE) van de Belgische energiebeurs BelPEX. Meer informatie hierover is terug te vinden op de website van BelPEX GCE (<http://www.belpexgce.be>). Bedrijven als

Electrabel, ENECO, Nuon e.d. zijn bijna voortdurend op zoek naar WKC's om aan te kopen zodat zij aan hun verplichting kunnen voldoen. (Bron: VREG)

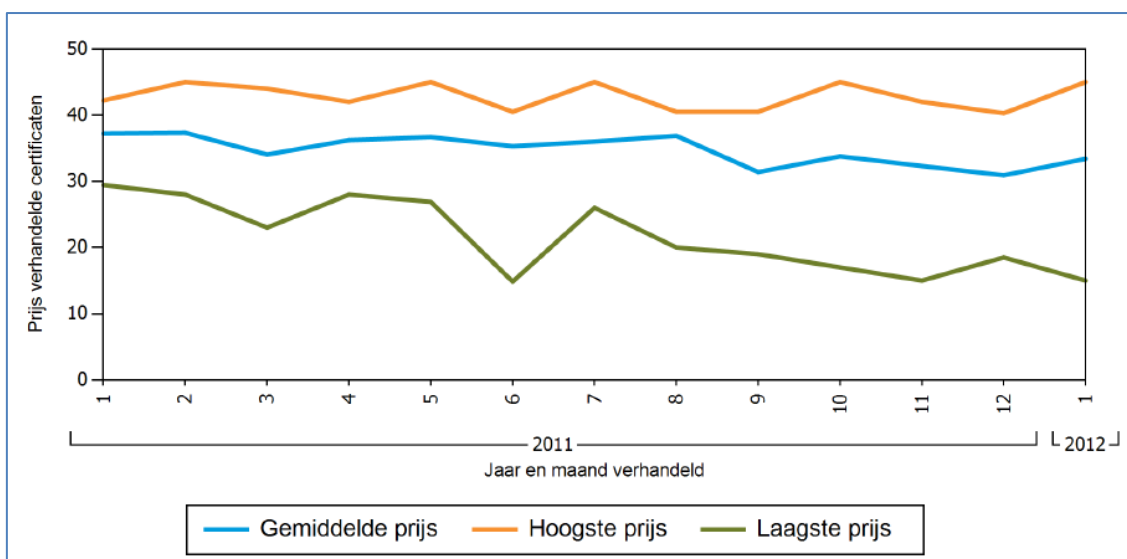
Op onderstaande figuur is de evolutie in het aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten van de afgelopen jaren te zien. Over het algemeen zien we een stijgende trend met regelmatig pieken en dalen. Wat wel opvalt, is dat er elk jaar in de maand maart een piek te zien is. Dit kan toegewezen worden aan het feit dat ten laatste op 31 maart van elk jaar de certificaten moeten ingeleverd worden bij de VREG.



Figuur 17: Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten per maand, vanaf 2006 (Bron: VREG)

In de periode van 1 september 2010 tot 31 augustus 2011 werden er van de ongeveer 4.700.000 toegekende warmtekrachtcertificaten slechts 43 toegekend aan systemen die werken op basis van een Stirlingmotor. Van die 43 WKC's was er slechts één certificaat dat niet in Antwerpen werd toegekend. Het aandeel toegekende WKC's op basis van een Stirlingmotor ligt dus nog bijzonder laag in vergelijking met het totaal aantal verhandelde certificaten. Meer dan de helft van het aantal verhandelde certificaten zijn van systemen met een interne verbrandingsmotor. Met de introductie van micro-WKK zal het aandeel warmtekrachtcertificaten op basis van een Stirlingmotor vermoedelijk stijgen.

Voor de economische analyse is het belangrijk te kunnen inschatten wat de verwachte prijs zal bedragen van de toegekende warmtekrachtcertificaten. De VREG houdt maandelijks gegevens bij van de gemiddelde, laagste en hoogste prijs van een verhandeld warmtekrachtcertificaat. Hieronder staat een grafiek afgebeeld met deze prijzen voor de periode van januari 2011 tot en met januari 2012.



Figuur 18: Prijs van een warmtekrachtcertificaat per maand, vanaf januari 2011 (Bron: VREG)

Bij de prijs van een warmtekrachtcertificaat valt een licht neerwaartse trend op. Waar we in het begin van 2011 nog aan een gemiddelde prijs van €37 zaten, is de gemiddelde prijs in januari 2012 gezakt tot iets meer dan €30.

Er is echter ook een 'minimumsteun' voorzien door de wetgever. Zo is de distributienetbeheerder verplicht de warmtekrachtcertificaten aan te kopen van elke installatie die op zijn net is aangesloten (en minder dan 10 jaar in dienst is) als de producent hem daarom vraagt. Deze minimumprijs bedraagt €27 voor warmtekrachtinstallaties die in werking zijn genomen voor 1 januari 2012 en €31 voor installaties die na 1 januari 2012 in gebruik worden genomen. Deze minimumsteun is gedurende de eerste 10 jaar gegarandeerd. Dit is allemaal bepaald in artikel 7.1.7 van het Energiedecreet. (Bron: het Energiedecreet)

5.7.3. Bepaling Aantal Warmtekrachtcertificaten

Warmtekrachtcertificaten worden door de VREG uitgereikt op maandelijkse basis. Er wordt telkens 1 warmtekrachtcertificaat toegekend per 1.000 kWh warmtekrachtbesparing (WKB) die een installatie heeft gerealiseerd. Als er op één maand echter geen 1.000 kWh is uitgespaard, wordt deze hoeveelheid overgedragen naar de volgende maand. Aangezien de economische analyse op jaarbasis wordt gemaakt, gaan we ook het aantal warmtekrachtcertificaten op jaarbasis bepalen. De berekening van deze warmtekrachtbesparing gebeurt aan de hand van volgende formule:

$$\mathbf{WKB = F_E + F_Q - F}$$

- F_E is de brandstof die bij gescheiden opwekking zou gebruikt worden om evenveel elektriciteit als de WKK op te wekken in deze maand.
- F_Q is de brandstof die bij gescheiden opwekking zou gebruikt worden om evenveel warmte als de WKK op te wekken in deze maand.
- F is de brandstof die de WKK zelf verbruikt in deze maand.

Het is echter niet mogelijk zomaar te meten of te berekenen hoeveel brandstof er bij gescheiden opwekking gebruikt zou worden. Daarom zijn er in het Energiebesluit (artikel 6.2.10, §7-8) rendementen vastgelegd voor deze gescheiden opwekking. Op die manier krijgen alle WKK's een gelijke behandeling. Als we de geproduceerde elektriciteit en warmte in de WKK kennen, kunnen we die rendementen gebruiken om F_E en F_Q berekenen. De formule voor WKB wordt dus aangepast:

$$\mathbf{WKB = F_E + F_Q - F = \frac{E_{\text{netto}}}{\eta_E} + \frac{Q_{\text{netto}}}{\eta_Q} - F}$$

- E_{netto} is de elektrische energie die de WKK netto in deze maand heeft geproduceerd.
- Q_{netto} is de warmte die de WKK netto in deze maand heeft geproduceerd.

- η_E is het rendement voor de gescheiden opwekking van elektriciteit (bepaald in het Energiebesluit).
- η_Q is het rendement voor de gescheiden opwekking van warmte (bepaald in het Energiebesluit).

De Vlaamse referentierendementen die gebruikt worden in de berekening van de WKB bedragen 50% voor de elektriciteitsproductie en 90% voor de warmteproductie.

Deze formule geeft een heel algemeen beeld van de situatie. In realiteit is een installatie complexer. De term Q_{netto} kan bijvoorbeeld bestaan uit verschillende componenten, zoals warmte in de vorm van stoom, warme lucht en heet water. Er kan ook productie van mechanische energie zijn in plaats van elektrische energie. Het principe van de formule blijft wel gelijk voor elke energievorm. (Bron: VREG)

Als we bovenstaande formule invullen, bekomen we de warmtekrachtbesparing waarmee we het aantal WKC's kunnen bepalen voor de economische analyse.

$$\begin{aligned} \text{WKB} &= \frac{2.655,71}{0,50} + \frac{23.260}{0,90} - 26.504,10 = 5.311,42 + 25.844,44 - 26.504,10 \\ &= 4.651,76 \text{ kW} \\ &= 4,65 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Dit houdt dus in dat we op jaarbasis gemiddeld 4,65 warmtekrachtcertificaten zullen ontvangen. Aan een verkoopprijs van €31 komt dit neer op een jaarlijkse opbrengst van €144,20. In de volgende paragraaf zullen we zien echter dat deze opbrengst niet over de volledige levensduur van de micro-WKK loopt.

5.7.4. Degressiviteit

Gezien de gemiddelde prijs van een WKC iets meer dan €30 bedraagt en de gegarandeerde minimumprijs €31 bedraagt vanaf 1 januari 2012, zal in de economische analyse met het

bedrag van de minimumsteun gewerkt worden. De toekenning van warmtekrachtcertificaten loopt echter niet homogeen over de volledige levensduur van de micro-WKK. De eerste vier jaren krijgt de eigenaar het volledige aantal certificaten toegekend. Daarna wordt de toekenning ervan degressief afgebouwd. Het Energiebesluit van 19 november 2010 zegt hier in Artikel 6.2.12 §1 het volgende over: "Voor de productiemaanden die meer dan vier jaar na de indienstneming of ingrijpende wijziging van de warmtekrachtinstallatie vallen, worden voor X % van de warmtekrachtbesparing in de betreffende maand certificaten toegekend die aanvaardbaar zijn voor de certificatenverplichting, en voor (100-X) % van de warmtekrachtbesparing certificaten die niet aanvaardbaar zijn voor de certificatenverplichting."

X wordt berekend volgens de volgende formule:

$$X = 100 * (RPE - 0,2 * (T-48)) / RPE$$

waarbij:

- RPE: de relatieve primaire energiebesparing, uitgedrukt in procenteenheden, en berekend op basis van de meest recente gegevens die bekend zijn bij de aanvraag of die bekend zijn na een controle
- T: de periode tussen de datum van indienstneming en de productiemaand, vermeld op het warmtekrachtcertificaat, uitgedrukt in maanden.

(Bron: Het Energiebesluit van 19 november 2010)

Hoe de relatieve primaire energiebesparing kan berekend worden, staat in Bijlage 1 van het Energiebesluit van 19 november 2010. De relatieve primaire energiebesparing wordt met de volgende formule berekend:

$$RPE = [1 - 1/(W'eta'/Ref W'eta' + E'eta'/Ref E'eta')] * 100 \%$$

waarin:

- RPE de relatieve besparing op primaire energie is;
- W'_{η} het warmterendement van het proces is, gedefinieerd als de jaarlijkse opbrengst aan nuttige warmte, gedeeld door de brandstofinvoer die is gebruikt om de som van de jaarlijkse opbrengst aan warmte, elektriciteit of mechanische energie te produceren;
- Ref W'_{η} de rendementsreferentiewaarde voor gescheiden warmteproductie is;
- E'_{η} het elektriciteitsrendement van het proces is, gedefinieerd als de jaarlijkse netto-opbrengst aan elektriciteit of mechanische energie, gedeeld door de brandstofinvoer die is gebruikt om de som van de jaarlijkse opbrengst aan warmte, elektriciteit of mechanische energie te produceren. Als een warmtekrachtkoppelingseenheid mechanische energie genereert, kan de elektriciteit uit een warmtekrachtinstallatie op jaarbasis worden verhoogd met een aanvullend element dat staat voor de hoeveelheid elektriciteit die gelijk is aan die van mechanische energie. Dat aanvullende element schept geen recht om het hiervoor toegekende warmtekrachtcertificaat overeenkomstig artikel 6.2.13 als garantie van oorsprong te gebruiken;
- Ref E'_{η} de rendementsreferentiewaarde voor gescheiden elektriciteitsproductie of gescheiden productie van mechanische energie is.

(Bron: Het Energiebesluit van 19 november 2010)

De rendementsreferentiewaardes voor gescheiden warmte- en elektriciteitsproductie zijn ook vastgelegd in het Energiebesluit (Artikel 6.2.10 §7 en §8). Het thermisch rendement van de referentie-installatie wordt gelijkgesteld aan 90 % in geval van een warmtekrachtinstallatie die haar warmte afstaat in de vorm van heet water, 93 % in het geval van een warmtekrachtinstallatie die haar warmte afstaat in de vorm van hete lucht voor droogtoepassingen, 85 % in geval van een warmtekrachtinstallatie die haar warmte afstaat in de vorm van stoom of in de vorm van nog niet vermelde media, en 500 % als referentieperformantiecoëfficiënt in het geval van een warmtekrachtinstallatie die koude produceert. Voor warmtekrachtinstallaties die gebruikmaken van biogas, wordt het thermisch

rendement van de referentie-installatie gelijkgesteld aan 70 %. In dit geval staat de referentie-installatie haar warmte af in de vorm van heet water en bijgevolg bedraagt het referentierendement voor warmte 90%.

Het elektrisch rendement van de referentie-installatie wordt voor warmtekrachtinstallaties die gebruikmaken van fossiele energiebronnen gelijkgesteld aan 55 % in geval van een warmtekrachtinstallatie die aangesloten is op een spanningsnet met een nominale spanning die hoger is dan 15 kV, en 50 % in geval van een warmtekrachtinstallatie die aangesloten is op een spanningsnet met een nominale spanning die lager is dan of gelijk is aan 15 kV. Een micro-WKK is typisch aangesloten op een spanningsnet met een nominale spanning van 230 V, en dus is het referentierendement voor elektriciteit 50%.

Nu de referentierendementen gekend zijn, is het nog nodig de rendementen van de micro-WKK te bepalen. De rendementen van de WhisperGen micro-WKK zijn vastgelegd in een testrapport uitgevoerd door de KVBG (Koninklijke Vereniging van Belgische Gasvaklieden) op de Whispergen EU1 op aardgas. Het warmterendement bedraagt 87,76% en het elektriciteitsrendement bedraagt 10,02%. Vervolgens kan bovenstaande formule voor de berekening van de relatieve primaire energiebesparing ingevuld worden:

$$RPE = [1 - 1/(W'eta'/Ref W'eta' + E'eta'/Ref E'eta')] * 100 \%$$

$$RPE = [1 - 1/(0,8776/0,90 + 0,1002/0,50)] * 100 \%$$

$$RPE = 14,93\%$$

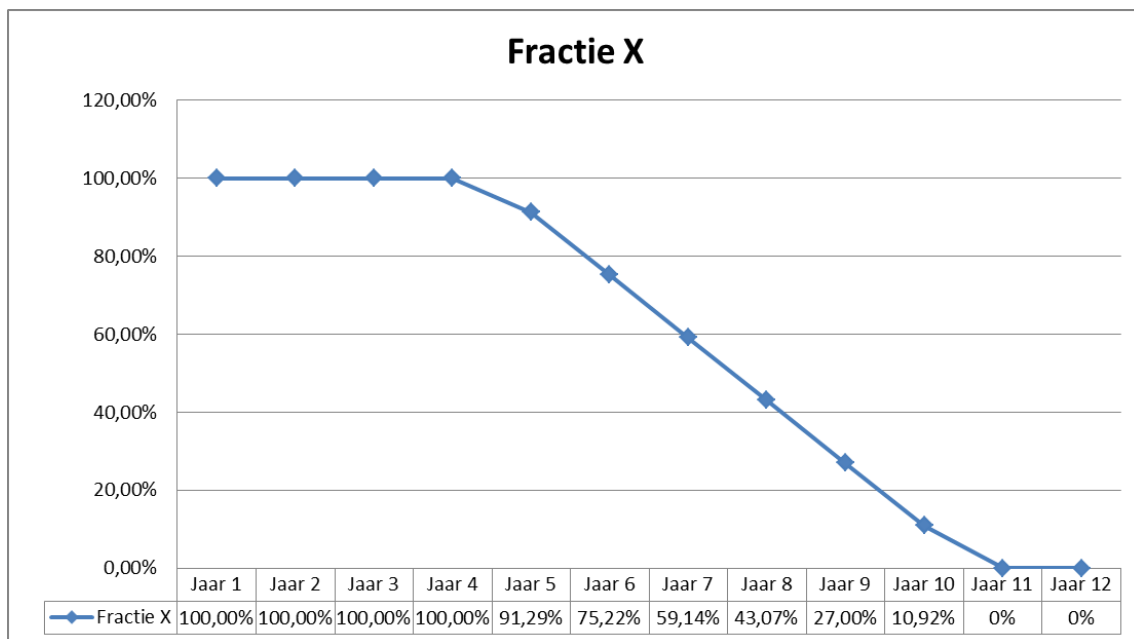
Met de RPE kan uiteindelijk de fractie X bepaald worden die aangeeft hoeveel percent van het aantal certificaten de eigenaar van de micro-WKK zal ontvangen in een bepaalde maand. De overschot zal overgedragen worden naar de volgende maand. Als voorbeeld wordt hieronder uitgeschreven wat de fractie X zal zijn de eerste maand van het vijfde jaar (maand 49):

$$X = 100 * (RPE - 0,2 (T-48)) / RPE$$

$$X = 100 * (14,93 - 0,2 (49-48)) / 14,93$$

$$X = 98,66 \%$$

Aangezien de economische analyse op jaarbasis gebeurt, berekenen we dit ook voor de overige maanden van het vijfde jaar en hiervan wordt vervolgens het gemiddelde genomen. Ditzelfde proces hanteren we ook voor de volgende jaren. De volledige uitwerking van alle fracties is terug te vinden in Bijlage 3. Na een aantal jaren zal de fractie X negatief worden waarna er geen warmtekrachtcertificaten meer zullen worden ontvangen. Onderstaande grafiek geeft de degressiviteit weer voor bovenstaande rendementen. Vanaf jaar 11 wordt fractie X negatief wat gelijkgesteld wordt aan 0 %. Vanaf dan worden er dus geen WKC's meer ontvangen.



Figuur 19: Degressiviteit Warmtekrachtcertificaten

Voor de opbrengsten uit warmtekrachtcertificaten betekent dit het volgende:

	Jaarlijkse Opbrengst WKC's
Jaar 1	€144,20
Jaar 2	€144,20
Jaar 3	€144,20
Jaar 4	€144,20
Jaar 5	€131,65
Jaar 6	€108,47
Jaar 7	€85,29
Jaar 8	€62,11
Jaar 9	€38,93
Jaar 10	€15,75
Jaar 11	€0,00
...	€0,00
Jaar 20	€0,00

5.8. Verwachte levensduur

De verwachte levensduur van een micro-WKK ligt net zoals bij een conventionele ketel rond 15 à 20 jaar. Dit houdt in dat de investering zichzelf zou moeten terugverdienen binnen deze periode om te kunnen spreken over een economisch interessante investeringsopportunity. Met een netto-investering van €12.000, zou er bij een levensduur van 20 jaar jaarlijks €600 zonder verdiscontering bespaard moeten worden op de energiefactuur, gecombineerd met de opbrengsten uit de warmtekrachtcertificaten. Bij een levensduur van 15 jaar, loopt dit bedrag op tot €800.

5.9. Discontovoet

Het vastleggen van de discontovoet is niet eenvoudig, aangezien kleine wijzigingen van deze discontovoet kan leiden tot aanzienlijke verschillen in het resultaat van de NCW-analyse. De discontovoet wordt ook wel eens de opportuniteitskost van het geld genoemd. Dit kunnen we als volgt verklaren: een individu kan de middelen waarover hij beschikt in de financiële markten investeren in plaats van te investeren in een micro-WKK. In het geval van een investering in een micro-WKK zal de opportuniteitskost zijn: het geld op een spaarrekening zetten. De spaarrentes die nu worden toegekend liggen rond 2%. Verwachte inflatie moet ook worden opgenomen in de discontovoet, aangezien de prijsstijgingen die gebruikt worden reële stijgingen zijn. Daarom zal in het basismodel als discontovoet 4% gebruikt worden. Een lagere discontovoet is positief voor de economische aantrekkelijkheid van een micro-WKK, aangezien de andere investeringsopportuniteiten (in dit geval de spaarrekening) geen hoge return geven. Tot een aantal jaren geleden lagen de spaarrentes nog enkele percenten hoger. (*Bron: Financieel Beheer, 2004*)

5.10. Conclusie Basismodel

Nu we alle belangrijke variabelen overlopen hebben, kunnen we deze gebruiken om de Netto Contante Waarde en het Intern Rendement te berekenen. De investering in de WKK-installatie gebeurt in jaar 0 en vanaf jaar 1 beginnen we deze investering terug te verdienen. De netto-investering bedraagt €12.000. De jaarlijkse kost om de micro-WKK te laten draaien is €1.855,29 in jaar 1. Hierbij komt nog de bijkomende elektriciteit die we moeten aankopen aan een kost van €253,29. Dit komt neer op een totale jaarlijkse kost van €2.108,58. We hebben echter ook opbrengsten uit warmtekrachtcertificaten die ons in het eerste jaar €144,20 opleveren. De jaarlijkse kost die we zouden moeten betalen bij decentrale opwekking kan ook gezien worden als een opbrengst. Deze bedraagt €735,00 voor elektriciteit en €1.809,11 voor warmte. Dit kan op deze manier voor jaar 1 worden samengevat:

- €1.855,29	(Micro-WKK)
- €253,29	(Extra elektriciteit)
- €2.108,58	(Totale kost centrale opwekking)
+ €144,20	(Opbrengst WKC's)
+ €1.809,11	(Warmte decentrale opwekking)
+ €735,00	(Elektriciteit decentrale opwekking)
€579,74	(Kostenbesparing jaar 1)
€557,44	(Kostenbesparing na verdiscontering)

In het eerste jaar bekomen we een kostenbesparing van €579,74. Aangezien deze kostenbesparing in het eerste jaar gebeurt, moeten we deze besparing nog verdisconteren. Dit doen we door dit bedrag te delen door 1,04. Op die manier bekomen we de ware kostenbesparing van €557,44. Omdat de prijzen van elektriciteit en aardgas jaarlijks stijgen met 2,8% in het basismodel, is deze jaarlijkse kostenbesparing verschillend van jaar tot jaar. Na vier jaar begint ook de degressiviteit van de WKC's wat tot een verminderde opbrengst leidt. Als we de jaarlijkse kostenbesparing op bovenstaande manier berekenen voor de volledige levensduur van de installatie, kunnen we na verdiscontering (discontovoet = 4%) de NCW en het Intern Rendement berekenen.

$$NCW = -€12.000 + \frac{€579,74}{1,04} + \frac{€591,94}{1,04^2} + \frac{€604,47}{1,04^3} + \dots + \frac{€736,03}{1,04^{20}} = -€3.616,27$$

$$IR = 0,37\%$$

Figuur 20 geeft het volledige basismodel weer. In het basismodel bekomen we een negatieve NCW wat er op wijst dat we de netto-investering van €12.000 niet kunnen terugverdienen over de levensduur van de micro-WKK. We zien dit ook aan het Intern Rendement dat onder

de discontovoet van 4% ligt. Het IR is echter wel positief. Als we de discontovoet zouden verlagen tot onder het IR, zal de NCW positief worden. De Terugverdiëntijd is moeilijk exact te bepalen omdat de jaarlijkse 'opbrengsten' elk jaar verschillen. Maar in het model zien we dat in jaar 20 €736,03 wordt bespaard. Verdisconteerd is dit €335,91. Er moet nog €3.616,27 worden terugverdiend, dus de Terugverdiëntijd zal meer dan 30 jaar bedragen.

Bovenstaande berekening van de NCW en het IR wijst er op dat het installeren van een micro-WKK niet de beste investeringsopportunity blijkt. Puur economisch gezien is het installeren van een conventionele warmteketel voordeliger dan het installeren van een micro-WKK. In Hoofdstuk 8 zullen we echter zien dat de installatie van een micro-WKK naast financiële voordelen (die niet voldoende blijken) ook milieuvoordelen biedt in de vorm van verminderde CO₂-uitstoot. Zulke milieuvoordelen zijn moeilijk uit te drukken in monetaire termen, maar kunnen meespelen in de beslissing om al dan niet te kiezen voor micro-WKK. In het volgende hoofdstuk gaan we aan de hand van twee Monte Carlo-simulaties na welke variabelen nu een belangrijke invloed hebben op deze (negatieve) NCW. Zo kunnen we achterhalen wat er nog kan verbeteren om van micro-WKK naast een ecologisch interessante opportunity ook een economisch interessante opportunity te maken.

	Jaar 0	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8
Gecombineerde opwekking									
Prijs micro-WKK	€ -15.000,00	€ -1.855,29	€ -1.907,24	€ -1.960,64	€ -2.015,54	€ -2.071,97	€ -2.129,99	€ -2.189,63	€ -2.250,93
Prijs aardgas		€ -253,29	€ -260,38	€ -267,67	€ -275,16	€ -282,87	€ -290,79	€ -298,93	€ -307,30
Prijs elektriciteit		€ 144,20	€ 144,20	€ 144,20	€ 144,20	€ 131,65	€ 108,47	€ 85,29	€ 62,11
Opbrengst Warmtekrachtcertificaten									
Aparte opwekking									
Prijs Condenserende Aardgasketel	€ 3.000,00	€ 735,00	€ 755,58	€ 776,74	€ 798,48	€ 820,84	€ 843,83	€ 867,45	€ 891,74
Prijs elektriciteit		€ 1.809,11	€ 1.859,77	€ 1.911,84	€ 1.965,37	€ 2.020,40	€ 2.076,97	€ 2.135,13	€ 2.194,91
Prijs aardgas									
Totaal	€ -12.000,00	€ 579,74	€ 591,94	€ 604,47	€ 617,36	€ 618,05	€ 608,49	€ 599,31	€ 590,53
NCW	€ -3.616,27								
IRR	0,37%								

Jaar 9	Jaar 10	Jaar 11	Jaar 12	Jaar 13	Jaar 14	Jaar 15	Jaar 16	Jaar 17	Jaar 18	Jaar 19	Jaar 20
€ -2.313,96	€ -2.378,75	€ -2.445,36	€ -2.513,83	€ -2.584,21	€ -2.656,57	€ -2.730,96	€ -2.807,42	€ -2.886,03	€ -2.966,84	€ -3.049,91	€ -3.135,31
€ -315,91	€ -324,75	€ -333,84	€ -343,19	€ -352,80	€ -362,68	€ -372,83	€ -383,27	€ -394,01	€ -405,04	€ -416,38	€ -428,04
€ 38,93	€ 15,75	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
€ 916,71	€ 942,38	€ 968,77	€ 995,89	€ 1.023,78	€ 1.052,44	€ 1.081,91	€ 1.112,20	€ 1.143,34	€ 1.175,36	€ 1.208,27	€ 1.242,10
€ 2.256,37	€ 2.319,55	€ 2.384,49	€ 2.451,26	€ 2.519,90	€ 2.590,45	€ 2.662,99	€ 2.737,55	€ 2.814,20	€ 2.893,00	€ 2.974,00	€ 3.057,27
€ 582,14	€ 574,17	€ 574,06	€ 590,13	€ 606,66	€ 623,64	€ 641,10	€ 659,06	€ 677,51	€ 696,48	€ 715,98	€ 736,03

Figuur 20: Basismodel

6. Sensitiviteitsanalyse

Bij de introductie van een 'nieuwe' technologie is het heel belangrijk om een sensitiviteitsanalyse uit te voeren om te weten welke variabelen een belangrijke invloed hebben op de NCW en het Intern Rendement en bijgevolg op het succesvol implementeren in de markt. Het grote probleem van micro-WKK's voor residenties is op dit moment de hoge investeringsprijs. Omdat er nog niet op grote schaal geproduceerd wordt/kan worden ligt de eenheidsprijs nog te hoog, waardoor velen afgeschrikt worden om de investering aan te gaan. Enkele andere belangrijke variabelen bij micro-WKK zijn de rendementen van de conventionele ketel en van de micro-WKK (elektrisch en thermisch), de evolutie van de aardgas- en elektriciteitsprijzen en de jaarlijkse warmte- en elektriciteitsvraag. We houden hierbij vooral rekening met de gevraagde warmte omdat een micro-WKK meestal gedimensioneerd wordt op de warmtevraag. Op de momenten dat de elektriciteits-vraag hoger blijkt dan de gegenereerde elektriciteit, kan deze worden aangekocht uit het net. Bij een overproductie aan elektriciteit, kan de overtollige elektriciteit in het net gepompt worden. Zoals al in het hoofdstuk van dimensionering werd aangehaald, is het belangrijk dat de vraag naar warmte heel nauwkeurig geanalyseerd wordt. In de sensitiviteitsanalyse zal nagegaan worden wat het effect is van wijzigingen van de belangrijkste variabelen op de NCW en het IR. Omdat onzekerheid in deze sector een grote rol speelt en met een dergelijke sensitiviteitsanalyse kan onderzocht worden wat de invloed van de verschillende variabelen is, kunnen we op die manier het risico proberen te beperken en de onzekerheid proberen te verminderen. Onzekerheid zal er altijd zijn, maar het doel is om deze zo klein mogelijk te maken en rekening te houden met de onzekerheid die er overblijft.

Met behulp van het programma Oracle Crystall Ball zal ik een Monte Carlo-simulatie uitvoeren op de variabelen die een invloed uitoefenen op de NCW en het IR. Een Monte Carlo-simulatie komt er op neer dat een waarschijnlijkheidsverdeling van de NCW en het IR wordt opgesteld door veelvuldig de uitvoering van het project te simuleren, d.w.z. op basis van lukraak gekozen waarden van de variabelen veelvuldig de NCW en het IR te berekenen.

(Bron: *Handboek Financieel Beheer*) Om dit te verwezenlijken, moeten we eerst bepalen welke variabelen wijzigingen kunnen ondergaan. De lijst met alle variabelen (en de waarde die de variabele aanneemt in het basismodel) die een invloed hebben op de NCW en het IR is de volgende:

• Eenheidsprijs micro-WKK:	€15.000
• Eenheidsprijs conventionele ketel:	€3.000
• Thermisch rendement WKK:	87,76%,
• Elektrisch rendement WKK:	10,02%
• Rendement conventionele ketel:	90,00%
• Jaarlijkse elektriciteitsvraag:	3.500 kWh
• Jaarlijkse warmtevraag:	23.260 kWh
• Elektriciteit-eenheidsprijs Da-profiel:	€0,30 / kWh
• Elektriciteit-eenheidsprijs Dc-profiel:	€0,21 / kWh
• Aardgas-eenheidsprijs:	€0,07 / kWh
• Jaarlijkse prijsstijgingen:	2,8%
• Verkoop prijs warmtekrachtcertificaten:	€31,00
• Discontovoet:	4,00%

Deze variabelen hebben een invloed op de NCW en het IR. Het zijn dan ook deze variabelen die wijzigingen zullen ondergaan in de Monte Carlo-simulatie. Deze wijzigingen van de variabelen zijn willekeurig binnen een voorafbepaalde verdeling met voorafbepaalde range. Het programma kiest binnen deze verdeling op willekeurige basis waarden voor de variabelen. Dit voert hij een groot aantal keren uit zodat we een waarschijnlijkheidsverdeling van de NCW en het IR bekomen.

In deze sensitiviteitsanalyse zullen twee verschillende Monte Carlo-simulaties uitgevoerd worden. In de eerste simulatie zullen alle variabelen dezelfde uniforme verdeling hebben met een range van -10% en +10% van de basiswaarde. In de tweede simulatie zal meer

realistisch gekeken worden naar welke verdeling en welke range het best past bij een bepaalde variabele. Zo kan het zijn dat een bepaalde variabele een driehoeksverdeling krijgt terwijl een andere variabele de uniforme verdeling behoudt, maar een grotere range krijgt. Het voordeel van de eerste uniforme simulatie is dat alle variabelen dezelfde verdeling en dezelfde relatieve range hebben. We kunnen dan nagaan wat de invloed is van de verschillende variabelen. Het voordeel van het tweede model is dat het realistischer zal zijn, omdat meer aandacht wordt besteed aan de nauwkeurigheid van de verdelingen. Het is namelijk weinig realistisch dat alle variabelen eenzelfde verdeling hebben. Een klein nadeel is echter dat het moeilijk is na te gaan wat de invloed is van de verschillende variabelen, aangezien variabelen die een grotere relatieve range zullen krijgen ook een grotere invloed zullen uitoefenen op de NCW en het IR.

6.1. Uniform model

6.1.1. Verdeling

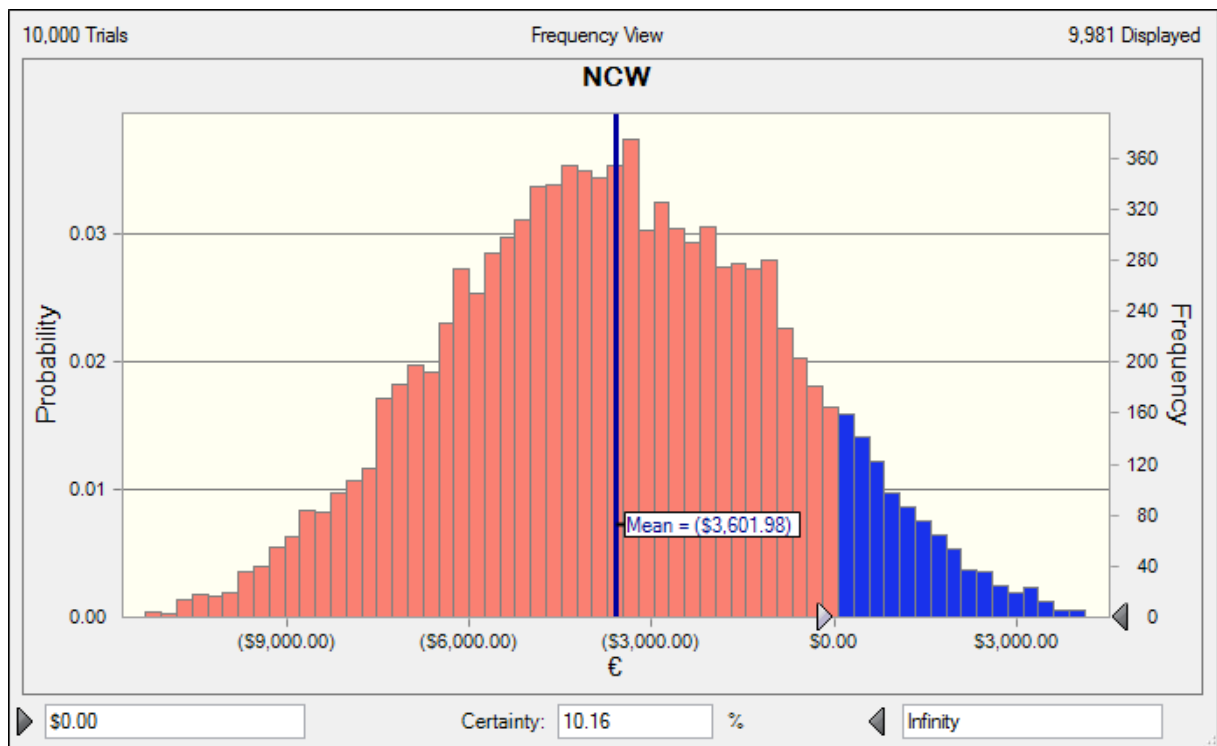
De eerste simulatie is de simulatie waarbij alle variabelen een uniforme verdeling krijgen toegewezen. De range bestaat altijd uit de basiswaarde -10% en +10%. Elke waarde binnen het interval heeft een identieke kans gekozen te worden bij elke herhaling. Dit geeft de volgende verdeling voor de variabelen:

- Eenheidsprijs micro-WKK: [€13.500 ; €16.500]
- Eenheidsprijs conventionele ketel: [€2.700 ; €3.300]
- Thermisch rendement WKK: [78,98 ; 96,54%]
- Elektrisch rendement WKK: [9,02% ; 11,02]
- Rendement conventionele ketel: [81,00% ; 99,00%]
- Jaarlijkse elektriciteitsvraag: [3.150 kWh ; 3.850 kWh]
- Jaarlijkse warmtevraag: [20.934 kWh ; 25.586 kWh]
- Elektriciteit-eenheidsprijs Da-profiel: [€0,27 / kWh ; €0,33 / kWh]
- Elektriciteit-eenheidsprijs Dc-profiel: [€0,19 / kWh ; €0,23 / kWh]

- Aardgas-eenheidsprijs: [€0,06 / kWh ; €0,08 / kWh]
- Jaarlijkse prijsstijgingen: [2,5% ; 3,1%]
- Verkoopprijs warmtekrachtcertificaten: [€27,90 ; €34,10]
- Discontovoet: [3,60% ; 4,40%]

6.1.2. Monte Carlo-simulatie

Het programma Crystal Ball zal van elke variabele een bepaalde willekeurige waarde nemen en met deze waarden de NCW en het IR berekenen. Deze stap voert hij een voorafbepaald aantal keren uit om zo een waarschijnlijkheidsverdeling te bekomen. We laten het programma de simulatie 10.000 keren herhalen om tot de volgende waarschijnlijkheidsverdeling te komen voor de NCW.



Figuur 21: Monte Carlo-simulatie Uniform model

We zien de typische vorm van de normaalverdeling. Dit is te wijten aan de centrale limietstelling die het volgende zegt: "De centrale limietstelling of stelling van Lindeberg-Levy, geeft aan dat de som van een groot aantal onderling onafhankelijke en gelijk verdeelde

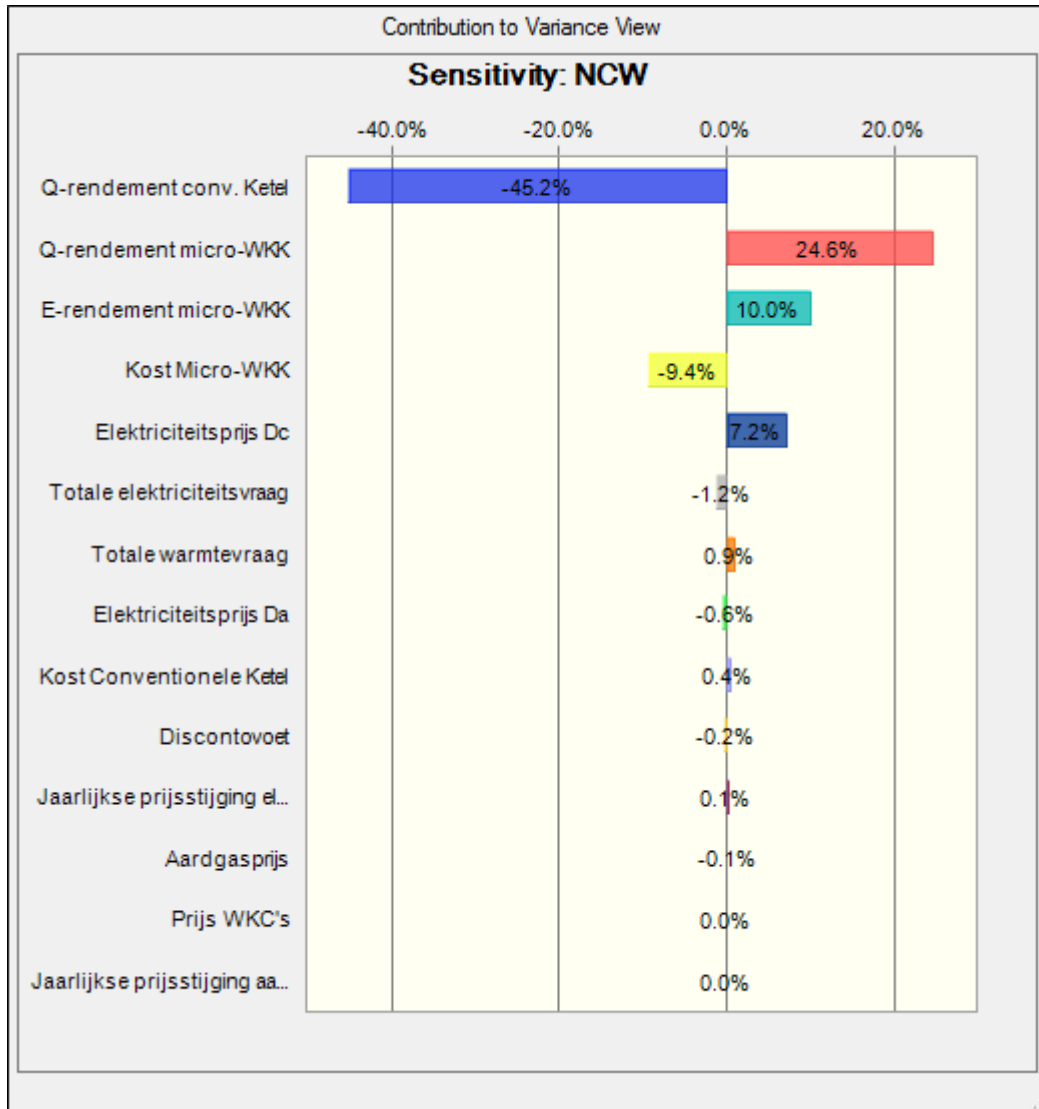
stochastische variabelen met eindige variantie bij benadering een normale verdeling heeft. De variabelen zelf behoeven daarvoor geen normale verdeling te hebben.” (Bron: Wikipedia) Dat is ook precies wat er hier is gebeurd. Alle variabelen hebben een uniforme verdeling en aangezien de simulatie heel veel keren herhaald wordt, verkrijgen we de normaalverdeling. De grafiek geeft ook de gemiddelde waarde van de Netto Contante Waarde weer, namelijk - €3.601,98. Aangezien alle variabelen dezelfde uniforme verdeling hebben en dezelfde relatieve range, is de gemiddelde NCW nagenoeg even groot als de de NCW uit het basismodel, - €3.616,27.

Waar we geïnteresseerd in zijn, is hoe groot de kans is dat de NCW een postieve waarde aanneemt. Dit wordt weergegeven door de blauwe zone op de grafiek. Met de gegeven variabelen en de daarbijhorende verdelingen, bedraagt de kans ongeveer 10% dat de NCW een waarde hoger dan €0 aanneemt. Voor het IR is een soortgelijke grafiek opgesteld die te vinden is in Bijlage 4. We kunnen het programma laten berekenen wat de kans bedraagt dat het IR hoger ligt dan 0%. Deze kans bedraagt 54,47%, wat er op wijst dat in meer dan de helft van de gevallen het Intern Rendement positief zal zijn. Het IR houdt echter geen rekening met de discontovoet, aangezien het IR de disontovoet is waarvoor de NCW €0 bedraagt. Als we anderzijds gaan kijken wat de kans is dat het IR groter is dan 4%³ (de disontovoet van het basismodel), zien we dat dit opnieuw rond 10% ligt. Dit ligt binnen de lijn van verwachting, aangezien dit hetzelfde is als vragen hoe groot de kans is dat de NCW positief is met een discontovoet van 4% zoals hierboven staat beschreven.

6.1.3. Invloed variabelen

We weten nu hoe groot de kans is dat we een postieve NCW bekomen, maar we willen ook weten welke variabelen de grootste invloed uitoefenen op deze NCW. Ook hierover geeft het programma informatie die kan samengevat worden in de volgende figuur.

³ zie Bijlage 4



Figuur 22: Invloed variabelen NCW Uniform model

We zien vijf variabelen die een belangrijke rol spelen in de variantie van de NCW. De variabele met de grootste contributie is het rendement van de conventionele ketel, die bijna de helft van de variantie van de NCW bepaalt. Het rendement wordt in het basismodel op 90% geraamd en heeft een range van 81% tot 99%. De invloed die deze variabele uitoefent op de NCW is negatief, wat erop wijst dat indien het rendement van de conventionele ketel stijgt, de NCW daalt. Een hoger rendement van de conventionele ketel leidt namelijk tot een verlaagde bruto warmtevraag in het geval we geen micro-WKK zouden installeren, met als gevolg dat er minder aardgas zou moeten aangekocht worden.

Twee variabelen die ook een belangrijke invloed uitoefenen zijn de rendementen van de micro-WKK. Zo is er het warmterendement dat een positieve invloed van net geen 25% uitoefent op de variantie van de NCW en ook het elektrisch rendement heeft een positieve invloed, dat met 10% echter minder invloed uitoefent. De reden waarom deze twee variabelen een positieve invloed uitoefenen is dezelfde als voor het rendement van de conventionele ketel, echter in de andere richting. Een hoger warmterendement zorgt voor een lagere bruto warmtevraag en bijgevolg dient er minder aardgas aangekocht worden. Voor het elektrische rendement geldt hetzelfde. Hoe hoger dit rendement, hoe minder extra elektriciteit netto van het net moet getapt worden.

Een variabele die een rechtstreekse invloed uitoefent op de NCW is de aankoop prijs van de micro-WKK. Hoe lager de prijs van de micro-WKK, hoe hoger de NCW zal uitvallen. De vijfde variabele die een belangrijke invloed uitoefent, is de elektriciteitsprijs Dc. De invloed van deze variabele is positief, aangezien het de elektriciteitsprijs is die betaald wordt indien we geen micro-WKK installeren.

In Bijlage 5 zien we in een gelijkaardige figuur als Figuur 20. Het geeft aan welke variabelen een invloed uitoefenen op het IR. Het valt op dat het dezelfde vijf variabelen zijn die de grootste invloed uitoefenen op de variantie. Aangezien deze vijf variabelen samen meer dan 95% van de variantie verklaren voor zowel de NCW als voor het IR, zijn het deze variabelen waar met extra aandacht naar wordt gekeken in het realistisch model. Ook de andere variabelen zullen bekeken worden om te zien of een uniforme verdeling met een range van -10% en +10% realistisch is, maar aangezien de invloed van een aanpassing van de verdeling en/of de range toch heel beperkt zal zijn, moet hier niet te lang bij stilgestaan worden.

6.2. Realistisch model

6.2.1. Verdeling

In de tweede simulatie wordt met meer aandacht gekeken naar de verdeling van de verschillende variabelen en met name naar de variabelen met de grootste contributie. Het zijn deze vijf variabelen die we eerst gaan overlopen in volgorde van belangrijkheid (in Bijlage 6 staan de verdelingen van de verschillende variabelen grafisch voorgesteld):

- *Q-rendement conventionele ketel*⁴: In het uniform model liep de range van het rendement van de conventionele ketel van 81% tot 99% met een gelijke kans voor alle waarden. Dit is een zeer brede range en een warmterendement van 99% is weinig realistisch. Daarom zal de rangebreedte verkleind worden tot -5% en +5%, resulterend in een minimaal rendement van 85% en een maximaal rendement van 95%. Om tegen te gaan dat een rendement van 95% een even grote kans heeft om als waarde gekozen te worden als de basiswaarde van 90%, wordt gekozen voor een driehoeksverdeling met als meest waarschijnlijke waarde 90%.
- *Q-rendement micro-WKK*⁵: Voor het warmterendement geldt ook dat de range van -10% en +10% te breed is. Daarom wordt ook hier de breedte van de ranges aangepast. Ook wordt gekozen voor een driehoeksverdeling zodat de basiswaarde (87,76%) de grootste kans heeft gekozen te worden in de simulatie. We verwachten echter dat de komende jaren het Q-rendement van de micro-WKK enkele percenten zal stijgen door verbeterde technologie en kennis. Daarom wordt voor een schuine driehoeksverdeling gekozen met een minimale waarde van 85% (-3%) en een maximale waarde van 95% (+8%).
- *E-rendement micro-WKK*⁶: Voor het elektrisch rendement geldt de stelling dat de range te breed is niet, aangezien de minimale en maximale waarde respectievelijk 9,02% en 11,02% bedragen wat realistisch lijkt. We gaan, om dezelfde reden als

⁴ zie Bijlage 6a

⁵ zie Bijlage 6b

⁶ zie Bijlage 6c

voor het warmterendement van de micro-WKK (kennis en technologie), de maximale waarde van het E-rendement verhogen tot 13,02% (+30%). We nemen zoals bij de twee warmterendementen een driehoeksverdeling zodat de basiswaarde van 10,02% de grootste kans heeft gekozen te worden als waarde bij de simulatie.

- *Kostprijs Micro-WKK⁷*: De kans dat de kostprijs van de micro-WK op €15.000 ligt is het grootst waardoor we voor een driehoeksverdeling kiezen. De komende jaren wordt verwacht dat de kostprijs van een micro-WKK zal dalen. Daarom kiezen we voor een schuine driehoeksverdeling met een minimale waarde van €10.000 (-33%) en een maximale waarde van €16.500 (+10%).
- *Elektriciteitsprijs Dc⁸*: De elektriciteitsprijs voor het Dc-profiel (verbruik 3.500 kWh) heeft een basiswaarde van €0,21 / kWh met minimale en maximale waarde van €0,19 en €0,23. Deze range lijkt realistisch en we gaan deze dan ook niet wijzigen. Door het grote aantal elektriciteitsleveranciers in Vlaanderen kan de elektriciteitsprijs verschillen tussen verschillende residenties. Daarom behouden we ook de uniforme verdeling zodat de kans voor elke waarde even groot is.

De verdelingen van de vijf variabelen met de grootste invloed zijn grondig geanalyseerd en aangepast waar nodig. Nu is het tijd te bekijken welke van de overige variabelen aangepast moeten worden:

- *Discontovoet*: De discontovoet is moeilijk vast te leggen waardoor de range van 3,6% tot 4,4% te klein kan zijn. Daarom vergroten we deze range tot 3,0% (-25%) en 5,0% (+25%). We behouden een uniforme verdeling zodat elke waarde een even grote kans heeft gekozen te worden.
- *Prijs warmtekrachtcertificaten*: Als basiswaarde voor de prijs van WKC's hebben we €31 gekozen. Dit is tevens de minimum verkoopprijs die vastgelegd is in de wet. Het is daarom onrealistisch dat de minimale waarde van de range €27,9 bedraagt. Daarom leggen we de minimumwaarde vast op €31. In Figuur 16 zien we dat de

⁷ zie Bijlage 6d

⁸ zie Bijlage 6e

maximumprijs waaraan WKC's verkocht worden rond €40 schommelt. Daarom kiezen we voor een driehoeksverdeling met €31 als meest waarschijnlijke waarde. Maar ook de minimumwaarde zetten we vast op €31. De maximumwaarde zetten we op €40.

- *Jaarlijkse prijsstijging aardgas en elektriciteit:* De jaarlijkse prijsstijgingen van 2,8% die gebruikt worden, zijn prognoses die gemaakt werden na onderzoek. De toekomst voorspellen is echter zeer moeilijk. Om die reden wordt de range van beide jaarlijkse prijsstijgingen vergroot met als minimale waarde 1,8% (-33%) en maximale waarde 3,8% (+33%). We behouden een uniforme verdeling.

De overige variabelen die hier niet vermeld staan, behouden hun uniforme verdeling met range van -10% en +10%.

6.2.2. Correlaties

Per herhaling van de simulatie kiest het programma Crystal Ball willekeurig een waarde van elke variabele binnen de verdeling. Het kiest deze waarden zonder rekening te houden met de waarden van andere variabelen. We hebben echter gezien dat de prijzen van elektriciteit en aardgas een gelijkaardig verloop kennen. Dit probleem kan opgelost worden met behulp van het programma door een correlatie tussen deze variabelen toe te voegen. We voeren drie correlaties in:

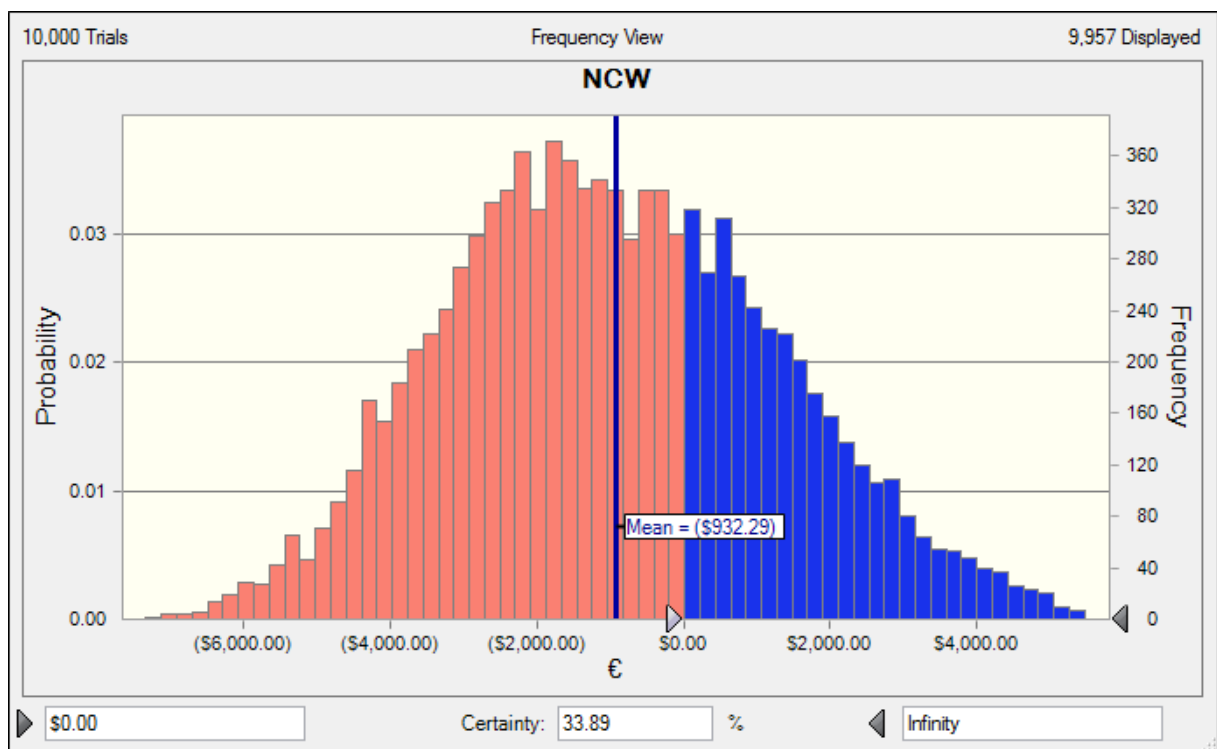
- *Correlatie elektriciteitsprijs Da en elektriciteitsprijs Dc⁹:* De correlatie tussen de elektriciteitsprijzen voor het Da-profiel (verbruik 800 kWh) en het Dc-profiel (verbruik 3.500 kWh) is een perfecte correlatie, dus bedraagt deze 100%. Het kan namelijk niet dat als de prijs van een kleine verbruiker (Da-profiel) wijzigt, de prijs van een gemiddelde verbruiker (Dc-profiel) niet mee wijzigt, aangezien het verschil tussen deze prijzen enkel te wijten is aan het feit dat de vaste kost verdeeld wordt over een lager verbruik.

⁹ zie Bijlage 7a

- *Correlatie elektriciteitsprijs Dc en aardgasprijs¹⁰*: Uit Figuur 12 en 13 konden we afleiden dat de elektriciteitsprijs en de aardgasprijs eenzelfde verloop kennen. Als de aardgasprijs wijzigt, wijzigt de elektriciteitsprijs ook. Daarom geven we de elektriciteitsprijs Dc en de aardgasprijs ook een correlatie mee. Deze correlatie zetten we op 80%. Een hoge waarde voor de aardgasprijs zal dan gepaard gaan met een hoge elektriciteitsprijs.
- *Correlatie jaarlijkse prijsstijging elektriciteit en aardgas¹¹*: Voor dezelfde reden als voor de correlatie tussen de elektriciteits- en aardgasprijs, geven we de jaarlijkse prijsstijgingen ook een correlatie van 80%.

6.2.3. Monte Carlo-simulatie

Als alle variabelen een verdeling en een eventuele correlatie hebben meegekregen, kunnen we het programma de simulatie laten uitvoeren. We krijgen dan het volgende resultaat:



Figuur 23: Monte Carlo-simulatie Realistisch model

¹⁰ zie Bijlage 7b

¹¹ zie Bijlage 7c

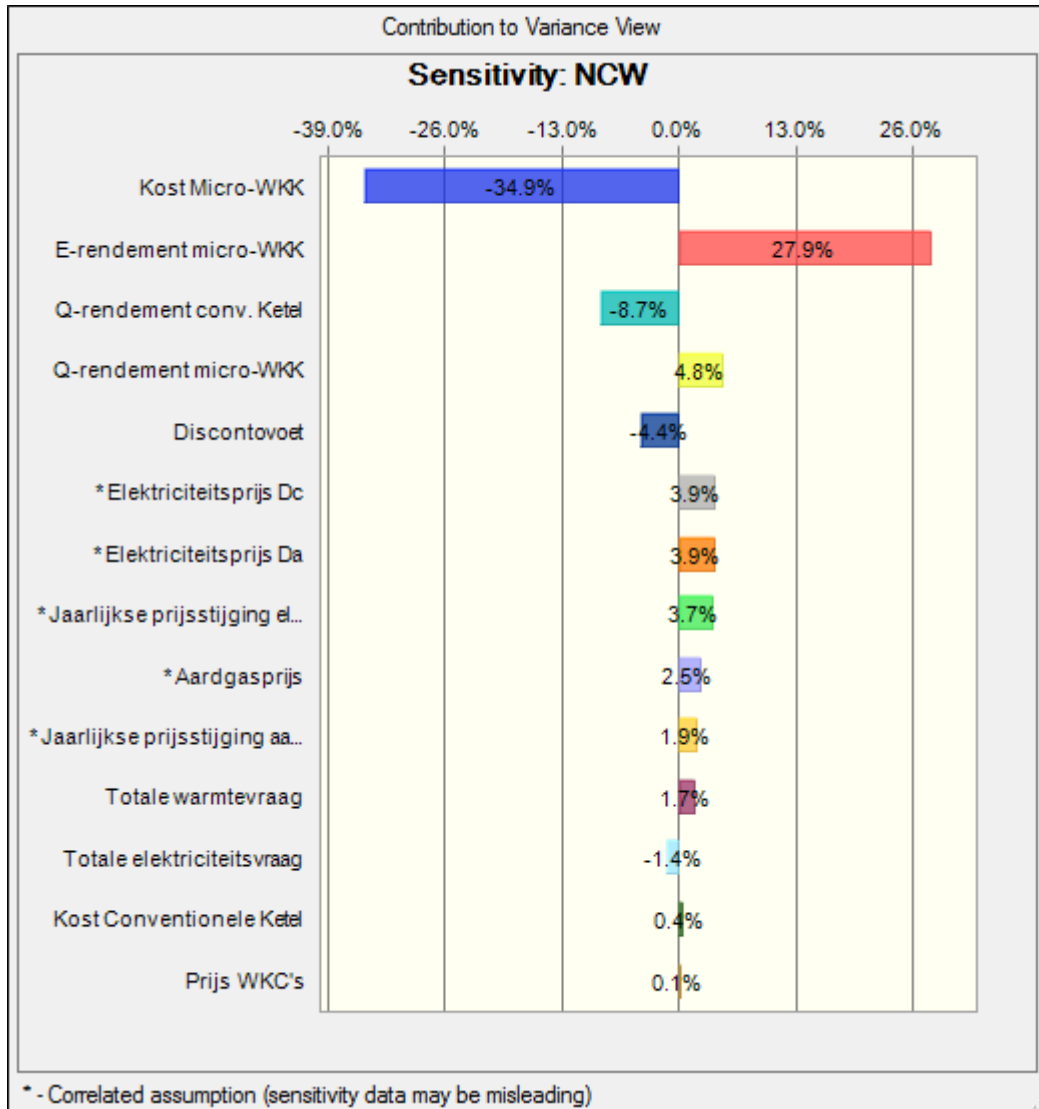
Door de centrale limietstelling verkrijgen we opnieuw de typische vorm van een normaalverdeling. De gemiddelde NCW ligt nu met - €932,29 echter ver verwijderd van de waarde van het basismodel. De kans dat de NCW nu een positieve waarde aanneemt is ook aanzienlijk gestegen. Waar we in het uniforme model slechts in één op tien gevallen een positieve waarde verkregen, is de kans nu één op drie om tot een positieve NCW te komen. Door enkel met een realistische kijk naar de verdeling van de verschillende variabelen te kijken, verdrievoudigen we de kans om tot een positieve NCW te komen.

Net als in het uniform model, is de Monte Carlo-simulatie ook hier uitgevoerd voor het IR, zoals te zien is in Bijlage 8. Waar de kans op een positief IR net boven 50% lag in het uniform model, is deze kans in het realistisch model gestegen tot iets meer dan 90%. De kans dat het IR groter dan 4% bedraagt¹², is even groot als de kans op een positieve NCW. Dit komt omdat de verdeling van de discontovoet symmetrisch is. In het geval we een schuine verdeling zouden toewijzen aan de discontovoet, zullen deze twee waarden niet meer overeenkomen.

6.2.4. Invloed variabelen

Ook in het realistisch model gaan we na wat de invloed van de verschillende variabelen op de variantie van de NCW is. Het is belangrijk dat we hier rekening houden met het feit dat de relatieve range (die -10% en +10% bedroeg in het uniform model) van de variabelen niet meer hetzelfde is voor alle variabelen. Daarom moeten we met voorzichtigheid de invloed van de variabelen analyseren. Door een grotere relatieve range te hanteren bij bepaalde variabelen, zal de invloed van deze variabelen stijgen. Een tweede punt dat in acht moet genomen worden, zijn de correlaties die zijn toegevoegd. Correlaties zorgen er ook voor dat de invloed van bepaalde variabelen biased kan zijn. Onderstaande figuur geeft de invloed van de variabelen weer.

¹² zie Bijlage 8



Figuur 24: Invloed variabelen NCW Realistisch model

Uit Figuur 24 kunnen we afleiden dat er een verschuiving heeft plaatsgevonden in de grootte van de contributie van de verschillende variabelen. We zien twee variabelen die samen meer dan 60% van de variantie verklaren en een stuk boven de andere variabelen uit steken qua contributie. Enerzijds is er de eenheidsprijs van de micro-WKK die net geen 35% verklaart. In het uniform model verklaarde deze variabele nog geen 10% van de variantie. Zoals eerder werd aangehaald, is deze stijging in contributie te wijten aan het feit dat de range van deze variabele vergroot werd. Anderzijds speelt het elektrisch rendement van de micro-WKK met bijna 28% ook een grote rol. Ook deze variabele verklaarde maar 10% van de variantie van

de NCW in het uniform model. Dezelfde reden kan hier aangehaald worden voor de stijging in contributie, namelijk dat we de range vergroot hebben. De twee variabelen hebben wel een tegenovergesteld teken. Een hogere eenheidsprijs van de micro-WKK leidt tot een lagere NCW, terwijl een hoger elektrisch rendement van de micro-WKK leidt tot een hogere NCW.

Het rendement van de conventionele ketel, dat in het uniform model bijna de helft van de variantie verklaarde, verklaart nu 'slechts' 8,7% van de variantie. De reden van de daling in contributie is dezelfde als voor de stijging van de vorige twee variabelen, maar dan in de andere richting. De range van het rendement van de conventionele ketel is verkleind waardoor de contributie afneemt. Een tweede reden waarom de contributie afneemt, is de vorm van de verdeling. In het uniform model was er sprake van een uniforme verdeling. De maximumwaarde had dus evenveel kans om gekozen te worden als de basiswaarde of de minimumwaarde, waardoor de contributie hoger uitvalt. In een driehoeksverdeling is de kans dat de extreme waarden gekozen worden aanzienlijk kleiner waardoor de contributie tot de variantie afneemt.

Na deze drie variabelen vormt zich een groep van vijf variabelen die allen 4 à 5% van de variantie van de NCW verklaren. Net als in het uniform model zijn dit het warmterendement van de micro-WKK en de elektriciteitsprijs Dc. Maar hier komen ook nog de discontovoet, de elektriciteitsprijs Da en de jaarlijkse prijsstijging van elektriciteit bij. De twee verschillende elektriciteitsprijzen en de jaarlijkse prijsstijging van elektriciteit bezitten wel correlaties (aangeduid door een *), dus we moeten deze contributies met enige voorzichtigheid interpreteren.

Vervolgens is er nog een groep van vier variabelen die schommelen rond een contributie van 2%, waarvan er ook twee variabelen een correlatie bezitten. De prijs van een conventionele ketel en de prijs van de warmtekrachtcertificaten blijven net zoals in het uniform model maar een zeer beperkte invloed uitoefenen op de NCW. In Bijlage 9 zien we dat het dezelfde variabelen zijn die een invloed uitoefenen op de variantie van het IR.

6.3. Conclusie sensitiviteitsanalyse

In deze sensitiviteitsanalyse werd vertrokken vanuit het basismodel dat in Hoofdstuk 5 werd opgesteld. De Netto Contante Waarde in dat basismodel bedraagt - €3.616,27 en het Intern Rendement bedraagt 0,37%. De berekening van de NCW en het IR is afhankelijk van een aantal variabelen die allen op hun eigen manier een invloed uitoefenen op het resultaat. Het doel van deze sensitiviteitsanalyse was door middel van een Monte Carlo-simulatie nagaan welke variabelen een belangrijke invloed uitoefenen op de NCW en het IR. Een dergelijke simulatie berekent de NCW en het IR een groot aantal keren met steeds verschillende waarden van de variabelen om zo een waarschijnlijkheidsverdeling te bekomen.

In het eerste model (uniform model) kregen alle variabelen dezelfde uniforme verdeling met een relatieve range van -10% en +10%. Als we de simulatie 10.000 keren herhalen, resulteert dit in een kans van één op tien op een positieve NCW. De kans dat het IR positief is, ligt boven 50%, maar het IR houdt geen rekening met de discontovoet. Vervolgens zijn we gaan kijken welke variabelen de grootste invloed hebben op de variantie van de NCW. De belangrijkste was het rendement van de conventionele ketel, gevolgd door de twee rendementen (Q en E) van de micro-WKK. Ook de eenheidsprijs van de micro-WKK en de elektriciteitsprijs voor het Dc-profiel spelen een belangrijke rol.

In het tweede model (realistisch model) gingen we met meer realisme kijken naar de verdeling van de verschillende variabelen, en met extra aandacht voor de variabelen die in het uniform model een belangrijke rol speelden. Ook voegden we correlaties toe tussen variabelen waar dit nodig bleek. Door de Monte Carlo-simulatie 10.000 keren te herhalen, verkregen we een kans van één op drie om tot een positieve NCW te komen. Dit is meer dan een verdrievoudiging zonder de basiswaarden te wijzigen. De kans op een positief Intern Rendement steeg tot meer dan 90%. Twee variabelen spelen een hoofdrol in de contributie tot de variantie van zowel de NCW en het IR, namelijk de eenheidsprijs en het elektrisch rendement van de micro-WKK. Naast deze twee variabelen speelt ook het rendement van de

conventionele ketel een aanzienlijke rol. Hierna volgt een groot aantal variabelen die allen een kleinere, min of meer gelijkwaardige invloed uitoefenen op de variantie.

Ondanks het feit dat de kans op een positieve NCW meer dan verdrievoudigt door de verdeling van de verschillende variabelen aan te passen, moeten we toch kritisch omgaan met deze resultaten. Een kans van één op drie op een positieve NCW blijft (te) laag om de investering aan te gaan. Om micro-WKK economisch aantrekkelijker te maken voor residentiële woningen, is het essentieel dat we deze kans verhogen. We hebben deze kans reeds verhoogd door de verdeling van de variabelen aan te passen, maar dit blijkt onvoldoende. Een tweede manier om deze kans te verhogen is de NCW van het basismodel verbeteren. Een variabele waarmee we dit rechtstreeks kunnen bereiken is de eenheidsprijs van de micro-WKK. De verwachting is dat deze kostprijs de komende jaren door verbeterde kennis en technologie zal dalen. Ook schaalvoordelen, doordat micro-WKK op grotere schaal zal geproduceerd worden, zullen de prijs doen dalen. Deze daling van de eenheidsprijs leidt tot een stijging van de NCW en het IR. Twee andere variabelen die een belangrijke rol speelden in de sensitiviteitsanalyse zijn de rendementen (Q en E) van de micro-WKK. Als we er in kunnen slagen deze rendementen te laten stijgen, zal de jaarlijkse kost om de residentiële woning van warmte en elektriciteit te voorzien, dalen. Ook dit leidt tot een verbeterde NCW. Andere variabelen die een belangrijke rol speelden, zoals het rendement van de conventionele ketel, de elektriciteits- en aardgasprijs en de jaarlijkse prijsstijgingen zijn variabelen die buiten ons bereik liggen en die we dus niet kunnen aanpassen of verbeteren.

In Hoofdstuk 5 werd al aangehaald dat tot voor 1 januari 2012 bij de aankoop van een micro-WKK een belastingvermindering werd toegekend van 40%, wat neerkomt op een besparing van €6.000, verspreid over drie jaren. Deze belastingvermindering zorgde ervoor dat de NCW en daarbijhorend de economische aantrekkelijkheid van micro-WKK heel wat hoger lag. Ook het bedrijf FaCoTherm voelt dit aan zijn verkoop van micro-WKK's. Het grootste deel van hun verkoop situeert zich voor 1 januari 2012. Wat de gevolgen van deze

afschaffing gaan zijn voor de verdere ontwikkeling van micro-WKK zal de toekomst uitwijzen. Een verminderde verkoop zal namelijk leiden tot minder inkomsten waardoor er minder geld kan vrijgemaakt worden voor onderzoek. Dit onderzoek is essentieel om de technologie verder te verbeteren. Als de verkoop stilvalt, zullen ook de schaalvoordelen die een oorzaak van prijsverlaging kunnen zijn, niet meer gelden. In het volgende hoofdstuk zal onderzocht worden wat het marktpotentieel van micro-WKK is indien een grootschalige introductie van micro-WKK zich toch zou voordoen.

7. Marktpotentieel

Zoals eerder vermeld is het aantal residenties met een micro-WKK in Vlaanderen voorlopig nog zeer beperkt. In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat de toekomstperspectieven zijn van micro-WKK in Vlaanderen. Het is de bedoeling te onderzoeken hoeveel residenties in Vlaanderen een micro-WKK zouden kunnen installeren om zo het marktpotentieel te kunnen inschatten. Om dit te kunnen onderzoeken, is het noodzakelijk dat er eerst een beeld wordt geschetst van het woningpark in Vlaanderen. Er zijn een aantal variabelen die het marktpotentieel van micro-WKK bepalen:

- Warmtevraag
- Type verwarming
- Vervangingssnelheid

7.1. Warmtevraag

Het is belangrijk dat de warmtevraag voldoende hoog is om micro-WKK rendabel te maken. Door een hoge warmtevraag wordt er voldoende elektriciteit opgewekt waardoor men ten volle gebruik kan maken van de voordelen van warmtekrachtkoppeling. De belangrijkste variabelen die een invloed hebben op de warmtevraag zijn het type van de woning, het bouwjaar van de woning en de grootte van de woning.

7.1.1. Type woning

Een assumptie die over het algemeen gemaakt kan worden, is dat alleenstaande en halfopen bebouwingen een grotere warmtevraag hebben dan rijwoningen en appartementen en bijgevolg dus geschikter zijn voor de toepassing van micro-WKK. Gegevens van de Federale Overheidsdienst Economie geven voor 2011 de volgende verdeling:

Type bebouwing	Percentage Vlaanderen	Aantal vlaanderen
Gesloten bebouwing	24,8%	643.417
Halfopen bebouwing	21,3%	552.866
Open bebouwing	33,6%	870.939
Appartementen / Buildings	4,0%	103.077
Handelshuizen	3,4%	88.996
Andere / Onbekend	12,8%	330.993
Totaal	100%	2.590.288

(Bron: FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie)

In deze verdeling is een groot aantal andere of onbekende woningen te vinden. In 2001 heeft het NIS op basis van een socio-economische enquête een gedetailleerd en betrouwbaar beeld geschetst van de toenmalige samenstelling van het gebouwenpark in Vlaanderen. Volgende verdeling was destijds het resultaat:

Type bebouwing	Percentage Vlaanderen	Aantal vlaanderen
Gesloten bebouwing	22,6%	617.814
Halfopen bebouwing	20,4%	557.673
Open bebouwing	36,1	986.863
Appartementen / Studio /...	20%	546.738
Andere / Onbekend	0,9%	24.603
Totaal	100%	2.733.691

(Bron: Six en Dexters, 2009)

7.1.2. Bouwjaar woning

Micro-warmtekrachtkoppeling richt zich vooral op de renovatiemarkt. Dit is te wijten aan de strenge regelgeving omtrent isolatienormen in nieuwbouwwoningen die ervoor zorgen dat de warmtevraag in nieuwbouwwoningen te laag ligt om warmtekrachtkoppeling toe te passen. Oudere woningen zijn over het algemeen minder goed geïsoleerd en het is niet altijd mogelijk om bij renovatiewerken na te isoleren (vb. in het geval van volle muren). (Bron: Six en Dexters, 2009) zoals al eerder werd aangehaald, werd het belang van goed isoleren pas

duidelijk bij de eerste oliecrisis die zich afspeelde in de jaren '70. Het zijn dus de woningen die voor 1970 gebouwd werden die het meest in aanmerking komen voor de toepassing van micro-WKK. De Federale Overheidsdienst Financiën houdt hiervan gegevens bij en de stand van zaken in 2011 kan als volgt worden weergegeven:

Bouwjaar	Percentage Vlaanderen	Aantal Vlaanderen
Voor 1970	57,2%	1.481.552
Na 1970	42,8%	1.108.736
Totaal	100%	2.590.288

We zien dat de gemiddelde leeftijd van het gebouwenpark in Vlaanderen relatief hoog is. In deze gebouwen is na-isolatie vaak moeilijk waardoor deze residenties geschikt zijn voor de toepassing van micro-WKK.

7.1.3. Grootte woning

Naast het type van de woning en het bouwjaar, speelt ook de grootte van de woning een rol. Hoe groter de bewoonbare oppervlakte van de woning, hoe hoger de warmtevraag zal liggen. Volgens Six en Dexters (2009) is een bewoonbare en verwarmde oppervlakte van meer dan 110 m² een goede vuistregel. Volgens gegevens van de Federale Overheidsdienst Economie heeft meer dan de helft van de woningen in Vlaanderen een oppervlakte van meer dan 104 m².

7.2. Type verwarming

In een vorig hoofdstuk werden de verschillende WKK-technologieën overlopen. De technologie die op dit moment het verste staat is de technologie op basis van de Stirlingmotor, met aardgas als brandstof. Om een introductie op relatief korte termijn te kunnen bereiken, moeten we dus kijken naar residenties die op dit moment een centrale verwarming op aardgas hebben. Een enquête van het NIS in 2001 kwam tot de volgende conclusies:

- Respectievelijk 47,5%, 39% en 8,5% van het gebouwenpark wordt verwarmd met aardgas, stookolie en elektriciteit.
- Bijna 75% van de gebouwen heeft een centraal verwarmingssysteem.
- Ongeveer 36% van het gebouwenpark (856.805 woningen) wordt verwarmd met een centrale verwarming op aardgas.
- Halfopen en open bebouwingen met centrale verwarming op aardgas een bouwjaar voor 1970 vertegenwoordigen ongeveer 6,5% van het gebouwenpark (157.209 woningen). Dit is de meest geschikte groep voor de onmiddellijke installatie van micro-WKK.
- Het aantal halfopen en open bebouwingen met (centrale of decentrale) verwarming op aardgas bedraagt 19,4% van het gebouwenpark (465.845 woningen).

De laatste tien jaar wordt bij renovaties vaak teruggegrepen naar centrale verwarming op aardgas, dus deze cijfers uit 2001 onderschatten allicht de huidige situatie. (*Bron: Six en Dexters, 2009*)

7.3. Vervangingssnelheid

Tot hiertoe werd een overzicht gegeven van het totale marktpotentieel van micro-WKK op relatief korte termijn. We willen echter ook een inzicht krijgen in de jaarlijkse verkopen en trends op de huidige markt voor verwarmingsketels. Uit een rapport van BRG Consult in 2008 blijkt dat in 2007 ongeveer 162.000 verwarmingsketels op aardgas verkocht werden in België. Ongeveer 10% hiervan was niet bedoeld voor de residentiële sector en 75% van de ketels zijn voor Vlaanderen bestemd. Dit komt dus neer op ongeveer 110.000 verwarmingsketels op aardgas die in 2007 verkocht werden op de Vlaamse markt.

7.4. Hindernissen

De steeds strenger wordende regelgeving omtrent isolatienormen is geen goed nieuws voor de introductie van micro-WKK. Nieuwbouwwoningen zijn verplicht een zodanig laag E-peil te hebben dat de warmtevraag onvoldoende is om micro-WKK rendabel te maken. Ook de groeiende populariteit van passiefwoningen en lage-energiewoningen zijn mogelijke hindernissen voor de marktintroductie van micro-WKK.

7.5. Conclusie marktpotentieel

Om een micro-WKK rendabel te maken, is het belangrijk dat de warmtevraag voldoende hoog ligt. De warmtevraag wordt grotendeels bepaald door de grootte, het bouwjaar en het type van de woning. Tevens is het belangrijk de juiste aansluiting te bezitten. Niet alle woningen in Vlaanderen hebben de juiste aansluiting om een micro-WKK te installeren. Op basis van bovenstaande gegevens, kan geconcludeerd worden dat tussen 21 en 42% van de huidige residentiële gasaansluitingen in Vlaanderen in aanmerking komen voor een micro-WKK op basis van de Stirlingtechnologie. Dit komt overeen met een marktpotentieel van 300.000 à 600.000 residenties. De gemiddelde jaarlijkse warmtevraag schommelt hierbij rond 25 MWh. Het kan echter een bepaalde tijd duren vooraleer dit marktpotentieel volledig bereikt wordt. Als we rekening houden met de vervangingsnelheid van verwarmingsketels, zou het jaarlijks potentieel van micro-warmtekrachtkoppeling 23.000 tot 46.000 eenheden bedragen. De markt zou dan op ongeveer 13 jaar bevoorraad kunnen zijn. *(Bron: Six en Dexters, 2009)*

8. Milieu

In het inleidend hoofdstuk werd reeds aangehaald dat de globale CO₂-concentratie de voorbij 40 jaar is verdubbeld. Het is belangrijk om in de toekomst deze groei van CO₂-uitstoot, waarvan de gevolgen in de hele wereld te zien zijn, tegen te houden en indien mogelijk een neerwaartse trend te bekomen. Micro-WKK kan hierin een belangrijke rol spelen. Naast de primaire energiebesparing die in het hoofdstuk van de economische haalbaarheid werd berekend, is ook de verminderde CO₂-uitstoot in vergelijking met de conventionele opwekking een troef van warmtekrachtkoppeling. Om deze verminderde CO₂-uitstoot te berekenen, gebruiken we dezelfde referentierendementen voor elektriciteit en warmte als bij de berekening van de PEB. Dit wil zeggen een rendement van 50% voor de referentiecentrale van elektriciteit en 90% als thermisch rendement voor de referentieketel. We brengen echter ook de carbon emissiefactoren van gasverbranding (CEF_{gas}) en elektriciteitsproductie (CEF_{elek}) in rekening. Bij de verbranding van 1 kWh aardgas wordt 0,2 kg CO₂ uitgestoten en bij de aanmaak van 1 kWh elektriciteit komt er 0,5 kg CO₂ vrij. Voor elektriciteit is het belangrijk te kijken naar het productiepark van het beschouwde land. Een land met een productiepark dat vooral bestaat uit kolencentrales zal een hogere CEF_{elek} hebben dan een land met een productiepark dat voornamelijk bestaat uit kerncentrales en wind- of waterturbines. De CO₂-besparing kan opgesplitst worden in enerzijds de absolute besparing en anderzijds de relatieve besparing.

8.1. Absolute CO₂-besparing

CEB (CO₂ Emissie Besparing) stelt de absolute CO₂-besparing per jaar in kg voor in vergelijking met de gescheiden opwekking:

$$CEB = E * \left(CEF_{elek} + \frac{\alpha_{th} * CEF_{gas}}{\alpha_e * \eta_{th}} - \frac{CEF_{gas}}{\alpha_e} \right)$$

Waarbij:

- E: door de WKK-installatie geproduceerde elektriciteit
 α_{th} : thermisch rendement van de WKK-installatie (87,76%)
 η_{th} : thermisch rendement van de referentieketel (90%)
 α_e : elektrisch rendement van de WKK-installatie (10,02%)
 CEF_{gas} : 0,2 kg CO₂ / kWh gas
 CEF_{elek} : 0,5 kg CO₂ / kWh elektriciteit

Als we bovenstaande formule invullen verkrijgen we:

$$CEB = E * (0,5 + \frac{0,8776 * 0,2}{0,1002 * 0,90} - \frac{0,2}{0,1002})$$

$$CEB = 2.655,71 * 0,450$$

$$CEB = 1.200,43 \text{ kg}$$

Door de elektriciteit en warmte te laten opwekken door een micro-WKK in plaats van een conventionele ketel en een elektriciteitscentrale, kan er jaarlijks 1200 kg minder CO₂-uitstoot zijn.

8.2. Relatieve CO₂-besparing

RCE stelt de relatieve CO₂-besparing op jaarbasis voor in vergelijking met de gescheiden opwekking:

$$RCE = (1 - \frac{CEF_{gas}}{\alpha_e * CEF_{elek} + \frac{\alpha_{th}}{\eta_{th}} * CEF_{gas}}) * 100\%$$

$$RCE = (1 - \frac{0,2}{0,1002 * 0,5 + \frac{0,8776}{0,90} * 0,2}) * 100\%$$

$$\text{RCE} = 18,41\%$$

In hoofdstuk 5 werd onderzocht wat de economische voordelen van een micro-WKK zijn. Met de installatie van een micro-WKK zijn we in staat elk jaar enkele honderden euro's terug te verdienen. Deze economische voordelen bleken echter onvoldoende om de hoge kostprijs terug te verdienen. In dit hoofdstuk zien we dat er naast economische, ook ecologische voordelen zijn aan de installatie van een micro-WKK. Een verminderde jaarlijkse CO₂-uitstoot van 1.200 kg is toch een aanzienlijke besparing. Naast een verminderde CO₂-uitstoot, zijn er ook andere stoffen (zoals NO_x, SO_x, ...) waarvan de uitstoot lager zal uitvallen.

9. Conclusie

De energieproblematiek is een wereldwijd fenomeen dat ernstige gevolgen met zich meebrengt. Elk jaar worden nieuwe temperatuurrecords gevestigd, het aantal milieurampen is bijna niet meer te tellen en de fossiele brandstoffen worden steeds schaarser. Iedereen moet zijn steentje bijdragen om tot een oplossing te komen. Warmtekrachtkoppeling is zo een mogelijke oplossing. Warmtekrachtkoppeling is het gelijktijdig opwekken van elektrische en thermische energie, uitgaande van dezelfde primaire energiebron. In tegenstelling tot de conventionele manier om elektrische en thermische energie op te wekken, waarbij elektrische energie in een centrale wordt opgewekt en getransporteerd wordt naar het gebouw en thermische energie (warmte) in een conventionele ketel wordt opgewekt. Op grote schaal (appartementengebouwen, ziekenhuizen, scholen, ...) heeft warmtekrachtkoppeling bewezen dat het naast ecologische voordelen, ook economisch een interessante investering is. Het installeren van een (dure) WKK-installatie verdient zichzelf terug binnen zijn totale levensduur op grote schaal. Op kleine schaal (residentiële woningen) is het een vrij recente technologie waar nog onvoldoende onderzoek naar gedaan is. Het doel van deze masterproef was om te onderzoeken of het installeren van een micro-warmtekrachtkoppelingsinstallatie een economisch interessante investering is voor een residentiële woning gelegen in Vlaanderen.

Een aantal technologieën zijn mogelijk om warmtekrachtkoppeling toe te passen. Klassieke zuigermotoren werken op basis van inwendige verbranding en zijn een erg rijpe technologie. Deze motoren halen hoge rendementen en hebben een lage investeringskost, maar stoten veel schadelijke emissies uit en hebben een hoog geluidsniveau. Brandstofcellen zijn een zeer beloftevolle technologie, maar zitten nog in de ontwikkelingsfase waardoor de cellen voorlopig nog te duur zijn. ORC-installaties en micro-turbines zijn nog twee andere technologieën die elk hun voor- en nadelen hebben. De technologie die echter de grootste kans heeft om commercieel door te breken zijn de Stirlingmotoren. In 2010 kwam WhisperGen met de eerste micro-WKK op de Vlaamse markt. Deze micro-WKK (WhisperGen

EU1) werkt op basis van een Stirlingmotor. Ook Viessmann en Remeha zijn bedrijven die binnenkort op de Vlaamse markt verwacht worden met een installatie op basis van een Stirlingmotor.

Een micro-WKK moet net als een conventionele ketel gedimensioneerd worden. Voor een conventionele ketel zijn er aantal vuistregels om te dimensioneren die er voor een micro-WKK niet zijn. Een foute dimensionering heeft ook grotere gevolgen voor een micro-WKK dan voor een conventionele ketel. Een micro-WKK wordt (bijna) altijd op de warmtevraag gedimensioneerd. Om correct te dimensioneren zijn er gegevens van de warmte- en elektriciteitsvraag per uur nodig. De VREG (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt) biedt zulke gegevens aan voor het gemiddelde van alle Vlaamse gezinnen. Als we deze gegevens analyseren, kunnen we twee jaarbelastingsduurcurves opstellen, één voor de warmtevraag en één voor de elektriciteitsvraag. Aangezien de micro-WKK op de warmtevraag gedimensioneerd worden, zoeken we de rechthoek met de grootste oppervlakte onder de jaarbelastingsduurcurve van de warmtevraag. Als we dit uitvoeren voor de gegevens van de VREG, zou de ideale installatie een basisvermogen (de Stirlingmotor) van 3,81 kW hebben en een hulpbrander van ongeveer 5 kW zodat de warmtepiek van 9 kW (die zich waarschijnlijk voordoet op een koude winteravond) opgevangen kan worden. Gemiddelde gegevens van alle Vlaamse gezinnen geven echter een vertekend beeld als het gaat om de warmtevraag van één enkele residentiële woning. Daarom hebben we de jaarbelastings-duurcurve aangepast zodat ze realistischer is voor één woning. De rechthoek die dan de grootste oppervlakte bezat, bevond zich rond een basisvermogen van 5 à 6 kW met een piekvermogen van ongeveer 13 kW. In de praktijk kan echter niet alleen rekening gehouden worden met de grootste rechthoek. Een aantal andere factoren zoals bijvoorbeeld de warmtekrachtverhouding en de op de markt beschikbare installaties spelen ook een belangrijke rol. In dit onderzoek werd gewerkt op basis van de WhisperGen EU1. Deze installatie bezit een Stirlingmotor met een warmtekracht-verhouding van 7:1. Dit houdt in dat per draaiuur 7 kW warmte kan opgewekt worden en tegelijkertijd 1 kW elektriciteit. De installatie heeft ook nog een hulpbrander die nog eens 7 kW warmte kan opwekken indien de

warmtevraag te hoog ligt. Deze installatie is op zich geen slechte keuze voor de jaarbelastingsduurcurve van de warmtevraag die we hebben opgesteld voor één residentiële woning.

Als we besloten hebben welke installatie gebruikt zal worden, is het tijd om te gaan kijken of het installeren van de micro-WKK een economisch interessante opportuniteit is. De installatie van de micro-WKK wordt vergeleken met het installeren van een conventionele ketel op hetzelfde moment. De kost van de conventionele ketel (€3.000) kunnen we dus aftrekken van de kostprijs van de micro-WKK (€15.000). Doordat de micro-WKK gelijktijdig warmte en elektriciteit opwekt, wordt er jaarlijks bespaard. Met behulp van enkele variabelen (warmte- en elektriciteitsrendement van de micro-WKK, rendement van de conventionele ketel, jaarlijkse warmte- en elektriciteitsvraag, discontovoet, opbrengst uit warmtekracht-certificaten, ...) konden we in Excel berekenen hoeveel er jaarlijks kan uitgespaard worden door een micro-WKK te installeren in plaats van een conventionele ketel. Bij het berekenen van de jaarlijkse kost werd ook rekening gehouden met het feit dat de energieprijzen jaarlijks stijgen. Naast een kostenbesparing zijn er ook rechtstreekse opbrengsten uit de installatie van een micro-WKK in de vorm van warmtekracht-certificaten. Per MWh primaire energie die uitgespaard wordt, ontvangt de eigenaar één certificaat dat vervolgens kan verkocht worden. Als we voor de gehele levensduur van 20 jaar berekenen hoeveel we jaarlijks uitsparen, kan de Netto Contante Waarde (discontovoet 4%) en het Intern Rendement berekend worden. Een residentiële woning met een jaarlijkse warmtevraag van 23.260 kWh en een jaarlijkse elektriciteitsvraag van 3.500 kWh die een micro-WKK installeert, kan de hoge investeringsprijs niet terugverdienen over de volledige levensduur. De NCW bedraagt - €3.616,27 en het IR bedraagt 0,37%. Het IR is echter wel positief, maar is niet hoger dan de discontovoet. De Terugverdientijd kan niet exact bepaald worden omdat de jaarlijkse kostenbesparing niet constant is, maar zal boven 30 jaar liggen. De installatie van een micro-WKK is dus geen economisch interessante investering. Een belangrijke opmerking die hierbij dient gemaakt te worden, is de afschaffing van de belastingsvermindering die ingegaan is op 1 januari 2012. Deze vermindering kon tot 40%

van de eenheidsprijs oplopen, neerkomend op €6.000. Deze afschaffing kan mogelijk een groot effect hebben op het al dan niet succesvol implementeren van micro-WKK op grote schaal in Vlaanderen. Verder onderzoek kan de gevolgen van deze afschaffing nagaan.

Zoals aangehaald, is de jaarlijkse kostenbesparing onvoldoende om de hoge kostprijs terug te verdienen. Een micro-WKK heeft echter wel heel wat ecologische voordelen, die zeer moeilijk in monetaire termen zijn uit te drukken. Door carbon emissiefactoren in rekening te brengen kan bepaald worden hoeveel kg CO₂ jaarlijks bespaard kan worden door een micro-WKK. De jaarlijkse absolute CO₂-besparing loopt op tot 1.200 kg en de relatieve CO₂-besparing bedraagt 18,41%.

We weten dan wel dat de NCW negatief is en het IR niet hoger dan de discontovoet is, maar welke variabelen spelen daarin nu een grote rol? Om dat te weten te komen, is een sensitiviteitsanalyse genoodzaakt. Deze sensitiviteitsanalyse werd uitgevoerd met behulp van een Monte Carlo-simulatie door het programma Crystal Ball van Oracle. Er werden twee verschillende simulaties uitgevoerd. In de eerste uniforme simulatie kregen alle variabelen dezelfde relatieve range van -10% en +10%. Door alle variabelen dezelfde relatieve range te geven, kunnen we nauwkeurig nagaan welke variabelen een belangrijke rol spelen. De belangrijkste was het rendement van de conventionele ketel, gevolgd door de twee rendementen (Q en E) van de micro-WKK. Ook de eenheidsprijs van de micro-WKK en de elektriciteitsprijs voor het Dc-profiel spelen een belangrijke rol. Door de simulatie 10.000 keren te herhalen behalen we een kans van één op tien om een positieve NCW te bekomen. In de tweede simulatie is er met meer realisme naar de verdelingen van de verschillende variabelen gekeken. Door vervolgens opnieuw de simulatie 10.000 keren te herhalen, steeg de kans tot één op drie om een positieve NCW te behalen. De gemiddelde NCW bedroeg in de tweede simulatie ook - €932,29, terwijl de gemiddelde NCW in het uniforme model nagenoeg hetzelfde was als de NCW van het basismodel (- €3.616,27). Een aantal andere variabelen speelden nu ook een belangrijkere rol door het wijzigen van de verdelingen. Twee variabelen spelen een hoofdrol in de contributie tot de variantie van zowel de NCW en het IR,

namelijk de eenheidsprijs van de micro-WKK en het elektrisch rendement van de micro-WKK. Naast deze twee variabelen speelt ook het rendement van de conventionele ketel een aanzienlijke rol. Hierna volgt een groot aantal variabelen die allen een kleinere, min of meer gelijkwaardige invloed uitoefenen op de variantie.

We moeten echter wel kritisch blijven. Door de verdelingen realistischer te maken verhogen we de kans op een positieve NCW, maar één op drie blijft te laag. Om van micro-WKK een economisch interessante investering te maken, is het essentieel dat deze kans stijgt. Deze kans kan, na het aanpassen van de verdelingen, enkel nog stijgen als de NCW van het basismodel stijgt. Een variabele waarmee we dit rechtstreeks kunnen bereiken is de eenheidsprijs van de micro-WKK. De verwachting is dat deze kostprijs de komende jaren door verbeterde kennis en technologie zal dalen. Ook schaalvoordelen, doordat micro-WKK op grotere schaal zal geproduceerd worden, zullen de prijs doen dalen. Ook de rendementen van de micro-WKK (E en Q) kunnen hierin een belangrijke rol spelen. Een verhoogd Q-rendement zorgt voor een lagere bruto warmtevraag, en bijgevolg een lagere jaarlijkse kost doordat er minder aardgas moet aangekocht worden. Een verhoogd E-rendement zorgt ervoor dat er minder extra elektriciteit moet aangekocht worden, en dus ook hier een lagere jaarlijkse kost. Andere belangrijke variabelen, zoals het rendement van de conventionele ketel, de elektriciteits- en aardgasprijs en de jaarlijkse prijsstijgingen zijn variabelen die buiten ons bereik liggen en die we dus niet kunnen aanpassen of verbeteren.

Literatuurlijst

- Aernouts, K., Jespers, K. en Vangeel, S. (2010). *Energiebalans Vlaanderen 2009: Voorlopige schatting*, Mol.
- Besluit van de Vlaamse Regering houdende algemene bepalingen over het energiebeleid van 19 november 2010.
- Cengel, Y.A., Dincer, I. en Kanoglu, M. (2008) *Exergy for better environment and sustainability*, Springer Science + Business Media.
- Cerga (December 2011) *De micro-warmtekrachtkoppeling. Een energiecentrale in huis*.
- Cetinkaya, E. en Lemmens, J. (2008) *Dimensionering van Micro-WKK voor residentiële gebouwen*, Katholieke Hogeschool Limburg.
- Cogen Energy (2004) *Warmtekracht Koppeling*.
- COGEN Vlaanderen vzw (2006) *Basishandboek Warmtekrachtkoppeling*, Leuven.
- COGEN Vlaanderen, opgevraagd op Oktober 2011, via:
<http://www.cogenvlaanderen.be>.
- CREG (December 2011) *Evolutie van de elektriciteitsprijzen op de residentiële markt*.
- Energiedecreet of Decreet houdende algemene bepalingen betreffende het energiebeleid van 8 mei 2009.

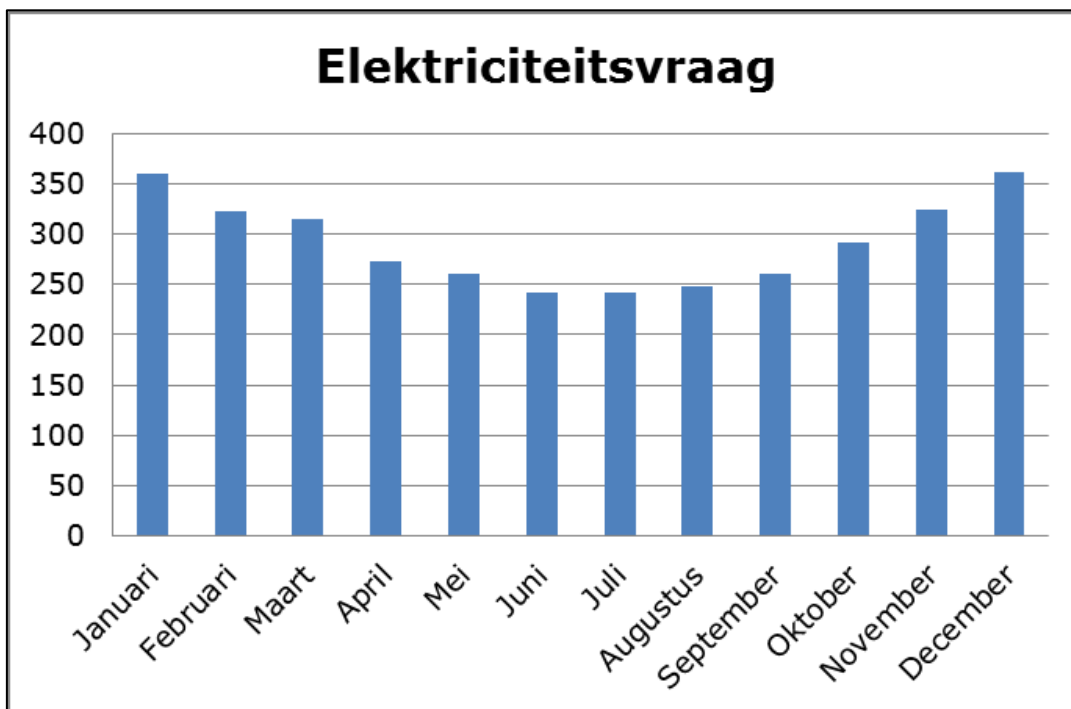
- Devogelaar, D. en Gusbin, D. (November 2011) *Energievooruitzichten voor België tegen 2030*, Federaal Planbureau.
- Dexters, A., *Hoe dimensioneert men een WKK?*, Geel.
- Dexters, A. en Six, D. (2009) *Oriënterende studie micro warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen*, VITO KHLim.
- FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, *Het gebouwenpark*, Opgevraagd op Februari 2012, via:
http://economie.fgov.be/nl/statistieken/cijfers/economie/bouw_industrie/gebouwenpark/.
- International Energy Agency (2011) *Key World Energy Statistics*, Parijs.
- Laveren et al. (2004) *Handboek financieel beheer*, Antwerpen, intersentia.
- Livios (29/09/2010) *Micro-warmtekrachtkoppeling: een elektriciteitscentrale met verwarming in je woning*, Opgevraagd op april 2011, via:
http://www.livios.be/nl/_build/_tech/_heat/10628.asp?content=Micro-warmtekrachtkoppeling:%20een%20elektriciteitscentrale%20met%20verwarming%20in%20je%20woning.
- Micro-WKK, Opgevraagd op September 2011, via: <http://www.microwkk.nl>.
- Oracle (2008). Oracle® Crystal Ball, Fusion Edition - User Manual.
- Stevens, T. (2010) *WKK voor ruimteverwarming Toepassingen in de woningbouw*, Leuven.

- Van den Bergh, K. (2009) *(Bio)WKK op uw landbouwbedrijf?*.
- van Heuveln, F. (2009) *Hoe voordelig is Micro-Warmte-Kracht-Koppeling?*, Groningen.
- Vlaamse Gemeenschap (2006) *Besluit van de Vlaamse Regering ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties*.
- VREG, Opgevraagd op September 2011, via: <http://www.vreg.be>.

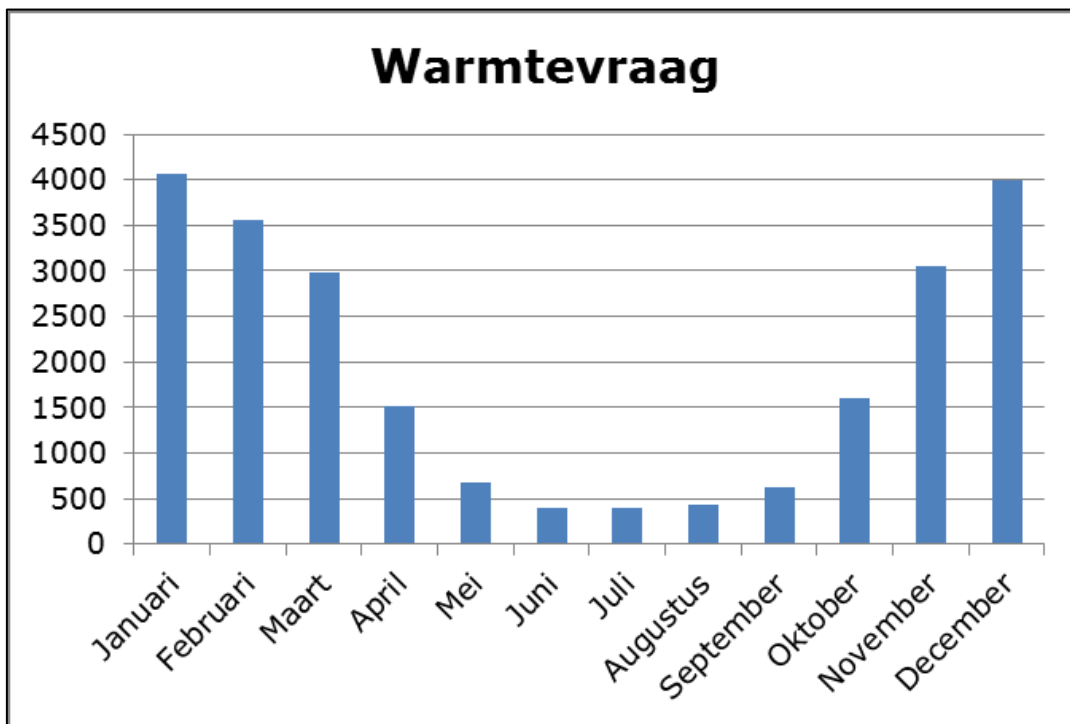
Bijlagen

Bijlage 1: Jaarlijkse elektriciteits- en warmtevraag per maand

Maand	Elektriciteitsvraag	Relatief verbruik
Januari	359,89	10,28%
Februari	322,13	9,20%
Maart	315,50	9,01%
April	272,99	7,80%
Mei	260,53	7,44%
Juni	242,02	6,91%
Juli	242,46	6,93%
Augustus	247,89	7,08%
September	260,18	7,43%
Oktober	291,25	8,32%
November	323,60	9,25%
December	361,36	10,32%
Som	3500	100,0%



Maand	Warmtevraag	Relatief verbruik
Januari	4059,60	17,45%
Februari	3554,21	15,28%
Maart	2979,33	12,81%
April	1519,09	6,53%
Mei	673,65	2,90%
Juni	392,00	1,69%
Juli	388,61	1,67%
Augustus	423,60	1,82%
September	616,50	2,65%
Oktober	1607,91	6,91%
November	3055,75	13,14%
December	3989,75	17,15%
Som	23260	100,0%



Bijlage 2: Berekening jaarlijkse elektriciteitsproductie

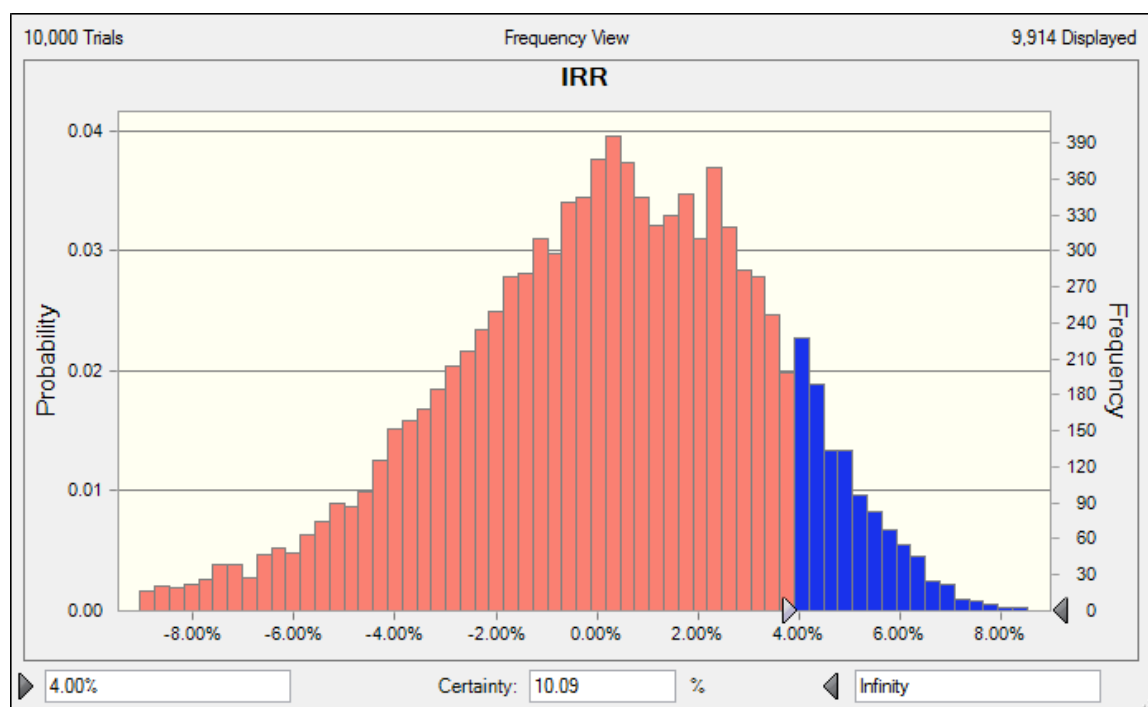
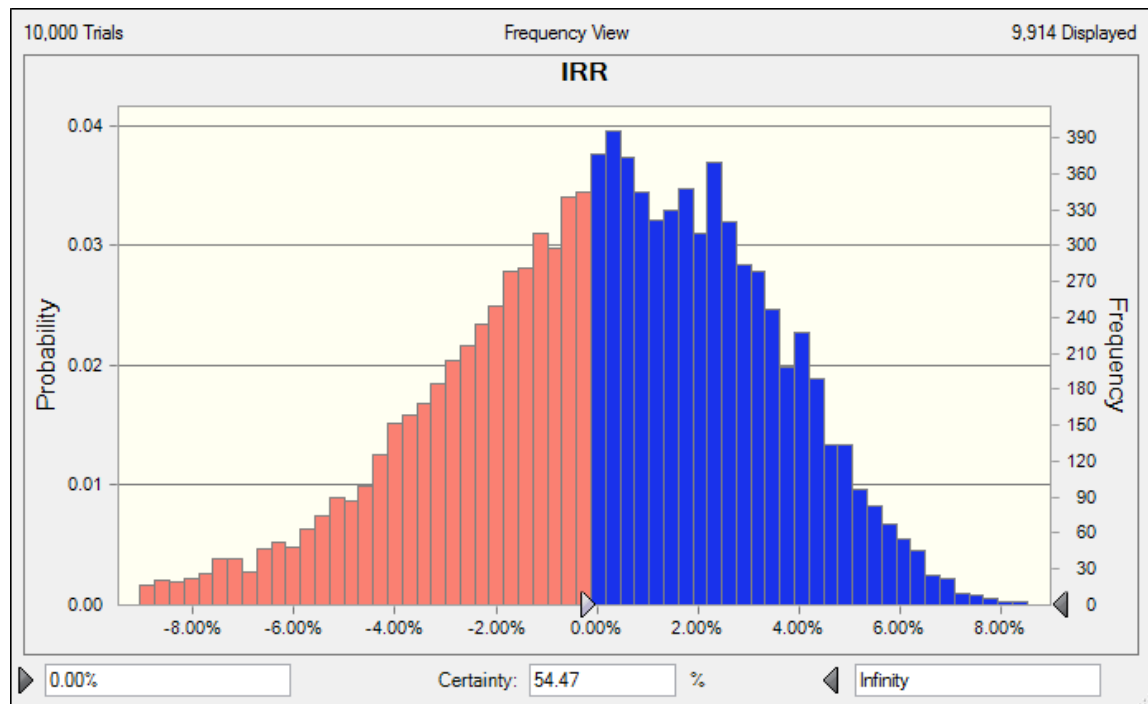
MAAND	Netto warmtevraag	Warmte-input WKK	Aantal draaiuren	Elektriciteitsproductie
Januari	4059,60	4625,80	462,58	463,51
Februari	3554,21	4049,92	404,99	405,80
Maart	2979,33	3394,87	339,49	340,17
April	1519,09	1730,96	216,37	173,44
Mei	673,65	767,60	95,95	76,91
Juni	392,00	446,68	55,83	44,76
Juli	388,61	442,81	55,35	44,37
Augustus	423,60	482,67	60,33	48,36
September	616,50	702,48	87,81	70,39
Oktober	1607,91	1832,17	229,02	183,58
November	3055,75	3481,94	348,19	348,89
December	3989,75	4546,20	454,62	455,53
TOTAAL	23260,00	26504,10	2810,54	2655,71

De blauwgemarkeerde maanden stellen de 'koude' maanden voor. Tijdens deze maanden produceert de micro-WKK gemiddeld 10 kW warmte. De roodgemarkeerde maanden zijn de overige 'warme' maanden in welke de WKK 8 kW warmte per draaiuur realiseert.

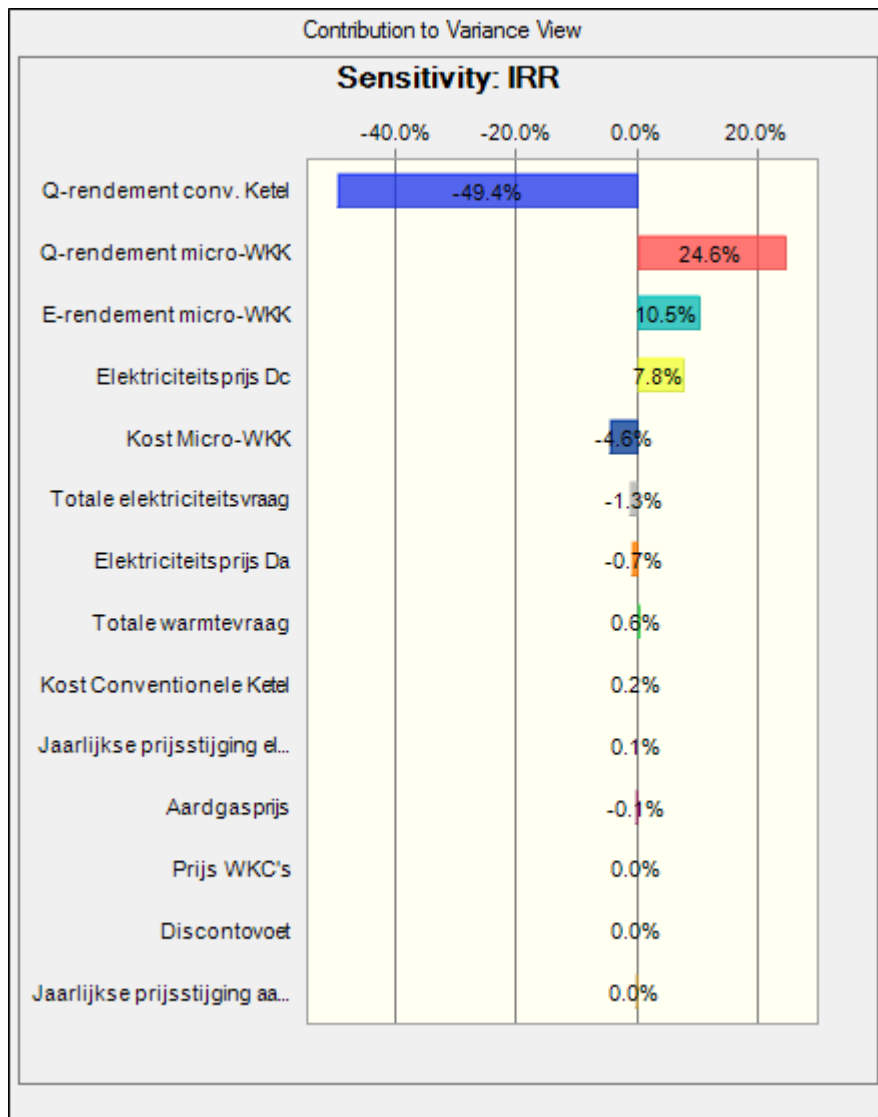
Bijlage 3: Fractie X warmtekrachtcertificaten

	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10	Jaar 11
Januari	0,9866	0,8259	0,6651	0,5044	0,3436	0,1829	0,0221
Februari	0,9732	0,8125	0,6517	0,4910	0,3302	0,1695	0,0087
Maart	0,9598	0,7991	0,6383	0,4776	0,3168	0,1561	-0,0046
April	0,9464	0,7857	0,6249	0,4642	0,3034	0,1427	-0,0180
Mei	0,9330	0,7723	0,6115	0,4508	0,2900	0,1293	-0,0314
Juni	0,9196	0,7589	0,5981	0,4374	0,2767	0,1159	-0,0448
Juli	0,9062	0,7455	0,5847	0,4240	0,2633	0,1025	-0,0582
Augustus	0,8928	0,7321	0,5714	0,4106	0,2499	0,0891	-0,0716
September	0,8794	0,7187	0,5580	0,3972	0,2365	0,0757	-0,0850
Oktober	0,8660	0,7053	0,5446	0,3838	0,2231	0,0623	-0,0984
November	0,8527	0,6919	0,5312	0,3704	0,2097	0,0489	-0,1118
December	0,8393	0,6785	0,5178	0,3570	0,1963	0,0355	-0,1252
Gemiddelde	0,9129	0,7522	0,5914	0,4307	0,2700	0,1092	-0,0515

Bijlage 4: Monte Carlo-simulatie IR Uniform model

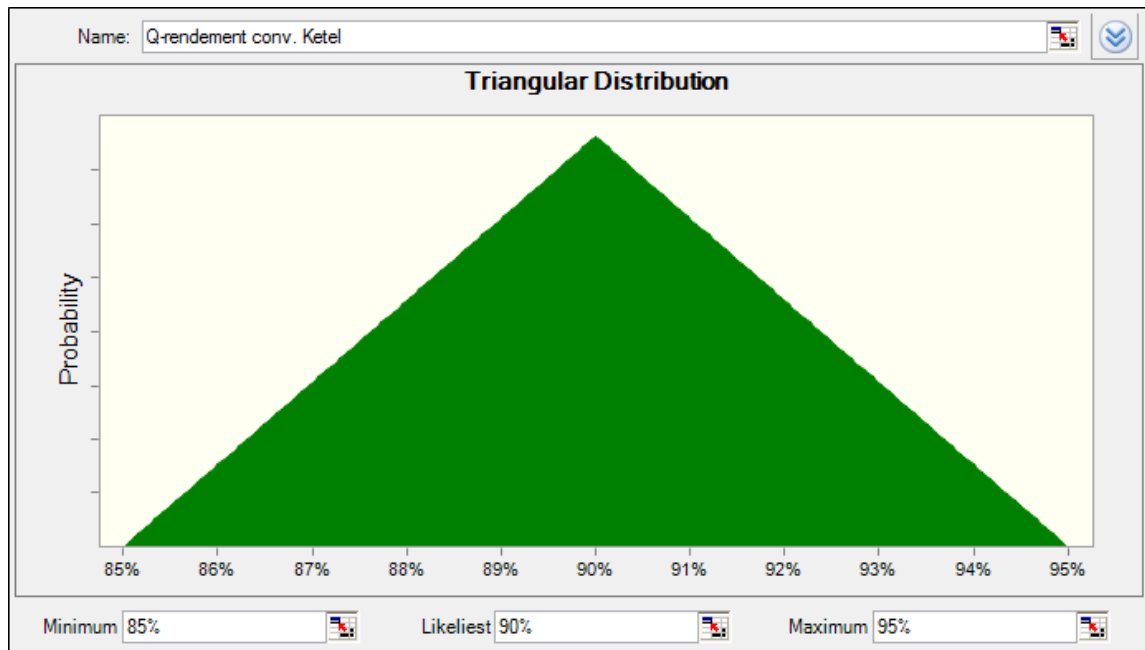


Bijlage 5: Invloed variabelen IR Uniform model

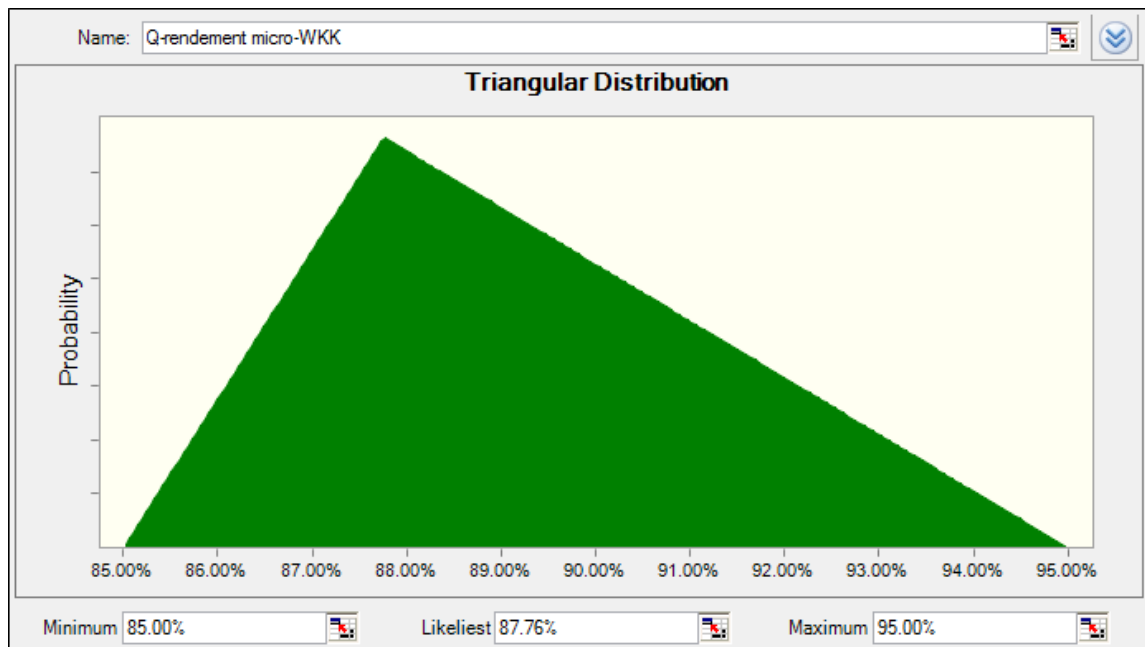


Bijlage 6: Verdeling variabelen Realistisch model

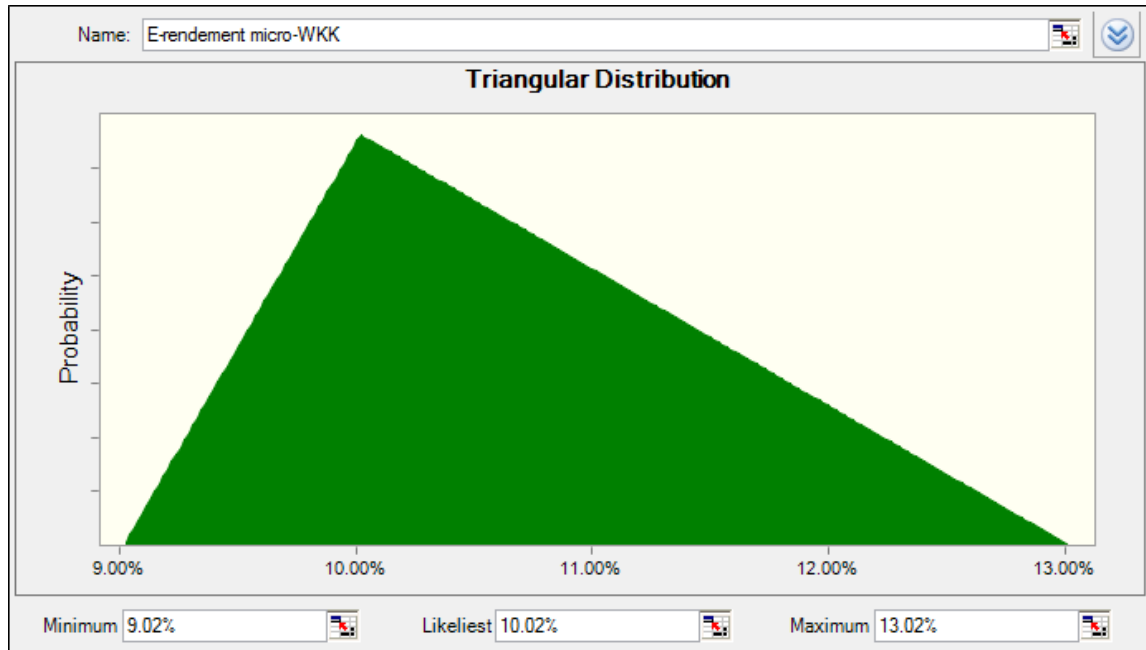
a) Q-rendement conventionele ketel



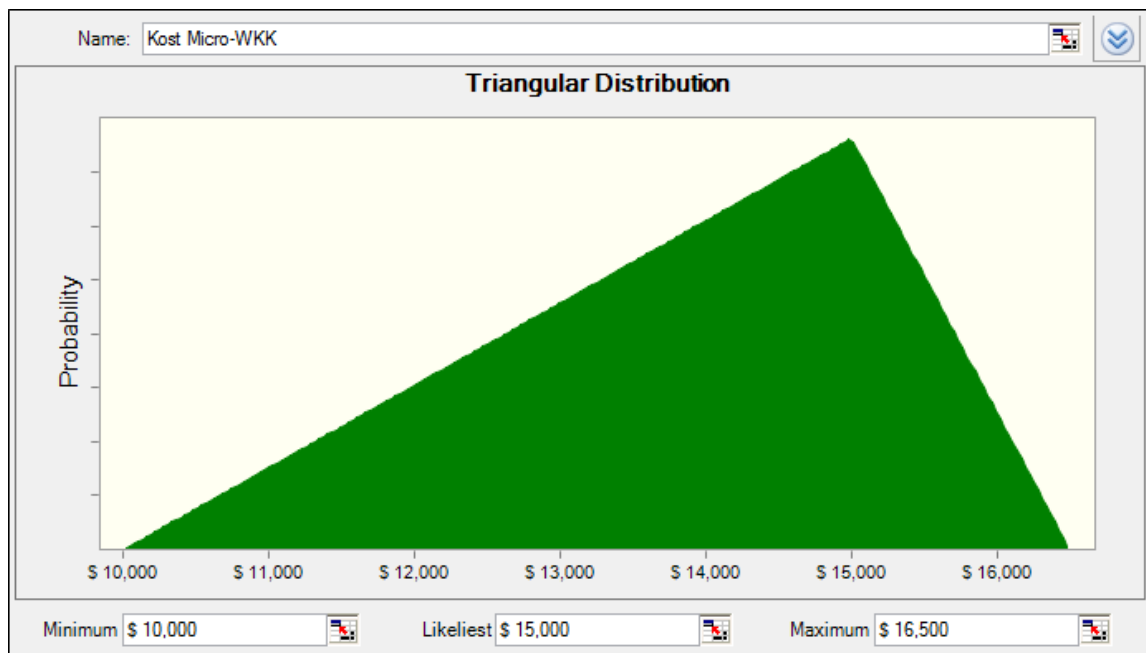
b) Q-rendement micro-WKK



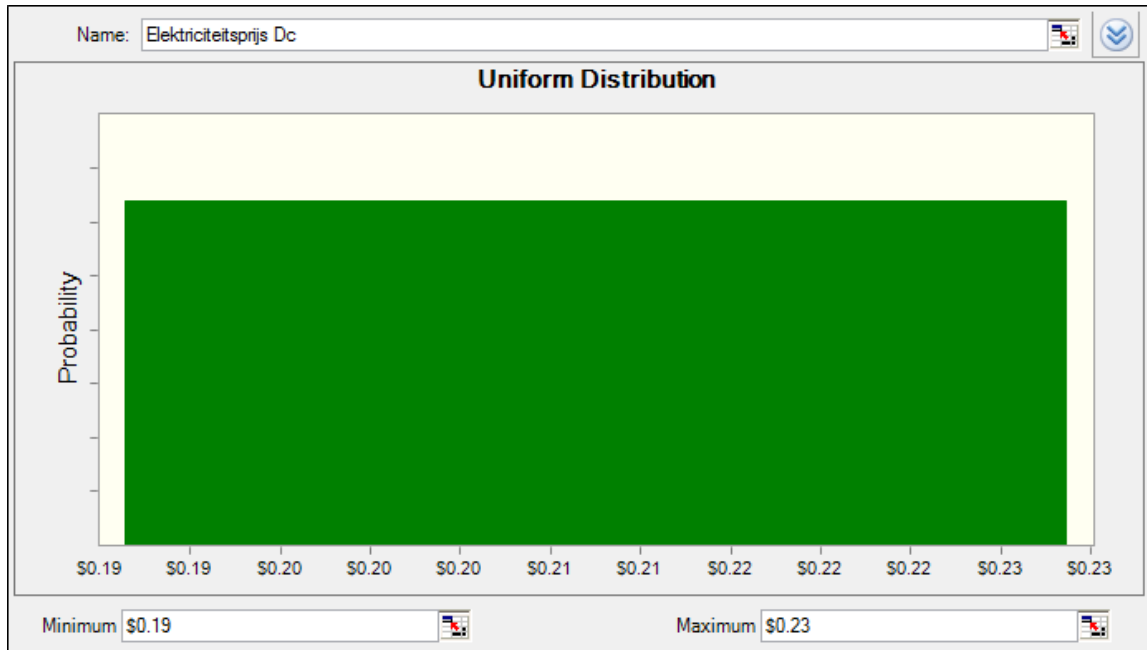
c) E-rendement micro-WKK



d) Kost Micro-WKK

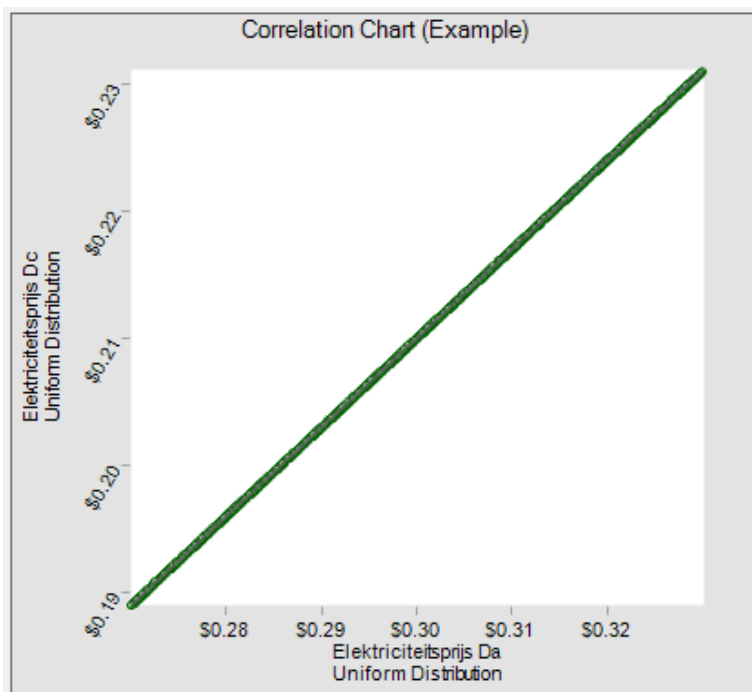


e) Elektriciteitsprijs Dc

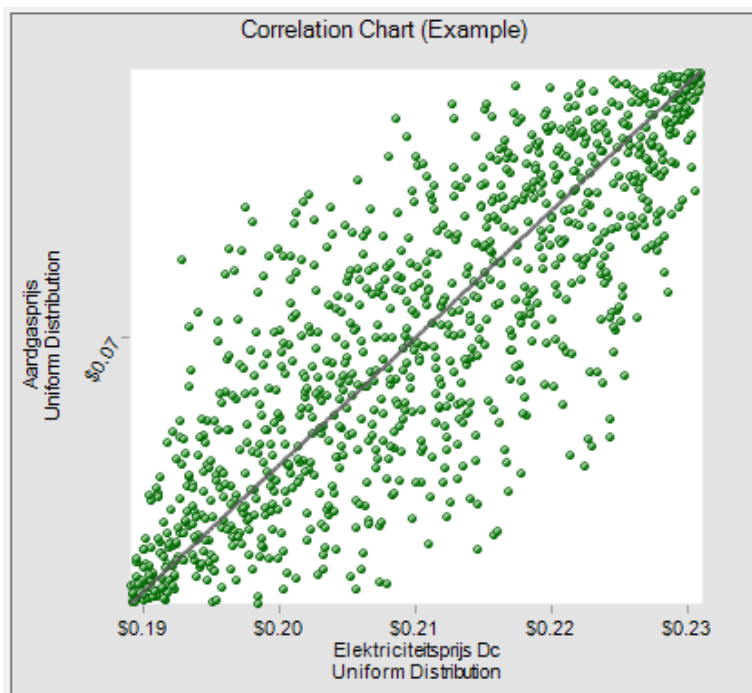


Bijlage 7: Correlaties Realistisch model

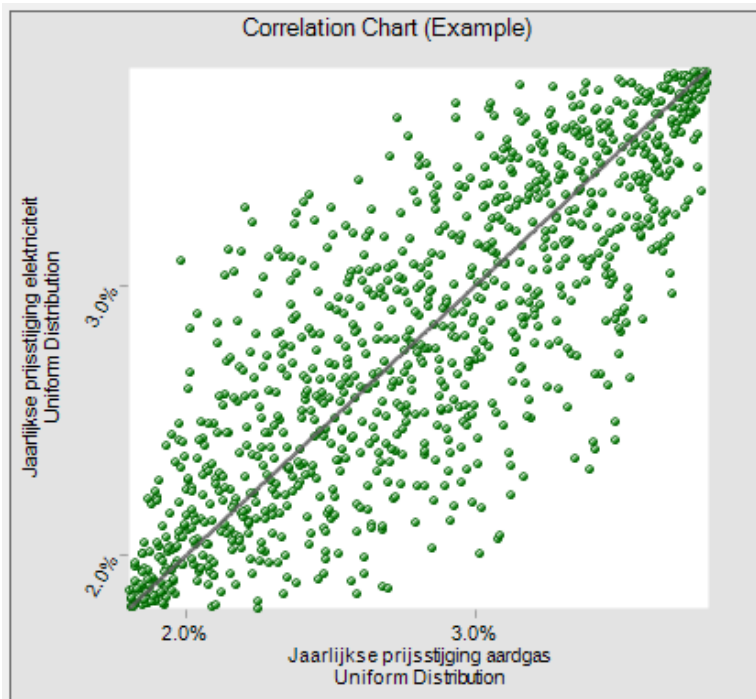
a) Correlatie tussen elektriciteitsprijs Da en elektriciteitsprijs Dc



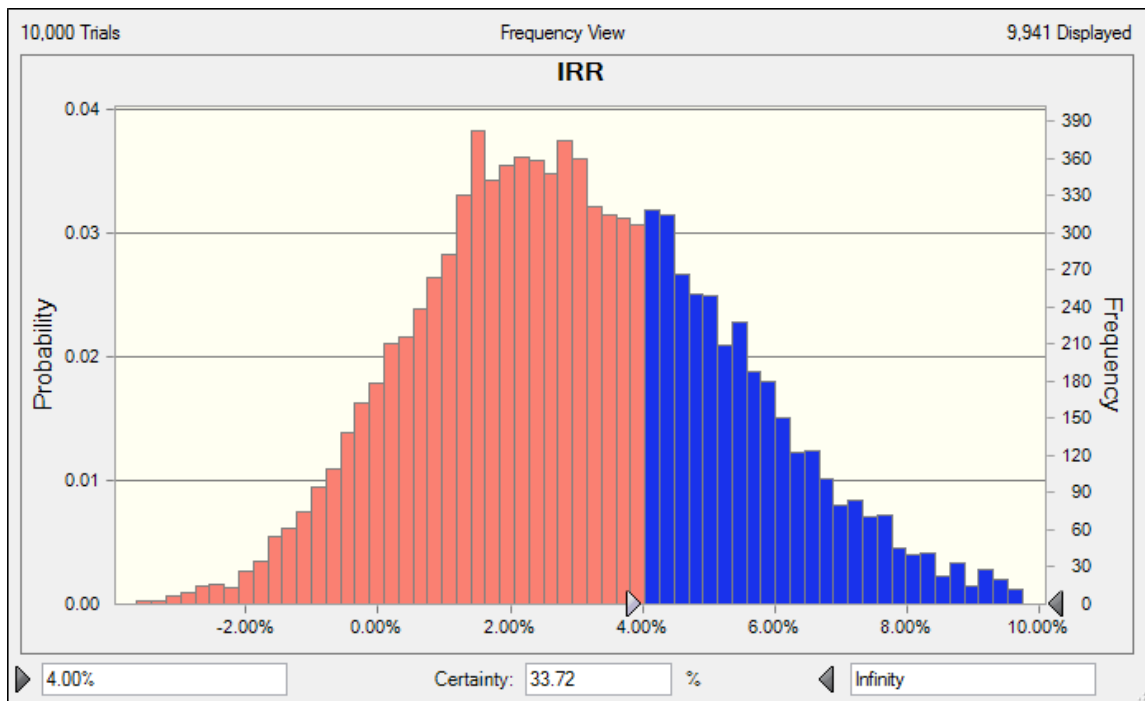
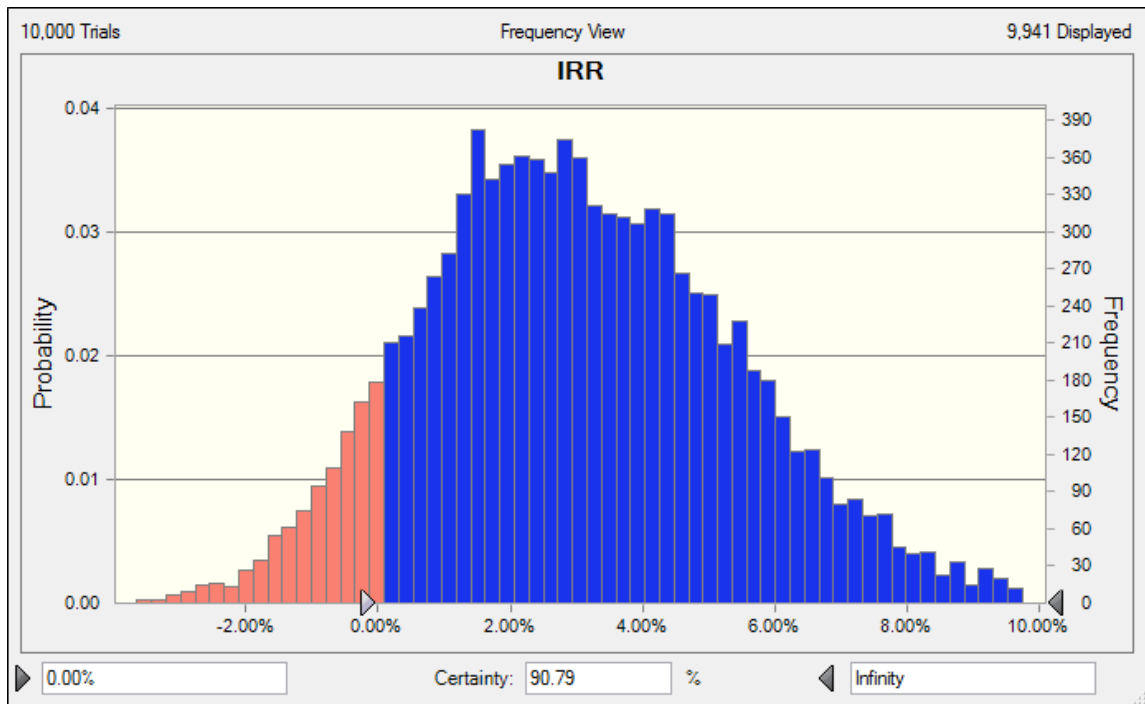
b) Correlatie tussen elektriciteitsprijs Dc en aardgasprijs



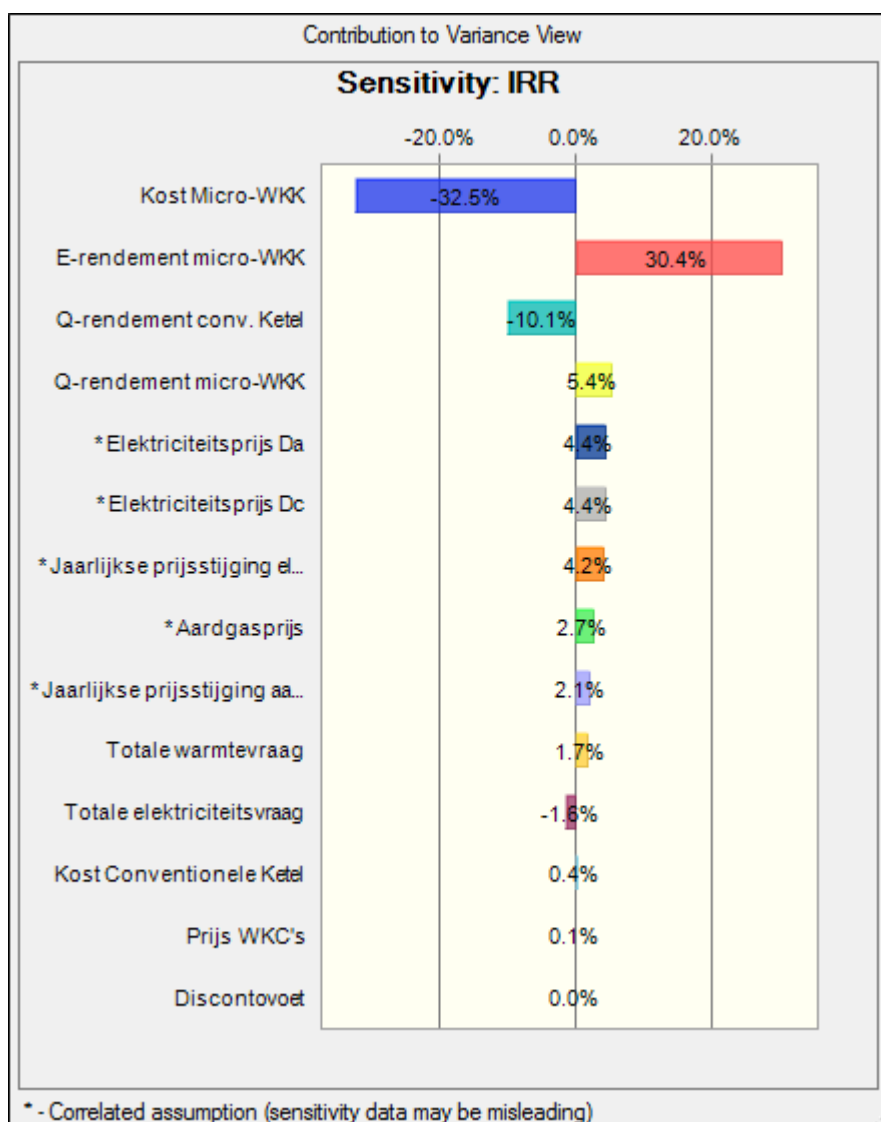
c) Correlatie jaarlijkse prijsstijgingen elektriciteit en aardgas



Bijlage 8: Monte Carlo-simulatie IR Realistisch model



Bijlage 9: Invloed variabelen IR Realistisch model



Auteursrechtelijke overeenkomst

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

De toepassing van micro-warmtekrachtkoppeling in woningen

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur-operationeel management en logistiek**

Jaar: **2012**

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.

Voor akkoord,

Henkens, Tim

Datum: **1/06/2012**