

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: technologie-, innovatie- en
milieumanagement*

2010
2011

Masterproef

*Het gebruik van pyrolyse-olie in warmtekrachtkoppeling,
een haalbare kaart in de Kempen? Drie gevalstudies:
zwembad, ziekenhuis en woon- en zorgcentrum*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Bea Faes

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie-
en milieumanagement*

universiteit
hasselt

UNIVERSITEIT VAN DE TOEKOMST

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE-3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE-3500 Hasselt

universiteit
hasselt

UNIVERSITEIT VAN DE TOEKOMST

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: technologie-, innovatie- en
milieumanagement*

Masterproef

*Het gebruik van pyrolyse-olie in warmtekrachtkoppeling,
een haalbare kaart in de Kempen? Drie gevalstudies:
zwembad, ziekenhuis en woon- en zorgcentrum*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Bea Faes

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie-
en milieumanagement*

WOORD VOORAF

Met deze masterproef rond ik mijn studie Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt af. Deze verhandeling sluit aan bij de problematiek van de vervuilde gronden in de Noorderkempen, waarbij onderzocht wordt of het mogelijk is om de biomassa die gebruikt wordt voor zuivering van de bodem, te gebruiken voor het opwekken van groene energie. Aangezien ik zelf afkomstig ben uit de Noorderkempen en een sterke interesse heb in technologie enerzijds en economie anderzijds, sprak het mij bijzonder aan om de haalbaarheid te onderzoeken van warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie in de Noorderkempen.

Voor de totstandkoming van deze masterproef heb ik hulp gekregen van verschillende mensen. In dit voorwoord zou ik dan ook graag iedereen willen bedanken voor de hulp en begeleiding. In de eerste plaats wil ik mijn promotor, professor dr. Theo Thewys bedanken om mij de mogelijkheid te bieden dit onderwerp te behandelen en voor de globale begeleiding. Een bijzonder woord van dank gaat uit naar mijn copromotor, Tom Kuppens, voor de deskundige uitleg, de bestede tijd, de opmerkingen, de verbeteringen en het herhaaldelijk nalezen van mijn werk.

Ook tot alle personen die op een of andere manier hebben bijgedragen tot het eindresultaat van deze verhandeling richt ik een woord van dank. Ik denk hierbij aan Leon Vanhulsel, hoofdredder in het stedelijk zwembad van Lommel, voor zijn deskundige uitleg over de energievoorzieningen van het zwembad. Verder wil ik graag Ludo Vander Mierde en Jo Van Den Broeck bedanken om mij de gegevens omtrent de energievraag van de gevalstudies ter beschikking te stellen. Ook aan Johan Ravijts richt ik een woord van dank voor het toetsen van de assumpties uit de economische modellen. De medewerkers van Bio-Oil ben ik dankbaar om me te ontvangen in hun pyrolyseplant in Tessenderlo.

Vervolgens wil graag mijn ouders oprecht bedanken om me in het leven alle kansen te geven, waaronder de mogelijkheid mijn studies Handelsingenieur aan te vatten. Mijn vrienden, kotgenoten en medestudenten hebben de afgelopen vijf jaar onvergetelijk gemaakt, dus ook aan hen een bijzonder woord van dank. Tot slot wil ik graag mijn vriend bedanken, omdat ik steeds op zijn onvoorwaardelijke steun en vertrouwen heb kunnen rekenen.

Bea Faes,
Mei 2011

SAMENVATTING

De Belgische en Nederlandse Kempen worden gekenmerkt door een historische vervuiling van zware metalen. In de meest vervuilde omtrek rond de fabrieken kan een beroep worden gedaan op klassieke saneringstechnieken, maar voor de wijdere omgeving is fyto-remediatie een goedkoop alternatief. In de Kempen wordt geëxperimenteerd met korteomloophout als fyto-remediërend gewas, omdat dit ten opzichte van andere gewassen een hoog extractiepotentieel heeft voor zware metalen. In hoofdstuk 2 worden de begrippen biomassa en korteomloophout verder uitgewerkt.

Fyto-remediatie levert dus biomassa op die zware metalen bevat en waarvoor een gepaste bestemming gezocht moet worden, waarbij de verontreiniging zich niet verder kan verspreiden. Een gepaste bestemming, die de kosten van fyto-remediatie gedeeltelijk kan recupereren, is de aanwending van de gewassen voor energiewinning: voor korteomloophout kan dit door verbranding, vergassing of pyrolyse. Bij verbranding en vergassing kunnen de metalen vervluchtigen naar de productgassen, waardoor specifieke rookgasreiniging vereist is. Doordat pyrolyse plaatsvindt bij lagere temperaturen, vervluchtigen de metalen niet en worden ze opgeconcentreerd in de asrest. Bovendien is op kleine schaal pyrolyse vanuit economisch standpunt meer aangewezen dan vergassing en verbranding. Daarom ligt in hoofdstuk 3 de focus op het pyrolyseproces.

In deze masterproef wordt de toepassingsmogelijkheid van pyrolyse-olie, het belangrijkste eindproduct van snelle pyrolyse, in een warmtekrachtkoppeling (WKK) onderzocht. Meer bepaald wordt nagegaan of en onder welke voorwaarden het economisch haalbaar is om een WKK op pyrolyse-olie te doen draaien. Voor drie specifieke gevalstudies wordt nagegaan of ze op een economisch rendabele manier kunnen investeren in een WKK-installatie: namelijk voor het stedelijk zwembad te Lommel, het Mariaziekenhuis Noord-Limburg te Overpelt en het woon- en zorgcentrum Hoevezavel te Lommel-Heeserbergen.

In hoofdstuk 4 worden de belangrijkste toepassingsmogelijkheden van pyrolyse-olie aangehaald: warmte- en/of elektriciteitsproductie, transportbrandstoffen en chemische toepassingen. In dit hoofdstuk ligt de focus op het gebruik van de olie voor warmte- en elektriciteitsopwekking. De problemen en oplossingen gerelateerd aan het gebruik van pyrolyse-olie in boilers, motoren en turbines worden er uiteengezet, aangezien deze technologieën ook bij warmtekrachtkoppeling worden gebruikt.

Warmtekrachtkoppeling betreft de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische) en nuttige thermische energie, uitgaande van eenzelfde primaire energiebron. Hierdoor wordt een hoger rendement behaald dan bij de traditionele, afzonderlijke opwekking van warmte en

elektriciteit. In hoofdstuk 5 wordt het principe van WKK verder uitgelegd, evenals de voordelen die eraan verbonden zijn. Ook worden in dit hoofdstuk de verschillende technologieën (turbines en inwendige verbrandingsmotoren) en hun toepassingsgebieden besproken.

Na de technische bespreking van pyrolyse en WKK, wordt in hoofdstuk 6 ingegaan op twee recente Europese Richtlijnen die in de context van WKK op pyrolyse-olie relevant zijn. In de eerste Richtlijn wordt een kader gecreëerd voor de bevordering en ontwikkeling van hoogrenderende WKK-installaties. In de tweede Richtlijn wordt een kader vastgesteld voor het bevorderen van energie uit hernieuwbare bronnen en worden bindende doelstellingen opgelegd aan alle lidstaten betreffende het aandeel hernieuwbare energiebronnen in hun energieverbruik.

Om de financiële haalbaarheid van een WKK die werkt op pyrolyse-olie te onderzoeken, dient een stappenplan gevolgd te worden. In hoofdstuk 7 wordt dit stappenplan uitgelegd, zodat het later bij de drie gevalstudies toegepast kan worden. De eerste fase betreft een analyse van de energievraag (zowel de warmte- als de elektriciteitsvraag) van de organisatie. In de tweede fase worden jaarbelastingduurcurves opgesteld, dit zijn curves die helpen om de installatie technisch te dimensioneren. Nadat de optimale dimensionering voor de gevalstudie bepaald is, kan in de derde fase de rendabiliteit onderzocht worden met de netto contante waarde methode, de interne rendementsvoet en de verdisconteerde terugverdientijd. In de laatste fase wordt tenslotte rekening gehouden met risico en onzekerheid, aangezien we met onzekere parameters en schattingen werken. In de laatste fase worden dan ook een sensitiviteitsanalyse en Monte Carlo analyse uitgevoerd.

De 3 gevalstudies betreffen 3 openbare gebouwen, die elk behoefte hebben aan een specifieke WKK, gedimensioneerd op hun energievraag. Nadat bepaald is welke grootte van installatie optimaal is voor de organisaties, wordt de economische haalbaarheid van de investering bepaald. Hiervoor worden de verschillende inkomsten en uitgaven van het project in rekening gebracht. Naast de investeringskosten die de investeerder initieel oploopt, brengt het project ook jaarlijkse exploitatiekosten met zich mee, zoals de onderhouds- en werkingskosten en de brandstofkosten. Hiertegenover staan de inkomsten onder de vorm van besparingen op de elektriciteitsfactuur en aardgas- of stookoliefactuur en de eventuele inkomsten uit de verkoop van geproduceerde elektriciteit aan het net. Ook de warmtekrachtcertificaten en groenestroomcertificaten vormen een belangrijke inkomstenpost. In de investeringsanalyse worden drie maatstaven gehanteerd om de rendabiliteit na te gaan: de netto contante waarde (NCW), de interne opbrengstvoet (IRR) en de verdisconteerde terugverdientijd (DPB). Uit de berekeningen van deze financiële parameters komt naar voren dat alle drie de organisaties op een rendabele manier kunnen investeren in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie.

Aangezien we in de economische analyse werken met onzekere parameters en schattingen, wordt ook voor elk van de gevalstudies rekening gehouden met onzekerheid en risico. In eerste instantie wordt een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd om te bepalen welke parameters een grote invloed hebben op de gevoeligheid van de NCW. Enkele belangrijke parameters blijken de aankoopprijs van de pyrolyse-olie, de aankoopprijs van elektriciteit en de investeringskosten. Daarnaast wordt voor alle gevalstudies een Monte Carlo simulatie uitgevoerd en een 95% betrouwbaarheidsinterval geconstrueerd voor de NCW. Dit 95% betrouwbaarheidsinterval bevat voor alle drie de gevalstudies enkel positieve waarden.

Daarnaast wordt nagegaan hoe afhankelijk het investeringsproject is van de overheidssubsidies. Voor alle gevalstudies wordt namelijk onderzocht wat er zou gebeuren met de NCW indien de warmtekrachtcertificaten en/of groenestroomcertificaten zouden wegvallen. Indien de warmtekrachtcertificaten wegvallen, maar de groenestroomcertificaten blijven bestaan, is het investeringsproject voor de gevalstudies nog net haalbaar. Indien de groenestroomcertificaten (waarvan de verkoopwaarde ongeveer drie maal hoger is dan die van de warmtekrachtcertificaten) wegvallen, blijkt een investering in WKK met pyrolyse-olie voor geen enkele organisatie nog rendabel. Het bestaan van het certificatenstelsel is dus van groot belang opdat een investering in een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie haalbaar is.

Tot slot wordt een terugkoppeling gemaakt naar het fyto-remediatieproject. Meer bepaald wordt nagegaan hoeveel de maximumprijs van de pyrolyse-olie mag bedragen opdat de NCW van het investeringsproject groter is dan 0. Voor de 3 gevalstudies blijkt de maximumprijs rond de 12 à 14 € per GJ te schommelen. Daarnaast wordt ook berekend hoeveel hectare grond in het fyto-remediatieproject nodig is voor de aanplanting van korteomloophout om genoeg pyrolyse-olie te produceren. In totaal is ongeveer 376 tot 526 hectare grond nodig voor de 3 gevalstudies. Dit is zo'n 10 à 15% van de totale beschikbare landbouwgrond (±3400 hectare) voor fyto-remediatie.

INHOUDSOPGAVE

WOORD VOORAF	i
SAMENVATTING	iii
INHOUDSOPGAVE	vii
FIGURENLIJST	xi
TABELLENLIJST	xiii
HOOFDSTUK 1: PROBLEEMSTELLING	1
1.1 SITUERING PRAKTIJKPROBLEEM	1
1.2 CENTRALE ONDERZOEKSVRAAG	2
1.3 DEELVRAGEN	3
1.4 OPBOUW MASTERPROEF	3
HOOFDSTUK 2: BIOMASSA EN KORTEOMLOOPHOUT	5
2.1 DEFINITIE BIOMASSA	5
2.2 INDELING BIOMASSA	6
2.3 ENERGIETEELTEN	6
2.4 VOORBEHANDELING VAN KORTEOMLOOPHOUT	9
HOOFDSTUK 3: PYROLYSE	11
3.1 THERMOCHEMISCHE CONVERSIEMETHODEN	11
3.2 WAT IS PYROLYSE?	13
3.3 HET PYROLYSE PROCES	15
3.4 VERSCHILLENDE TYPES REACTORCONFIGURATIES	16
3.5 SCHEIDING VAN DE CHAR	21
3.6 VERZAMELING PYROLYSE-OLIE	21
HOOFDSTUK 4: PYROLYSE-OLIE	23
4.1 EIGENSCHAPPEN PYROLYSE OLIE	23
4.2 TOEPASSINGEN PYROLYSE-OLIE	26

HOOFDSTUK 5: WARMTEKRACHTKOPPELING	35
5.1 HET BEGRIP ENERGIE: WARMTE EN ELEKTRICITEIT.....	35
5.2 CONVENTIONELE ENERGIEVOORZIENING.....	35
5.3 DEFINITIE WARMTEKRACHTKOPPELING	36
5.4 VOORBEELD BESPARING PRIMAIRE ENERGIE BIJ WKK.....	37
5.5 VOORDELEN WARMTEKRACHTKOPPELING	39
5.6 TECHNOLOGIEËN WARMTEKRACHTKOPPELING	40
HOOFDSTUK 6: EUROPESE RICHTLIJNEN EN HET VLAAMSE ENERGIEBELEID	49
6.1 EU-RICHTLIJN 2004/8/EG: WARMTEKRACHTKOPPELING	49
6.2 EU-RICHTLIJN 2009/28/EG: HERNIEUWBARE BRONNEN.....	50
HOOFDSTUK 7: AANPAK HAALBAARHEIDSSTUDIE.....	53
7.1 FASE 1: ANALYSE ENERGIEVRAAG.....	54
7.2 FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES	54
7.3 FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE.....	58
7.4 FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID	75
HOOFDSTUK 8: GEVALSTUDIE ZWEMBAD	79
8.1 BESCHRIJVING GEVALSTUDIE.....	79
8.2 FASE 1: ANALYSE VAN DE ENERGIEVRAAG	80
8.3 FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES	86
8.4 FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE.....	97
8.5 FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID	114
8.6 TERUGKOPPELING NAAR FYTOREMEDIATIEPROJECT	121
HOOFDSTUK 9: GEVALSTUDIE ZIEKENHUIS	123
9.1 BESCHRIJVING GEVALSTUDIE.....	123
9.2 FASE 1: ANALYSE VAN DE ENERGIEVRAAG	124
9.3 FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES	127
9.4 FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE.....	133

9.5	FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID	149
9.6	TERUGKOPPELING NAAR FYTOREMEDIATIEPROJECT	156
HOOFDSTUK 10: GEVALSTUDIE WOON- EN ZORGCENTRUM		159
10.1	BESCHRIJVING GEVALSTUDIE	159
10.2	FASE 1: ANALYSE VAN DE ENERGIEVRAAG	159
10.3	FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES	162
10.4	FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE.....	170
10.5	FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID	186
10.6	TERUGKOPPELING NAAR FYTOREMEDIATIEPROJECT	194
HOOFDSTUK 11: CONCLUSIES EN DISCUSSIE		197
11.1	TECHNOLOGISCHE ASPECTEN PYROLYSE EN WKK	197
11.2	ONDERZOEK GEVALSTUDIES	197
11.3	DISCUSSIE	202
BIJLAGEN		205
BRONNEN.....		221

FIGURENLIJST

Figuur 1: Structuur technologische luik	4
Figuur 2: Onderscheid thermochemische conversiemethoden in functie van λ	11
Figuur 3: Indeling pyrolyseproducten	13
Figuur 4: Opbrengst aan pyrolyse-olie, gas en char in functie van de temperatuur	14
Figuur 5: Snel pyrolyseproces	16
Figuur 6: Bubbelend wervelbed pyrolyseproces en circulerend wervelbed pyrolyseproces	18
Figuur 7: Principe roterende conusreactor	20
Figuur 8: Toepassingen pyrolyse-olie	26
Figuur 9: Principe WKK	36
Figuur 10: Gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit.....	38
Figuur 11: Ideale situatie WKK: gezamenlijke opwekking van elektriciteit en warmte.....	38
Figuur 12: Praktijksituatie WKK: combinatie WKK en gescheiden opwekking.....	39
Figuur 13: Werking stoomturbine	41
Figuur 14: Werking gasturbine.....	43
Figuur 15: Werking gecombineerde stoom- en gasturbine	44
Figuur 16: Werking warmteterugwinning zuigermotor	45
Figuur 17: Verwachte productie van groene stroom uit hernieuwbare energie in 2020 (GWh)	51
Figuur 18: Verwachte productie van groene warmte uit hernieuwbare energie in 2020 (ktoe)	52
Figuur 19: Structuur van een haalbaarheidsstudie	53
Figuur 20: Voorbeeld jaarpatroon warmtevraag	55
Figuur 21: Jaarbelastingduurcurve.....	56
Figuur 22: Jaarbelastingduurcurve met aanduidingen	57
Figuur 23: Verschillende WKK-technologieën met hun toepassingsgebieden.....	58
Figuur 24: Vlaams certificatenstelsel.....	63
Figuur 25: Schematisch overzicht berekening groenestroomcertificaten	69
Figuur 26: Groot zwembad (links) en doucheruimte (rechts).....	79
Figuur 27: Uitsplitsing diverse warmtevragers.....	81
Figuur 28: Gasverbruik (m^3) stedelijk zwembad.....	82
Figuur 29: Warmtebehoefte (kWh) zwembad	84
Figuur 30: Uitsplitsing verbruiksposten elektriciteit.....	85
Figuur 31: Elektriciteitsverbruik (kWh) stedelijk zwembad	86
Figuur 32: Thermische jaarbelastingduurcurve zwembad.....	87
Figuur 33: Thermische productiecurve zwembad	88
Figuur 34: Thermische jaarbelastingduurcurve zwembad met aanduiding optimale installatie	89
Figuur 35: Thermische jaarbelastingduurcurve zwembad met aanduiding oppervlaktes	90
Figuur 36: Elektrische jaarbelastingduurcurve zwembad.....	92

Figuur 37: Elektrische productiecurve zwembad	93
Figuur 38: Elektrische jaarbelastingduurcurve zwembad met aanduiding optimale installatie	94
Figuur 39: Verschillende WKK-technologieën met hun toepassingsgebieden.....	95
Figuur 40: Resultaten sensitiviteitsanalyse Tornado diagram (zwembad).....	115
Figuur 41: Kansverdeling NCW.....	120
Figuur 42: Overzicht inputgegevens voor pyrolyse en WKK (zwembad)	122
Figuur 43: Luchtfoto Mariaziekenhuis	123
Figuur 44: Logo Mariaziekenhuis	124
Figuur 45: Thermische jaarbelastingduurcurve ziekenhuis	128
Figuur 46: Thermische productiecurve ziekenhuis.....	129
Figuur 47: Thermische jaarbelastingduurcurve ziekenhuis met aanduiding optimale installatie ...	130
Figuur 48: Verschillende WKK-technologieën met hun toepassingsgebieden.....	131
Figuur 49: Resultaten sensitiviteitsanalyse Tornado diagram (ziekenhuis)	151
Figuur 50: Kansverdeling NCW.....	155
Figuur 51: Overzicht inputgegevens voor pyrolyse en WKK (ziekenhuis)	157
Figuur 52: Verbruiksprofielen zorgsector (COGENcalc)	163
Figuur 53: Thermische jaarbelastingduurcurve woon- en zorgcentrum	165
Figuur 54: Thermische productiecurve woon- en zorgcentrum.....	166
Figuur 55: Thermische JBDC woon- en zorgcentrum met aanduiding optimale installatie	167
Figuur 56: Verschillende WKK technologieën met hun toepassingsgebieden	169
Figuur 57: Resultaten sensitiviteitsanalyse Tornado diagram (woon- en zorgcentrum)	188
Figuur 58: Kansverdeling NCW.....	192
Figuur 59: Overzicht inputgegevens voor pyrolyse en WKK (woon- en zorgcentrum)	194

TABELLENLIJST

Tabel 1: Soorten pyrolysereactoren en hun locaties.....	17
Tabel 2: Chemische samenstelling van pyrolyse-olie.....	23
Tabel 3: Fysische eigenschappen en elementaire analyse van pyrolyse-olie uit hout	24
Tabel 4: Vergelijking van pyrolyse-olie en conventionele brandstofeigenschappen	27
Tabel 5: Problemen gerelateerd aan het gebruik van pyrolyse-olie in boilers, motoren en turbines	29
Tabel 6: Investeringskosten.....	59
Tabel 7: Jaarlijks quotum certificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers	66
Tabel 8: Verhandelde warmtekrachtcertificaten en eenheidsprijs per inleveringsronde	67
Tabel 9: Jaarlijks quotum certificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers	70
Tabel 10: Overzicht minimumprijzen per technologie Elia	71
Tabel 11: Overzicht minimumprijzen per technologie distributienetbeheerder	71
Tabel 12: Verhandelde groenestroomcertificaten en eenheidsprijs per periode	72
Tabel 13: Afmetingen zwembaden.....	80
Tabel 14: Klimatologische condities	80
Tabel 15: Calorische bovenwaarden van aardgas aan het GOS Lommel.....	83
Tabel 16: Kenmerken warmtekrachtinstallatie zwembad	96
Tabel 17: Warmte- en elektriciteitsproductie WKK-installatie zwembad	97
Tabel 18: Investeringskosten WKK-installatie zwembad	99
Tabel 19: Onderhouds- en uitbatingskosten zwembad.....	100
Tabel 20: Besparingen energierekening zwembad	102
Tabel 21: Rendementen voor berekening RPEB zwembad	104
Tabel 22: Gegevens berekening absolute PEB zwembad	105
Tabel 23: Bepaling jaarlijks aantal warmtekrachtcertificaten en hun opbrengsten (zwembad) ...	106
Tabel 24: Overzicht uitgaande cashflows zwembad.....	109
Tabel 25: Overzicht inkomende cashflows zwembad	109
Tabel 26: Overzicht netto cashflows zwembad	110
Tabel 27: Jaarlijkse afschrijvingen onder DDB zwembad	111
Tabel 28: Berekening verdisconteerde netto cashflows na belastingen zwembad	112
Tabel 29: Samenvatting verdisconteerde netto cashflows en NCW zwembad.....	113
Tabel 30: Bepaling verdisconteerde terugverdientijd zwembad.....	114
Tabel 31: Onzekere parameters en hun verdeling.....	118
Tabel 32: Belang groenestroom- en warmtekrachtcertificaten (zwembad)	121
Tabel 33: Bepaling warmtebehoefte ziekenhuis	125
Tabel 34: Overzicht maandelijkse elektriciteitsbehoefte ziekenhuis	126
Tabel 35: Kenmerken warmtekrachtinstallatie ziekenhuis	132
Tabel 36: Warmte- en elektriciteitsproductie WKK-installatie ziekenhuis.....	133
Tabel 37: Investeringskosten WKK-installatie ziekenhuis	135

Tabel 38: Jaarlijkse onderhouds- en uitbatingskosten ziekenhuis.....	136
Tabel 39: Besparingen energierekening ziekenhuis.....	138
Tabel 40: Rendementen voor berekening RPEB ziekenhuis	140
Tabel 41: Gegevens berekening absolute PEB ziekenhuis	140
Tabel 42: Bepaling jaarlijks aantal warmtekrachtcertificaten en hun opbrengsten (ziekenhuis)...	141
Tabel 43: Overzicht jaarlijkse uitgaande cashflows ziekenhuis.....	144
Tabel 44: Overzicht jaarlijkse inkomende cashflows ziekenhuis	145
Tabel 45: Overzicht jaarlijkse netto cashflows ziekenhuis	145
Tabel 46: Overzicht jaarlijkse afschrijvingen onder DDB ziekenhuis	146
Tabel 47: Berekening verdisconteerde netto cashflows na belastingen (ziekenhuis)	147
Tabel 48: Samenvatting verdisconteerde netto cashflows en NCW ziekenhuis	148
Tabel 49: Verdisconteerde terugverdientijd ziekenhuis.....	149
Tabel 50: Onzekere parameters en hun verdeling.....	154
Tabel 51: Belang groenestroom- en warmtekrachtcertificaten (ziekenhuis).....	156
Tabel 52: Berekening jaarlijkse warmtebehoefte woon- en zorgcentrum.....	161
Tabel 53: Overzicht maandelijkse elektriciteitsbehoefte woon- en zorgcentrum.....	161
Tabel 54: Spreiding warmtebehoefte in de tijd	164
Tabel 55: Kenmerken warmtekrachtinstallatie woon- en zorgcentrum	169
Tabel 56: Warmte- en elektriciteitsproductie WKK-installatie woon- en zorgcentrum.....	170
Tabel 57: Investeringskosten WKK-installatie woon- en zorgcentrum.....	172
Tabel 58: Jaarlijkse onderhouds- en uitbatingskosten woon- en zorgcentrum.....	173
Tabel 59: Besparingen energierekening woon- en zorgcentrum.....	176
Tabel 60: Rendementen voor berekening RPEB woon- en zorgcentrum	177
Tabel 61: Gegevens berekening absolute PEB woon- en zorgcentrum	178
Tabel 62: Bepaling jaarlijks aantal WKC en hun opbrengsten (woon- en zorgcentrum)	179
Tabel 63: Overzicht jaarlijkse uitgaande cashflows woon- en zorgcentrum.....	181
Tabel 64: Overzicht jaarlijkse inkomende cashflows woon- en zorgcentrum	182
Tabel 65: Overzicht jaarlijkse netto cashflows woon- en zorgcentrum	182
Tabel 66: Berekening verdisconteerde netto cashflows na belastingen woon- en zorgcentrum....	183
Tabel 67: Samenvatting verdisconteerde netto cashflows en NCW woon- en zorgcentrum	185
Tabel 68: Bepaling verdisconteerde terugverdientijd woon- en zorgcentrum	186
Tabel 69: Onzekere parameters en hun verdeling.....	191
Tabel 70: Belang groenestroom- en warmtekrachtcertificaten (woon- en zorgcentrum).....	193
Tabel 71: Overzicht keuze installaties	198
Tabel 72: Overzicht financiële parameters	198
Tabel 73: Overzicht sensitiviteitsanalyse	199
Tabel 74: Overzicht betrouwbaarheidsintervallen NCW	200
Tabel 75: Overzicht belang certificaten voor de NCW	201
Tabel 76: Overzicht terugkoppeling fyto-remediatieproject	202

HOOFDSTUK 1: PROBLEEMSTELLING

1.1 SITUERING PRAKTIJKPROBLEEM

De zinkfabrieken in de Noorderkempen hebben vanaf het einde van de 19^e eeuw tot in de jaren 70 van de 20^e eeuw heel wat zware metalen in het milieu gebracht. Niet enkel bij het productieproces kwamen zware metalen terecht in de omgeving, ook de restproducten van dit productieproces werden gebruikt voor onder andere de aanleg van opritten, wegen en speelplaatsen en het ophogen van percelen. Deze zware metalen kunnen niet afgebroken worden in het leefmilieu. De historische verontreiniging is dus nog steeds aanwezig en kan nog altijd invloed uitoefenen op mens en natuur (Vlaams Agentschap Zorg en Gezondheid, 2010). De jarenlange activiteiten van de non-ferro industrie hebben de bodem bijvoorbeeld zodanig vervuild, dat dit bepaalde risico's met zich meebrengt voor de teelten van landbouwers.

Om de bodemverontreiniging op te lossen, kan in de meest vervuilde omtrek rond de fabrieken een beroep worden gedaan op klassieke saneringstechnieken, zoals het afgraven van vervuilde aarde. Voor de sanering van de bredere omgeving zijn klassieke saneringstechnieken geen optie, omdat de omvang van het verontreinigde gebied te groot is en er bovendien slechts sprake is van matige verontreiniging. De klassieke saneringstechnieken zijn dan meestal te duur, te arbeidsintensief of vereisen herstel van de site (Glick, 2003). Een mogelijke oplossing voor de matige bodemvervuiling in de bredere omgeving kan gevonden worden in fyto-remediatie, een saneringstechniek die gebruik maakt van planten voor het verwijderen van zware metalen of organische contaminanten in de bodem en het grondwater (Glick, 2003). Zo wordt in de Noorderkempen geëxperimenteerd met wilgen om zware metalen uit de bodem op te nemen. Deze wilgen onttrekken de pollutanten aan de grond en nemen ze op in hun biomassa. Fyto-remediatie levert dus biomassa op die zware metalen bevat en waarvoor een gepaste bestemming gezocht moet worden, waarbij de verontreiniging zich niet verder kan verspreiden.

Een gepaste bestemming, die de kosten van fyto-remediatie gedeeltelijk kan recupereren, is de aanwending van de gewassen voor energiewinning. Op deze manier wordt de sanering gecombineerd met een economische activiteit, aangezien de geproduceerde biomassa dankzij energiewinning gevaloriseerd kan worden. In de literatuur (A. V. Bridgwater, Toft, & Brammer, 2002) wordt aangegeven dat kortomloophout met behulp van verschillende technieken, namelijk verbranding, vergassing en pyrolyse, omgezet kan worden in energie. Verbranding is de meest toegepaste conversietechnologie van biomassa, waarbij de opgewekte warmte en/of elektriciteit ter plaatse opgewekt en afgezet moet worden. Bij vergassing wordt de biomassa eerst omgezet in een stookgas, dat vervolgens gebruikt kan worden voor elektriciteits- en/of warmteproductie. Er is hier geen ontkoppeling mogelijk van de conversie van biomassa naar stookgas en energieopwekking.

Dit in tegenstelling tot pyrolyse, waarbij de biomassa wordt omgezet in pyrolyse-olie. Transport en opslag van deze olie is wel technisch haalbaar, waardoor de productie van de pyrolyse-olie en de opwekking van warmte en/of elektriciteit uit deze pyrolyse-olie onafhankelijk van elkaar kunnen gebeuren, op verschillende locaties, tijdstippen en op economisch efficiënte schaal (Brammer, Lauer, & Bridgwater, 2006). Pyrolyse heeft dus het voordeel dat ontkoppeling mogelijk is. Bovendien kan flash pyrolyse gebeuren bij lage temperaturen van circa 450°C, waardoor de metalen die het fyto-remediatie-hout heeft opgenomen, achterblijven in de asresten, ook wel char genoemd (Koppolu, Agblevor, & Clements, 2003). Bij pyrolyse kan de vervuiling dus opgeconcentreerd worden in een klein volume. Dit in tegenstelling tot verbranding en vergassing, waarbij door de hoge temperaturen de metalen vervluchtigen naar de productgassen en dus een duurdere rookgasbehandeling noodzakelijk is. Tot slot is pyrolyse op kleine schaal meer aangewezen dan vergassing en verbranding vanuit economisch oogpunt (Kuppens & Thewys, 2009). In deze masterproef wordt daarom voornamelijk gefocust op pyrolyse.

Pyrolyse is een thermisch proces waarbij het organisch materiaal wordt ontleed onder invloed van een verhoogde temperatuur, zonder dat er zuurstof wordt toegevoegd. Door de pyrolyse van biomassa ontstaat onder andere pyrolyse-olie. Deze pyrolyse-olie heeft vele toepassingsmogelijkheden. Ze kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor het opwekken van elektriciteit in een gasturbine of dieselmotor. De pyrolyse-olie zou echter ook gebruikt kunnen worden in een systeem van warmtekrachtkoppeling, waarbij naast de elektrische energie ook nuttige thermische energie geproduceerd wordt (Brammer, et al., 2006). Hierdoor zou pyrolyse economisch nog waardevoller worden: de geproduceerde warmte zou gebruikt kunnen worden om aan een bepaalde warmtevraag te voldoen, bijvoorbeeld van bedrijven, huishoudens of openbare gebouwen.

1.2 CENTRALE ONDERZOEKSVRAAG

In deze masterproef wordt de toepassingsmogelijkheid van pyrolyse-olie in een warmtekrachtkoppeling onderzocht. Meer bepaald wordt nagegaan of het economisch haalbaar is om een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie te laten draaien en welke voorwaarden en beperkingen hieraan verbonden zijn. Het probleem wordt benaderd vanuit het standpunt van de investeerder in een warmtekrachtkoppeling.

De centrale onderzoeksvraag luidt als volgt: onder welke voorwaarden is het economisch haalbaar om een warmtekrachtkoppeling (WKK) op pyrolyse-olie te laten draaien?

1.3 DEELVRAGEN

Om de vooropgestelde centrale onderzoeksvraag te beantwoorden, worden enkele deelvragen behandeld. Deze deelvragen kunnen we opsplitsen in een technologisch en economisch luik.

In het **technologisch luik** wordt nagegaan wat pyrolyse en warmtekrachtkoppeling precies inhouden en komen voornamelijk de technische aspecten aan bod:

- Hoe gebeurt de productie van pyrolyse-olie uit kortoomloophout?
- Wat zijn de eigenschappen van pyrolyse-olie?
- Wat is er reeds bekend over het gebruik van pyrolyse-olie in boilers / motoren / gasturbines en welke aanpassingen zijn er vereist om deze installaties te doen draaien op pyrolyse-olie?
- Wat houdt warmtekrachtkoppeling (WKK) precies in en kan de werking gebeuren op pyrolyse-olie?

In het **economisch luik** wordt de economische kant van het verhaal nader bekeken en komen onderstaande deelvragen aan bod:

- Hoe gebeurt de dimensionering en optimalisering van een WKK op pyrolyse-olie?
- Wat is de investeringskost van een WKK op pyrolyse-olie?
- Welke kasstromen gaan er gepaard met een installatie op pyrolyse-olie?
- Voor enkele specifieke gevalstudies, hoeveel bedraagt de NCW van een investering in een WKK en wat is de prijs die dat bedrijf zou kunnen betalen voor de pyrolyse-olie?
- Hoe wijzigt de economische haalbaarheid van het project indien bepaalde onzekere parameters veranderen?

1.4 OPBOUW MASTERPROEF

Deze masterproef is opgebouwd in de logische volgorde van bovenstaand verhaal. In het **technologische luik** worden in eerste instantie de begrippen biomassa en specifiek kortoomloophout geïntroduceerd. Vervolgens wordt uitgelegd wat pyrolyse precies inhoudt en wat de eigenschappen en toepassingsmogelijkheden van pyrolyse-olie zijn. Daarna wordt het principe van warmtekrachtkoppeling besproken.



Figuur 1: Structuur technologische luik

In het **economische luik** wordt voor 3 specifieke gevalstudies nagegaan of een investering in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie financieel gezien een haalbare kaart is. De drie specifieke gevalstudies betreffen het stedelijk zwembad van Lommel, het Mariaziekenhuis in Overpelt en het woon- en zorgcentrum Hoevezavel in Lommel. Deze organisaties hebben elk een specifieke warmte- en elektriciteitsbehoefte. Er wordt dan ook voor elk van hen nagegaan hoe een warmtekrachtinstallatie, gegeven hun energiebehoeften, gedimensioneerd dient te worden en wat de financiële impact is van een investering in deze installatie.

HOOFDSTUK 2: BIOMASSA EN KORTEOMLOOPHOUT

2.1 DEFINITIE BIOMASSA

Voor het begrip biomassa zijn er meerdere definities in omloop. Een eerste definitie kan gevonden worden in de energiewetgeving. In richtlijn 2001/77/EG van het Europees parlement en de Raad van 27 september 2001 wordt biomassa gedefinieerd als "de biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, alsmede de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval" (Europees parlement en de Raad, 2001). De Vlaamse regering heeft in het Besluit van 5 maart 2004 inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen, deze Europese definitie letterlijk overgenomen (Vlaamse regering, 2004).

In de milieuwetgeving vinden we een andere definitie voor biomassa terug. Het Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunningen, kortweg VLAREM, hanteert een definitie die strenger is. Deze definitie bakent ook af wanneer biomassa als biomassaproduct dan wel als biomassa-afval geklasseerd mag worden. Dit onderscheid is belangrijk voor de wettelijke invulling betreffende in- en uitvoer, vergunningsprocedures, emissieregelgeving... Onder titel II van het VLAREM vindt men terug dat als biomassa wordt beschouwd: "producten, bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw, die kunnen worden gebruikt om de energie-inhoud terug te winnen, alsmede de volgende afvalstoffen:

- i) plantaardig afval van land- en bosbouw;
- ii) plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- iii) vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp, dat op de plaats van productie wordt meeverbrand en waarvan de vrijgekomen energie wordt teruggewonnen;
- iv) kurkafval;
- v) houtafval, met uitzondering van houtmateriaal dat als gevolg van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of van het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten, met inbegrip van met name dergelijk houtafval afkomstig dat afkomstig is van constructie - en sloopafval." (Vlaamse Regering, 1995).

Niet enkel in wetgeving vinden we definities van biomassa terug. ODE Vlaanderen, de Organisatie voor Duurzame Energie Vlaanderen definieert biomassa als "de verzamelnaam voor diverse stoffen

en materialen van dierlijke en plantaardige oorsprong, die gebruikt worden voor energieopwekking (warmte, elektriciteit en motorbrandstof)". Ook in de wetenschappelijke literatuur vinden we definities van biomassa. Biomassa is volgens Kajikawa een bron van opgeslagen zonne-energie die initieel door planten werd vastgelegd en omvat verschillende soorten organisch materiaal geproduceerd door planten en dieren (Kajikawa & Takeda, 2008). Ook volgens Mckendry bestaat biomassa enerzijds uit plantaardig materiaal en anderzijds uit organische reststromen (McKendry, 2002). Alle biomassa bestaat dus uit organische stof, waarin dankzij fotosynthese zonne-energie opgeslagen zit in de chemische bindingen.

2.2 INDELING BIOMASSA

Zoals hierboven werd aangehaald, bestaat biomassa uit twee grote categorieën: plantaardig materiaal en organische reststromen. Biomassa kan echter ook in verschillende groepen ingedeeld worden op basis van de herkomst van de biomassa.

Indien we de herkomst van de biomassa bekijken, zien we dat de meeste biomassa op dit moment voortkomt als restproduct van economische activiteiten zoals de landbouw en industrie. Bepaalde gewassen worden echter ook enkel als biomassa verbouwd. Geurds & Devriendt (2006) zien vijf grote categorieën qua oorsprong van biomassa. In eerste instantie zijn er de **reststoffen uit land- en bosbouw**. Hierbij zijn voornamelijk hout- en grasachtige reststoffen van belang, denken we maar aan stro en houtresten. Ook mest kan gebruikt worden voor energiewinning door verbranding of vergisting. Een tweede categorie bestaat uit de **industriële reststoffen**, waarbij vooral de houtverwerkende industrie en de voedingsindustrie een belangrijke rol spelen. Een derde categorie omvat de **energieteelten**. Dit zijn gewassen die uitsluitend of voornamelijk geteeld worden met energieproductie als primaire doel. Over energieteelten is meer terug te vinden in een volgende paragraaf. Een vierde categorie omvat het **bedrijfsafval**, waarbij sloophout en hout van afgekeurde paletten een belangrijke rol spelen. Tot slot zijn er nog de **gemeentelijke reststoffen**, waarbij we bijvoorbeeld denken aan snoeihout van gemeentelijke plantsoenen of bermmaaisel. Aangezien we ons in deze masterproef focussen op energieteelten, zullen we enkel deze categorie uitgebreid bespreken.

2.3 ENERGIETEELTEN

Energieteelten zijn gewassen die uitsluitend of voornamelijk geteeld worden met energieopwekking als primair doel. De algemene kenmerken van een goede energieteelt zijn: een hoge opbrengst (maximale productie droge stof per hectare), een lage benodigde inputenergie, lage kosten, een samenstelling met weinig contaminanten en weinig behoefte aan nutriënten. De keuze van de energieteelt hangt af van het eindgebruik en de bio-conversietechniek die men verkiest (McKendry, 2002).

Energieteelten zijn CO₂-neutraal. De koolstof die bij de energieopwekking vrijkomt, werd initieel door de planten uit de atmosfeer opgenomen tijdens hun groei. Indien de percelen heraan geplant worden, wordt de CO₂ die vrijkwam tijdens de energieopwekking opnieuw geabsorbeerd door de planten en komt er dus geen extra CO₂ terecht in de atmosfeer (McKendry, 2002).

In de literatuur (Venendaal, Jorgensen, & Foster, 1997) vinden we een onderverdeling van energieteelten in vier verschillende categorieën: de suiker- en zetmeelhoudende gewassen, de kruidachtige gewassen, de gewassen met oliehoudende zaden en de houtachtige gewassen.

2.3.1 Suiker- en zetmeelhoudende gewassen

Suiker- en zetmeelhoudende gewassen bevatten suikers en kunnen daarom ingezet worden voor de productie van bio-ethanol via een fermentatieproces. Voorbeelden van suikerhoudende gewassen zijn suikerbieten en sweet sorghum. Zetmeelhoudende gewassen zijn bijvoorbeeld aardappelen en graansoorten, waaronder maïs.

2.3.2 Kruidachtige gewassen

Het meest frequent geteelde kruidachtige gewas is olifantsgras (*Miscanthus*). *Miscanthus* is een rietachtig gewas en werd voor het eerst gecultiveerd in Europa in de jaren '30, geïmporteerd uit Japan. Dit gewas is een zogenaamd C₄-gewas. C₄-gewassen zijn efficiënter in het opnemen van zonlicht, water en stikstof in vergelijking met C₃-gewassen zoals wilg en populier. De keerzijde hiervan is dat C₄-gewassen warmere temperaturen nodig hebben om in de lente de groei te starten. De kwaliteit van *Miscanthus* biomassa is qua verbranding vergelijkbaar met die van houtachtige biomassa. Het wordt eenmaal per jaar geoogst en dat gedurende tien tot twaalf jaar. De grootste nadelen van de plant zijn de hoge kosten voor aanplanting van het veld, de moeilijke overwintering in sommige gebieden van West-Europa (voornamelijk in de eerste winter) en onvoldoende regenval in Zuid-Europese gebieden (Lewandowski, Clifton-Brown, Scurlock, & Huisman, 2000).

2.3.3 Oliehoudende gewassen

Een oliehoudend gewas slaat haar reservestoffen op onder de vorm van olie. De olie kan door de mens gewonnen worden door de oliehoudende zaden te scheiden van de rest van de plant. De gewonnen olie kan rechtstreeks gebruikt worden in een dieselmotor of een warmtekrachtkoppeling. Daarnaast kan de gewonnen olie ook geconverteerd worden naar biodiesel.

Er bestaan verschillende plantensoorten die olie bevatten, maar deze komen niet allemaal in aanmerking als energieteelt vanwege een te laag oliegehalte. De belangrijkste gewassen die in

onze gebieden voorkomen zijn koolzaad en zonnebloem. Andere gewassen zijn de Jatrofaplant, de oliepalm en de pindaplant.

2.3.4 Korteomloophout

Houtachtige planten die toegepast worden voor energieteelt zijn bijvoorbeeld wilg en populier. Houtachtige gewassen bevatten voornamelijk hemicellulose, cellulose en lignine. Door de lignine zijn houtachtige gewassen moeilijk biologisch om te zetten (Yaman, 2004), waardoor de gewassen (voorlopig) voornamelijk worden omgezet via thermochemische processen zoals verbranding, vergassing en pyrolyse.

De houtachtige gewassen die gebruikt worden als energieteelt worden geclassificeerd als korteomloophout. Korteomloophout is een speciaal type bosbouw dat in het Bosdecreet juridisch gedefinieerd wordt. Dit decreet spreekt over "de teelt van snelgroeiende, houtachtige gewassen, waarbij de bovengrondse biomassa periodiek tot maximaal 8 jaar na de aanplanting of na de vorige oogst, in zijn totaliteit wordt geoogst" (Vlaamse Regering, 2006). Essentieel is dus dat er geoogst wordt binnen de 8 jaar na aanplanting of na de vorige oogst, zoniet valt men onder een andere juridische context, namelijk die van het bos.

Concreet staat korteomloophout voor dichte aanplantingen (10.000 tot 20.000 stekken per ha) met snelgroeiende boomsoorten, die periodiek geoogst kunnen worden. In de praktijk wordt er meestal geoogst om de 3 tot 5 jaar. Door gebruik te maken van traditionele landbouwtechnieken, zoals irrigatie, bemesting en grondvoorbereiding kan een opbrengst van 20 tot 25 ton droge stof per ha per jaar bekomen worden. Dit wordt intensieve biomassabouw genoemd. Extensieve biomassabouw, waarbij geen beroep wordt gedaan op bijvoorbeeld irrigatie en bemesting, is minder belastend voor het milieu, maar levert ook slechts 8 tot 12 ton droge stof per ha per jaar op (Ceulemans, et al., 2001).

In de literatuur (A. V. Bridgwater, et al., 2002) wordt verondersteld dat de verkoopprijs van korteomloophout in Europa €40 per ton droge stof bedraagt. De werkelijke verkoopprijs varieert per land en ligt in een range van €10-20 per ton droge stof tot €160 per ton droge stof. Het instituut voor natuur- en bosonderzoek in België gaat uit van een prijs van €48.5 per ton droge stof voor korteomloophout (INBO, 2007). In de stad Doornik wordt korteomloophout gebruikt als energiebron om het stedelijk zwembad te voorzien van warmte en elektriciteit. De stad Doornik koopt daar de houtsnippers van landbouwers voor een prijs van €50 per ton droge stof (De Somviele, et al., 2009). Van den Berg en Wiersma (2004) vermelden voor wilg en populier prijzen variërend van €45 tot €61 per ton droge stof. Het is niet altijd bekend welke activiteiten (grondstofproductie, transport, voorbereiding,...) in deze marktprijzen inbegrepen zijn.

2.4 VOORBEHANDELING VAN KORTEOMLOOPHOUT

Vooraleer het korteomloophout omgezet kan worden naar energie, is meestal eerst een fysische voorbehandeling van de biomassa nodig. Deze voorbehandeling is noodzakelijk om transport en opslag te vergemakkelijken en om het rendement van de energieconversie te verhogen. Geurds & Devriendt (2006) zien 3 grote voorbehandelingstechnieken: verkleinen, verdichten en drogen.

2.4.1 Verkleinen

Een eerste voorbehandeling bestaat uit het verkleinen van de biomassa. Voor het verkleinen van het korteomloophout kan beroep worden gedaan op een houtversnipperaar of een houthakselaar. Het verkleinen wordt in de eerste plaats gedaan om het transport van de biomassa te vergemakkelijken (Geurds & Devriendt, 2006). Men dient de biomassa echter ook te verkleinen om aan de eisen van de energie-installatie te voldoen. In de literatuur (A. V. Bridgwater, et al., 2002) wordt aangegeven dat in de meeste pyrolyse reactoren de partikelgrootte gelimiteerd is tot 2-3 mm. Deze beperking is nodig om secundaire reacties van de primaire pyrolysedampen met de gevormde char te vermijden.

2.4.2 Verdichten

Een tweede voorbehandeling bestaat uit het verdichten of compacteren van de biomassa. Hierbij wordt het volume van de initiële biomassa verminderd en de energiedichtheid van het materiaal vergroot. Dankzij het verdichten moet minder volume getransporteerd worden en dankzij de eenvormigheid kan het materiaal makkelijker opgeslagen worden. Om biomassa te kunnen verdichten, is het essentieel dat het materiaal goed droog is, zoniet bestaat de kans dat het materiaal gaat rotten. Er bestaan verschillende methoden om verschillende soorten biomassa te verdichten. Enkele voorbeelden zijn verballen, pelletiseren en briкетteren (Geurds & Devriendt, 2006).

2.4.3 Drogen

Een derde vorm van voorbehandeling is het drogen. Biomassa uit de natuur is meestal immers te nat, zowel voor gebruik als voor het stockeren (Geurds & Devriendt 2006). Tijdens het pyrolyseproces beïnvloedt de aanwezigheid van water in de biomassa de fysische eigenschappen en kwaliteit van de pyrolyse-olie. Er worden daarom limieten opgelegd aan het vochtgehalte van de biomassa om de kwaliteit en de opbrengst aan vloeibare olie te verzekeren. Het maximale vochtpercentage van de biomassa bedraagt 10% en een vochtgehalte van 7% is ideaal (A. V. Bridgwater, et al., 2002).

HOOFDSTUK 3: PYROLYSE

3.1 THERMOCHEMISCHE CONVERSIEMETHODEN

Over het algemeen kan biomassa omgezet worden naar bio-energie via twee types processen: thermochemische en biochemische/biologische processen. (Zhang, Xu, & Champagne, 2010). Wilg bestaat voornamelijk uit lignine, cellulose en hemi-cellulose. Door de lignine zijn houtachtige gewassen moeilijk biologisch om te zetten (Yaman, 2004), waardoor wilg voornamelijk wordt omgezet naar energie via thermochemische conversietechnieken. Verbranding, vergassing en pyrolyse zijn de technieken die hiervoor in aanmerking komen. Deze processen verschillen onderling in de hoeveelheid gebruikt oxidatiemiddel en in de omzettingstemperatuur (Devriendt & Vanderstraeten, 2003). Een belangrijke parameter is de luchtfactor λ , waarmee de verhouding wordt bedoeld tussen de hoeveelheid zuurstof die aan het proces wordt toegevoegd en de hoeveelheid theoretische zuurstof die nodig is om de biomassa volledig om te zetten tot CO_2 en H_2O .

$$\lambda = \frac{\text{hoeveelheid toegevoegde lucht}}{\text{stoichiometrische hoeveelheid lucht voor volledige verbranding}}$$

Verbranding vindt plaats bij een overvloed aan zuurstof ($\lambda \geq 1$), vergassing gebeurt in een atmosfeer met te weinig zuurstof ($\lambda \leq 1$) en pyrolyse vindt plaats bij afwezigheid van zuurstof ($\lambda = 0$). We kunnen het onderscheid tussen verbranding, vergassing en pyrolyse in functie van de luchtfactor als volgt weergeven (Thewys & Kuppens, 2008).



Figuur 2: Onderscheid thermochemische conversiemethoden in functie van λ (Thewys & Kuppens, 2008)

Bij **verbranding** van biomassa worden de organisch-biologische stoffen bij een temperatuur tussen 800°C en 1300°C verbrand. Dit gebeurt bij overstoichiometrische luchttoevoer en daardoor wordt de organische fractie quasi volledig omgezet tot CO_2 en H_2O . De warmte die vrijkomt en wordt afgegeven aan een medium, wordt geconverteerd in mechanische arbeid of elektriciteit met

behulp van bijvoorbeeld een stoommotor, een stoomturbine of een stirlingmotor of wordt gewoon gebruikt als nuttige warmte (Devriendt & Vanderstraeten, 2003).

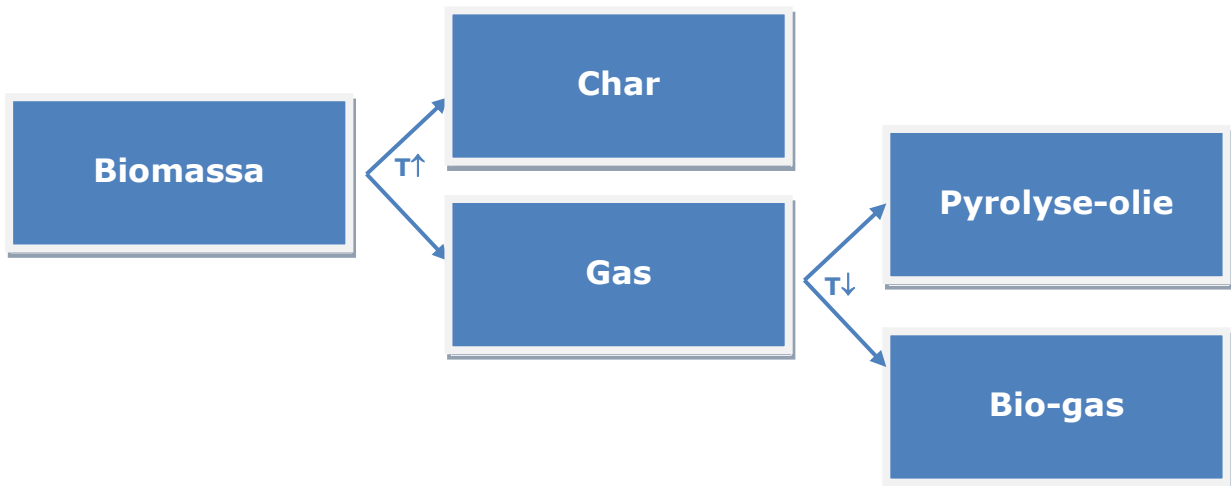
Bij de tweede vorm, **vergassing**, wordt biomassa in vaste vorm geconverteerd in een gasvormige brandstof op een temperatuur tussen de 700°C en 900°C met een beperktere luchtvermaat dan bij verbranding. Indien vergast wordt met lucht, ontstaat er een laagcalorisch stookgas dat bestaat uit CO, CO₂, C_nH_m, H₂, H₂O en N₂ met een verbrandingswaarde van 4 tot 8.5 MJ/Nm³. Indien zuivere zuurstof gebruikt wordt, wordt een gas gevormd met een hogere calorische waarde van 8.5 MJ/Nm³ tot 21MJ/Nm³, het zogenaamde synthesegas, dat ook als grondstof voor de chemische industrie gebruikt kan worden, bijvoorbeeld voor de productie van methanol (Devriendt & Vanderstraeten, 2003).

Bij de derde vorm van thermochemische omzetting, **pyrolyse**, wordt het organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof ontleed. De biomassa wordt opgewarmd tot 300°C à 700°C, waardoor thermische ontbinding van de organische fractie optreedt. Na condensatie ontstaan drie producten: pyrolyse-olie, pyrolyse-gas en een restant vaste stof. De onderlinge verhouding van de productfracties die ontstaan, wordt bepaald door de uitgangsmateriaal, de gebruikte techniek en de reactieparameters waaronder temperatuur, verwarmingssnelheid en verblijftijd (Devriendt & Vanderstraeten, 2003).

In de context van de fyto-remediatie, kiezen we best voor pyrolyse om de wilg om te zetten tot energie. Zowel verbranding, vergassing als pyrolyse resulteren in eerste instantie in hete gassen en een residu. Verbranding en vergassing gebeuren echter bij hogere temperaturen dan pyrolyse. Metalen (zoals cadmium, een problematisch metaal in de bestudeerde regio) volatiliseren makkelijker bij hogere temperaturen. Hierdoor zullen gassen die resulteren bij verbranding en vergassing meer zware metalen bevatten dan gassen uit pyrolyse. In het geval van verbranding zonder rookgasreiniging worden de gassen via een schoorsteen in het milieu gebracht, wat nogal absurd lijkt in het licht van het primaire doel van fyto-remediatie. Bij vergassing worden de gassen geconverteerd naar energie (elektriciteit en/of warmte) door ze te gebruiken als brandstof voor gasmotoren. De metalen in de gassen zijn schadelijk voor de onderdelen van de motoren. Aangezien pyrolyse gebeurt bij lagere temperaturen, zullen de productgassen praktisch geen metalen bevatten. Onderzoek (Stals et al., 2010) toont aan dat bij pyrolyse op 350°C bijna alle metalen in de asresten/char overblijven en dat de pyrolyse-olie heel weinig metalen bevat (Cu en Zn < 5 ppm; Cd en Pb < 1 ppm). De vervuiling wordt bij pyrolyse dus opgeconcentreerd in een klein volume. De focus in dit werk ligt dan ook op pyrolyse en niet op verbranding of vergassing.

3.2 WAT IS PYROLYSE?

Het woord pyrolyse komt uit het Grieks, waar 'pyr' vuur betekent en 'lysis' ontbinding. Pyrolyse is een thermochemisch proces waarbij organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof wordt ontleed bij temperaturen hoger dan 400°C (Laird, Brown, Amonette, & Lehmann, 2009). Bij deze temperaturen ontleden hogere koolwaterstoffen tot componenten met een lagere molecuulmassa en ontstaan er afbraakproducten die bestaan uit een vaste en een gasvormige fractie. De vaste fractie bestaat uit een koolrest en wordt ook char genoemd. Het gas bestaat uit een condenseerbare en een niet-condenseerbare fractie. Het condenseerbare deel vormt na afkoeling de pyrolyse-olie, bestaande uit een mengsel van organische verbindingen en water. Het niet-condenseerbare deel vormt een bio-gas. Het pyrolyseproces resulteert dus uiteindelijk in 3 producten: char, pyrolyse-olie en bio-gas. We kunnen de producten die tijdens het pyrolyse proces ontstaan als volgt weergeven.

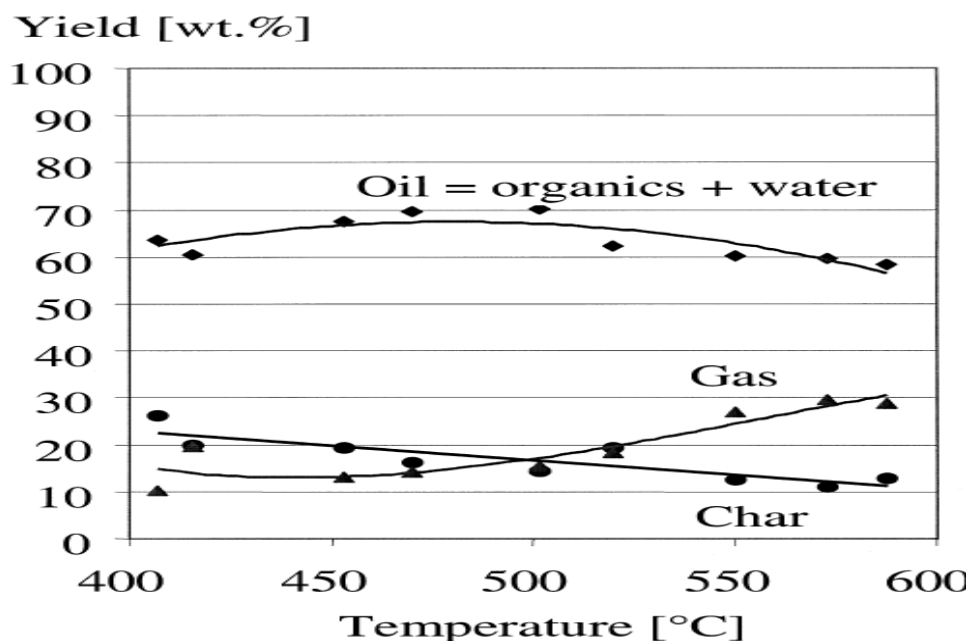


Figuur 3: Indeling pyrolyseproducten

De onderlinge verhouding van de productfracties die ontstaan, wordt bepaald door verschillende procesparameters waaronder de gebruikte biomassa, de voorbehandeling van de biomassa, de temperatuur waarbij pyrolyse plaatsvindt, de opwarmingsnelheid en de verblijftijd.

In eerste instantie heeft de gebruikte biomassa een invloed op de samenstelling van de eindproducten (Maher & Bressler, 2007). De samenstelling van de gevormde eindproducten is afhankelijk van de originele biomassa, waardoor verschillende soorten biomassa aanleiding geven tot verschillen in de gevormde pyrolyseproducten. Ook de voorbehandeling van de biomassa speelt een rol, zo heeft het al dan niet drogen van de biomassa een impact op de samenstelling, meer bepaald in het watergehalte van de pyrolyse-olie (A. V. Bridgwater, et al., 2002).

De temperatuur waarbij de pyrolyse plaatsvindt, heeft ook een invloed op de opbrengsten en samenstelling van de pyrolyseproducten. In onderstaande figuur (A. V. Bridgwater, Meier, & Radlein, 1999) worden de opbrengsten van pyrolyse-olie, gas en char weergegeven bij verschillende reactortemperaturen. Het betreft hier een pyrolyseproces met onbehandeld hout. De opbrengst van de pyrolyse-olie is maximaal bij een reactortemperatuur van 475°C. Bij toenemende temperatuur daalt de opbrengst aan pyrolyse-olie en char en stijgt de opbrengst aan niet-condenseerbaar bio-gas.



Figuur 4: Opbrengst aan pyrolyse-olie, gas en char in functie van de temperatuur (A. V. Bridgwater, Meier, & Radlein, 1999)

Tot slot spelen de opwarmingsnelheid en de verblijftijd een zeer belangrijke rol bij de vorming van de pyrolyseproducten. Op basis van deze twee parameters kunnen we een onderscheid maken tussen twee verschillende types van pyrolyse, namelijk de conventionele, langzame (slow) pyrolyse en snelle (flash/fast) pyrolyse (Maggi & Delmon, 1994).

3.2.1 Trage pyrolyse

Bij de conventionele, trage pyrolyse wordt de biomassa langzaam gepyrolyseerd tegen een lage opwarmingsnelheid en is de verblijftijd van de gassen in pyrolyse-reactor aanzienlijk (typisch een half uur tot enkele uren). Bij dit soort pyrolyse wordt voornamelijk char gevormd (Onay & Kockar, 2003). Conventionele pyrolyse van droog hout levert circa 30% pyrolyse-olie, 35% char en 35% bio-gas (A. V. Bridgwater, 2003). Conventionele, trage pyrolyse processen worden al meer als

duizend jaar gebruikt om houtskool te produceren (Zhang, et al., 2010). Aangezien we de opbrengst aan pyrolyse-olie wensen te maximaliseren, lijkt trage pyrolyse geen goede optie.

3.2.2 Snelle pyrolyse

Snelle (fast/flash) pyrolyse is een geavanceerd proces waarbij de biomassa ontleed wordt in een tijdsbestek van enkele seconden onder zorgvuldig gecontroleerde omstandigheden. Er bestaat in theorie nog een verschil tussen fast en flash pyrolyse, maar bij praktische uitvoering op grote schaal is dit verschil moeilijk te definiëren, waardoor we fast en flash pyrolyse onder dezelfde noemer plaatsen.

Bij snelle pyrolyse wordt getracht de opbrengst van pyrolyse-olie te maximaliseren. Snelle pyrolyse van wilgen levert circa 70 m% pyrolyse-olie, 12 m% char en 13 m% bio-gas, vertrekkende van een droge biomassa (A. V. Bridgwater, 2003). In dit werk wordt daarom voornamelijk gefocust op snelle pyrolyse en niet op de conventionele pyrolyse, aangezien de pyrolyse-olie het meeste perspectief biedt voor valorisatie. De char bevat immers praktisch alle metalen uit de originele biomassa.

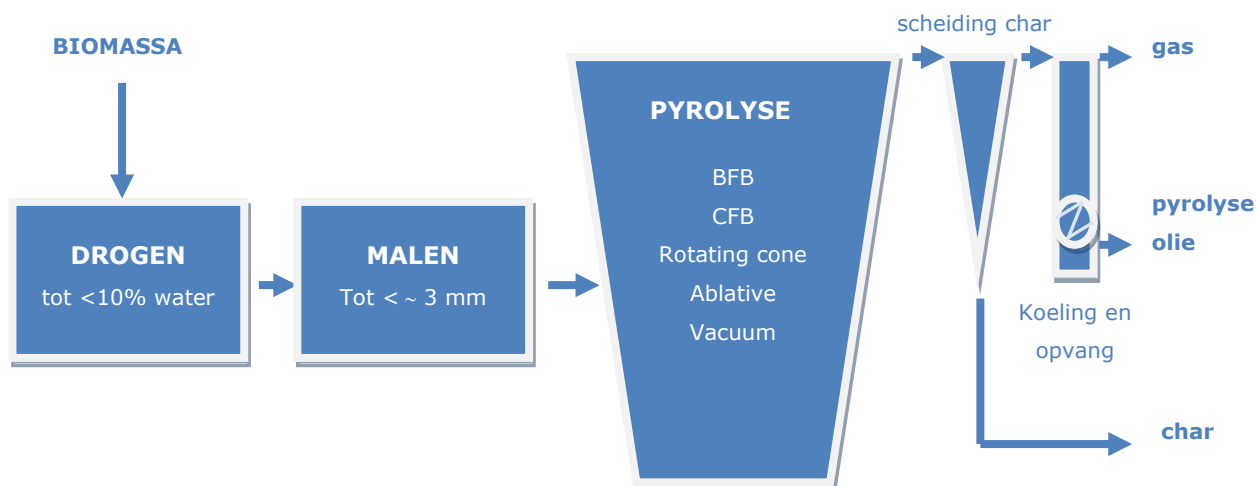
De essentiële kenmerken van een snel pyrolyseproces voor de maximalisatie van pyrolyse-olie zijn (T. Bridgwater, 2007):

- Een zeer hoge opwarmingssnelheid en snelle overdracht van warmte aan de biomassa. Om dit te kunnen realiseren dient de biomassa voldoende klein te zijn.
- Een zorgvuldig gecontroleerde reactietemperatuur van ongeveer 500°C en een dampfase temperatuur van ongeveer 400°C-450°C.
- Een korte verblijftijd van de hete gassen in de reactor (enkele seconden of minder) om secundaire reacties te vermijden.
- Snelle afkoeling van de pyrolysedampen om pyrolyse-olie te bekomen.

Praktisch eender welk soort biomassa kan verwerkt worden via snelle pyrolyse. Hoewel het meeste onderzoek verricht is naar hout omwille van de consistentie en vergelijkbaarheid tussen de testen, zijn er bijna 100 verschillende soorten biomassa getest door allerlei laboratoria, variërend van agrarisch afval zoals stro, olijfpitten en notendoppen tot energiegewassen zoals Miscanthus en Sorghum, bosbouwafval zoals schors, afval zoals zuiveringsslib en afval van leer (T. Bridgwater, 2007).

3.3 HET PYROLYSE PROCES

Een typisch snel pyrolyseproces wordt weergegeven in onderstaande figuur, waarbij alle noodzakelijke processtappen worden weergegeven (aangepast uit T. Bridgwater, 2007).



Figuur 5: Snel pyrolyseproces (aangepast uit T. Bridgwater, 2007)

In de eerste fase wordt de biomassa voorbehandeld. De biomassa wordt gedroogd tot een vochtigheidsgraad van minder dan 10% om de hoeveelheid water in de pyrolyse-olie te minimaliseren. Ook wordt de biomassa verkleind tot een partikelgrootte van minder dan circa 3 mm om een snelle warmte-overdracht te kunnen realiseren.

In de volgende stap komt de biomassa in de reactor terecht. Er bestaan verschillende soorten reactoren, die in de volgende paragraaf besproken worden. In de reactor gebeurt de eigenlijke pyrolyse reactie en wordt de biomassa verwarmd in afwezigheid van lucht. Bij verhoogde temperatuur bestaan de ontledingsproducten uit vaste stoffen en dampen.

In de volgende stap wordt de vaste koolrest (char) gescheiden van de dampen, meestal met behulp van cyclonen. De dampen kunnen door koeling ten slotte gescheiden worden in een condenseerbaar en niet-condenseerbaar gedeelte.

In onderstaande paragrafen worden de verschillende soorten reactoren besproken, wordt het principe van het scheiden van char weergegeven en wordt uitgelegd hoe de vloeisof verzameld wordt.

3.4 VERSCHILLENDE TYPES REACTORCONFIGURATIES

De kern van de pyrolyse-installatie wordt gevormd door de reactor. Hoewel deze reactor in de meeste gevallen slechts ongeveer 10-15% van de totale investeringskosten van het geïntegreerde systeem vertegenwoordigt, richten de meeste onderzoeks- en ontwikkelingsprojecten zich op de reactor (T. Bridgwater, 2007). Pyrolyse heeft, misschien wel meer dan andere

conversietechnieken, behoorlijk wat creativiteit en innovatie gekend bij het ontwikkelen van reactorsystemen die de essentiële elementen bevatten voor flash pyrolyse (hoge opwarmingsnelheden, gematigde en goed gecontroleerde temperatuur en korte verblijftijden) (A. V. Bridgwater, et al., 1999). De 'beste' methode is echter nog niet ontwikkeld, de meeste reactoren leveren een opbrengst pyrolyse-olie van 65-75% op basis van droge hout input (A. V. Bridgwater & Peacocke, 2000).

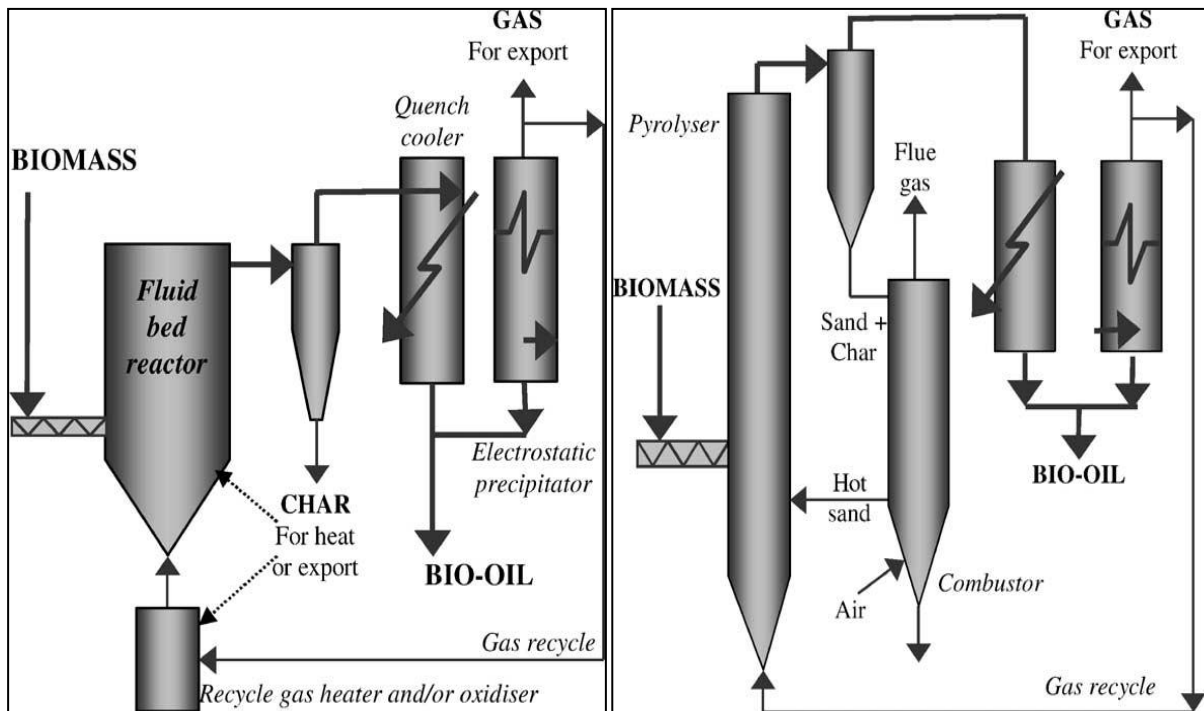
In onderstaande tabel (A. V. Bridgwater & Peacocke, 2000) worden de belangrijkste reactorconfiguraties voor pyrolyse weergegeven. Ook wordt vermeld welke organisaties deze reactoren onderzoeken en/of operationaliseren.

Tabel 1: Soorten pyrolysereactoren en hun locaties (A. V. Bridgwater & Peacocke, 2000)

Reactor type	Organisaties
Fluid bed	Aston University, Dynamotive, Hamburg University, INETI, ICW, Leeds University, NREL, Oldenberg University, RTI, Sassari University, UEF, VTT, Zaragoza University, ZSW-Stuttgart University
Ablative	NREL, Aston University, BBC, Castle Capital
Circulating fluid bed	CRES, CPERI, ENEL/Pasquali
Entrained flow	GTRI, Egemin
Rotating cone	Twente University, BTG/Schelde/Kara
Transported bed	Ensyn, (at ENEL, Red Arrow, VTT)
Vacuum moving bed	Laval University/Pyrovac

3.4.1 Bubbling fluid bed reactor (bubbelende wervelbed reactor)

De bubbelende wervelbed reactor – ook wel gewoon 'wervelbed reactor' genoemd, staat tegenover de 'circulerende wervelbed reactor' (T. Bridgwater, 2007) die in een volgende paragraaf besproken wordt. In figuur 6 wordt zowel het bubbelend wervelbed pyrolyseproces als het circulerend wervelbed pyrolyseproces (A. V. Bridgwater, 2003) weergegeven om vergelijking te vergemakkelijken.



Figuur 6: Bubbelend wervelbed pyrolyseproces (links) en circulerend wervelbed pyrolyseproces (rechts) (A. V. Bridgwater, 2003)

De bubbelende wervelbedreactor is een verticale cilinder waarbij oververhit gerecycleerd pyrolysegas langs de onderkant binnenkomt. Dit oververhitte gas zorgt ervoor dat een inert materiaal, bijvoorbeeld zand gefluidiseerd wordt, er ontstaat als het ware een 'vloeistof' die 'bubbelt' in de reactor. Dit zand is een medium met een hoge warmtecapaciteit dat gebruikt wordt om de inkomende biomassadeeltjes te verhitten. De biomassa deeltjes komen op kamertemperatuur de reeds hete reactor binnen en worden voornamelijk verwarmd door middel van contact met het zand in afwezigheid van zuurstof. De biomassapartikels ontleden en worden langs boven uit de reactor meegesleurd door de stroom van het origineel ingevoerde hete gas. Hier wordt de char gescheiden van het gas via een cycloon. Het gas verlaat de cycloon langs boven en wordt gekoeld in een warmtewisselaar. Het condenseerbare gas wordt opgevangen aan de voet van de warmtewisselaar als pyrolyse-olie. Het niet-condenseerbare gas wordt gezuiverd door een elektrostatische vliegfilter en kan deels of volledig gerecycleerd worden. De opgevangen char die uit de cycloon komt kan eventueel verbrand worden om het wervelgas te verwarmen (Colby, Dauenhauer, & Schmidt, 2008). Dit is enkel mogelijk indien niet verontreinigde biomassa gebruikt wordt.

Het gebruik van bubbling fluid bed reactoren kent verschillende voordelen. De technologie is welbekend, makkelijk in constructie en werking en garandeert een goede controle van de temperatuur. Deze pyrolysetechniek garandeert een goede en consistente prestatie met een hoge

opbrengst aan pyrolyse-olie van gemiddeld 70-75 gew % op basis van een droge hout voeding. De biomassadeeltjes dienen wel voldoende klein te zijn (kleiner dan 2-3 mm) om de biomassa voldoende snel te kunnen opwarmen. De opwarmingssnelheid van de partikels is meestal de snelheid limiterende stap (T. Bridgwater, 2007).

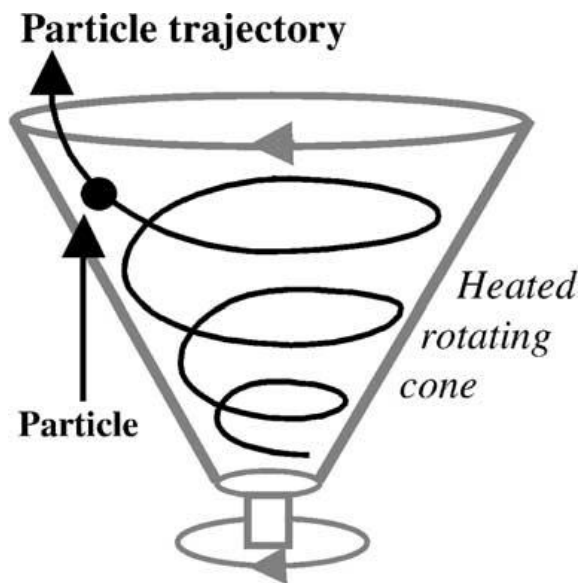
3.4.2 Circulating fluid bed reactor

De circulerende wervelbedreactor heeft veel weg van de bubbelende wervelbed reactor. De snelheid van het gerecycleerd pyrolysegas dat langs onder binnenkomt is echter veel groter, waardoor de zanddeeltjes circuleren tussen verschillende onderdelen van de reactor. De zanddeeltjes bewegen in een continue kring van de pyrolyse reactor door de cycloon naar een verbrander. In de verbrander wordt char verbrand en het aanwezige zand wordt hier ook opgewarmd. Het zand komt dan terug in de pyrolyse reactor terecht waar het zich vermengt met de biomassa deeltjes en het gerecycleerde pyrolysegas (Colby, et al., 2008). Het circulerende wervelbed pyrolyse proces wordt in figuur 6 schematisch weergegeven (A. V. Bridgwater, 2003).

Deze technologie is geschikt voor zeer grote throughputs, ze wordt bijvoorbeeld ook gebruikt in de petroleum en petrochemische industrie waar grote throughputs vereist zijn. Ook in deze reactor kan een goede controle van de temperatuur gerealiseerd worden. De hydrodynamica is wel complexer dan in de bubbling fluid bed reactor, omwille van de zandcyclus. Net zoals bij bubbelende wervelbed pyrolyse is ook hier de deeltjesgrootte van de biomassa beperkt (T. Bridgwater, 2007).

3.4.3 Rotating cone reactor

Een variatie op de circulerende wervelbedreactor is de roterende conusreactor, uitgevonden in de universiteit van Twente en geïmplementeerd door de BTG in Nederland (T. Bridgwater, 2007). Bij dit type pyrolyse gebeurt het mengen van heet zand met biomassa door mechanische menging in een roterende conus. De biomassa partikels worden samen met een grote stroom voorverhit zand toegevoegd aan een roterende conus. De biomassa partikels worden omgezet en de stroom aan vaste stof wordt spiraalsgewijs omhoog getransporteerd door de heersende centrifugale krachten. Het transport gebeurt hier dus onder invloed van centrifugale krachten en niet met behulp van een transportgas, wat ten opzichte van bovenstaande technieken een voordeel oplevert. Gassen en dampen worden op de gebruikelijke manier gescheiden en bewerkt. De opbrengst aan pyrolyse-olie bedraagt 60-70% op basis van droge voeding. Het nadeel van dit type reactor is de complexiteit. Het principe van de roterende conusreactor wordt weergegeven in figuur 8 (A. V. Bridgwater, 2003).



Figuur 7: Principe roterende conusreactor (A. V. Bridgwater, 2003)

3.4.4 Ablatieve pyrolyse reactor

Ablatieve pyrolyse heeft een substantieel verschillend concept dan de andere methoden van snelle pyrolyse. De reactiemethode bij ablatieve pyrolyse is gelijkaardig aan het doen smelten van boter in een pan; de smeltgraad kan significant verhoogd worden door de boter tegen de pan te drukken en door de boter over het verwarmde oppervlak van de pan te bewegen. Bij ablatieve pyrolyse wordt de hitte getransfereerd van de hete reactorwand naar het hout dat er onder druk mee in contact staat om zo het hout te 'smelten' (T. Bridgwater, 2007). Door het intieme contact met het hete oppervlak onder welbepaalde omstandigheden zal er snelle thermische degradatie van de biomassa partikels plaatsvinden (Peacocke & Bridgwater, 1994).

Belangrijke elementen van ablatieve pyrolyse zijn de hoge druk waarmee de partikels tegen de hete reactorwand worden gedrukt, de hoge relatieve snelheid tussen partikels en de reactorwand en een reactorwand met een temperatuur van minder dan 600°C (T. Bridgwater, 2007).

Bij de andere methoden van snelle pyrolyse wordt de reactiesnelheid gelimiteerd door de snelheid van de warmte-overdracht naar de biomassa deeltjes, waardoor kleine partikelgroottes noodzakelijk zijn. Bij ablatieve pyrolyse wordt de reactiesnelheid niet gelimiteerd door de snelheid van de warmte-overdracht, waardoor grotere partikels gebruikt kunnen worden en er in principe geen bovenlimiet staat op de partikelgrootte. Het nadeel is dat het proces oppervlaktegebonden is, waardoor opschalen duurder is dan bij andere methoden en er geen sprake is van schaalvoordelen. Bovendien wordt het proces mechanisch gestuurd, waardoor de reactor complexer is (T. Bridgwater, 2007).

3.4.5 Vacuüm reactor

Vacuüm pyrolyse valt in feite niet onder de noemer van snelle pyrolyse, aangezien de opwarmingsnelheid van de biomassa traag is. De afvoer van de pyrolyse dampen gebeurt wel snel en de dampen hebben dus maar een korte verblijftijd in de reactor. Snelle pyrolyse wordt hierdoor toch (gedeeltelijk) gesimuleerd (A. V. Bridgwater, et al., 1999). De biomassa wordt in een vacuüm verhit en de pyrolyse dampen worden afgevoerd met een vacuümpomp. Vacuüm pyrolyse kan grotere biomassa partikels verwerken dan de meeste snelle pyrolysereactoren en ook hier is geen transportgas nodig. De opbrengst aan pyrolyse-olie ligt wel veel lager, rond de 35-50% op basis van droge voeding doordat er bij tragere opwarming meer houtskool ontstaat. Bovendien is het proces relatief gecompliceerd (A. V. Bridgwater, 2003).

3.5 SCHEIDING VAN DE CHAR

Char fungeert als een kraakkatalysator van de dampen in het pyrolyseproces en draagt bij aan secundaire reacties in de dampfase, waardoor de opbrengst aan pyrolyse-olie daalt. Snelle en effectieve verwijdering van de char is dus essentieel. Deze verwijdering gebeurt meestal met behulp van cyclonen. Doorgaans dient een eerste cycloon voor de verwijdering van het bulk materiaal en een tweede voor de verwijdering van zoveel mogelijk kleine deeltjes. Een aantal fijne deeltjes kunnen soms toch de cyclonen passeren. Als ze in de pyrolyse-olie terecht komen zorgen ze ervoor dat deze versneld veroudert en vergroot het probleem van instabiliteit, dat in het volgende hoofdstuk besproken wordt. Mogelijke oplossingen van de meesleuring van de char in de vloeistof zijn filtratie van de hete dampen en drukfiltratie van de olie zelf (A. V. Bridgwater, 2003).

3.6 VERZAMELING PYROLYSE-OLIE

De gasvormige producten van snelle pyrolyse bestaan uit aerosolen, dampen en niet-condenseerbare gassen. De dampen vereisen snelle koeling om secundaire reacties te minimaliseren en om de dampen te condenseren. De aerosolen, kleine druppeltjes van niet-verdampte olie, vereisen agglomeratie en opeenhoping.

Momenteel wordt 'quenching' (zeer snel afkoelen) in productolie of in een niet-mengbaar koolwaterstofoplosmiddel op grote schaal toegepast. Orthodoxe aerosol opvangapparaten zoals druppelvangers zijn niet bijzonder effectief. Elektrostatische vliegafilters krijgen tegenwoordig de voorkeur voor aerosol opvang (A. V. Bridgwater, 2003).

HOOFDSTUK 4: PYROLYSE-OLIE

De pyrolyse-olie die tijdens het pyrolyseproces ontstaat is het belangrijkste product in het kader van de haalbaarheidsstudie rond WKK. Pyrolyse-olie duikt in de literatuur op onder veel verschillende benamingen, waaronder bio-olie, bio-ruwe olie, bio-brandstof olie, houtvloeistof, houtolie, vloeibare rook, pyroligneous tar en pyroligneous zuur (A. V. Bridgwater, 2003). In deze masterproef wordt eenduidig de benaming pyrolyse-olie gebruikt om verwarring te vermijden.

In dit hoofdstuk worden de karakteristieken van pyrolyse-olie behandeld. In eerste instantie worden de specifieke eigenschappen van pyrolyse-olie besproken en daarna worden de verschillende toepassingsmogelijkheden aangehaald.

4.1 EIGENSCHAPPEN PYROLYSE OLIE

4.1.1 Samenstelling

Pyrolyse-olie bestaat uit een complexe mix van zuurstofgebonden koolwaterstoffen en een aanzienlijk gedeelte water. De complexiteit is te wijten aan de afbraak van lignine, cellulose en hemicellulose en andere organische componenten uit de oorspronkelijke biomassa (A. V. Bridgwater, 2003). De chemische samenstelling wordt weergegeven in tabel 2 (Bridgwater, 2002).

Tabel 2: Chemische samenstelling van pyrolyse-olie (Bridgwater, 2002)

Major components	Mass %
Water	20-30
Lignin fragments: insoluble pyrolytic lignin	15-30
Aldehydes: formaldehyde, acetaldehyde, hydroxacetaldehyde, glyoxal, methylglyoxal	10-20
Carboxylic acids: formic acid, propionic, butyric, pentanoic, hexanoic, glycolic (hydroxyacetic)	10-15
Carbohydrates: cellobiosan, α -D-levoglucosan, oligosaccharides, 1,6-anhydroglucofuranose	5-10
Phenols: phenol, cresols, guaiacols, syringols	2-5
Furfurals	1-4
Alcohols: methanol, ethanol	2-5
Ketones: acetol (1-hydroxy-2-propanone), cyclopentanone	1-5

Enkele belangrijke eigenschappen van pyrolyse-olie uit hout worden samengevat in onderstaande tabel (A. V. Bridgwater, 2003).

Tabel 3: Fysische eigenschappen en elementaire analyse van pyrolyse-olie uit hout (A. V. Bridgwater, 2003)

Fysische eigenschappen		Elementaire analyse		
Vochtgehalte	15-30 m%	Koolstof	C	55-58 %
pH	2.5	Waterstof	H	5,5-7,0 %
Specifieke zwaartekracht	1.20	Zuurstof	O	35-40 %
HHV (droog)	16-19 MJ/kg	Stikstof	N	0-0,2 %
Viscositeit (40°C)	40-100 cP	As		0-0,2 %

4.1.2 Voorkomen

Pyrolyse-olie is meestal een donkerbruine, vloeïende vloeistof. Afhankelijk van de initiële biomassa grondstof en de methode van snelle pyrolyse, kan de kleur ook zwart, donker roodbruin of donkergroen zijn. De kleur wordt beïnvloed door de aanwezigheid van micro-koolstof in de vloeistof en door de chemische samenstelling. Een hoog gehalte aan stikstof in de vloeistof geeft bijvoorbeeld een donkergroene tint (T. Bridgwater, 2007).

4.1.3 Geur

De pyrolyse-olie heeft een kenmerkende geur. Het is een rokerige geur die irritatie aan de ogen kan veroorzaken indien men lange tijd blootgesteld wordt aan de pyrolyse-olie. De olie bevat meer dan honderd verschillende chemische stoffen in sterk variërende proporties, gaande van het vluchtige formaldehyde en azijnzuur met een laag moleculegewicht tot complexe fenolen en anhydrosuikers met een hoog moleculegewicht (T. Bridgwater, 2007).

4.1.4 Higher Heating Value (HHV)

De HHV (of 'Gross Calorific Value') van pyrolyse-olie op basis van hout ligt volgens Bridgwater in een range van 16 tot 19 MJ/kg (of GJ/t) (A. V. Bridgwater, 2003). Snelle pyrolyse van wilgen vervuild met zware metalen (Cd, Cu, Pb en Zn) uit de Limburgse Kempen resulteerde in pyrolyse-olie met een HHV van 23 tot 27 MJ/kg. Nadat het water uit de tar werd gehaald, had de pyrolyse-olie een HHV van 20 tot 24 MJ/kg (Lievens, Carleer, Cornelissen, & Yperman, 2009)

4.1.5 Mengbaarheid

De pyrolyse-olie kan een variërende hoeveelheid water bevatten al naargelang de methode waarop de pyrolyse-olie werd geproduceerd en vervolgens opgevangen werd. Het water en de olie vormen een stabiele fase met een gewichtsperscentage van 15 m% tot een bovengrens van ongeveer 40 m% water. Pyrolyse-olie kan de toevoeging van een kleine hoeveelheid water aan, maar er is een

limiet aan de hoeveelheid water die kan worden toegevoegd voordat fasescheiding optreedt en de vloeistof met andere woorden niet opgelost kan worden in water. De pyrolyse-olie is mengbaar met polaire solventen zoals methanol, aceton, etc. De olie is echter niet mengbaar met uit aardolie verkregen brandstoffen (T. Bridgwater, 2007).

4.1.6 Dichtheid

De dichtheid van pyrolyse-olie (1.2 kg/l) is hoog vergeleken met lichte stookolie (0.85 kg/l). Hierdoor heeft de olie ongeveer 42% van de energie inhoud van stookolie op basis van gewicht, maar 61% op volumetrische basis. Hierbij moet bij het gebruik van de olie rekening gehouden worden. Het heeft bijvoorbeeld implicaties op het ontwerp en de specificatie van apparatuur zoals pompen van boilers en motoren (T. Bridgwater, 2007).

4.1.7 Viscositeit

De viscositeit van de pyrolyse-olie kan variëren van 25 cSt tot wel 1000 cSt (gemeten bij 40°C), afhankelijk van de gebruikte biomassa, de hoeveelheid water en de mate waarin de olie verouderd is. Viscositeit is een belangrijke eigenschap bij veel brandstofoepassingen (A. V. Bridgwater, 2003).

4.1.8 Destillatie

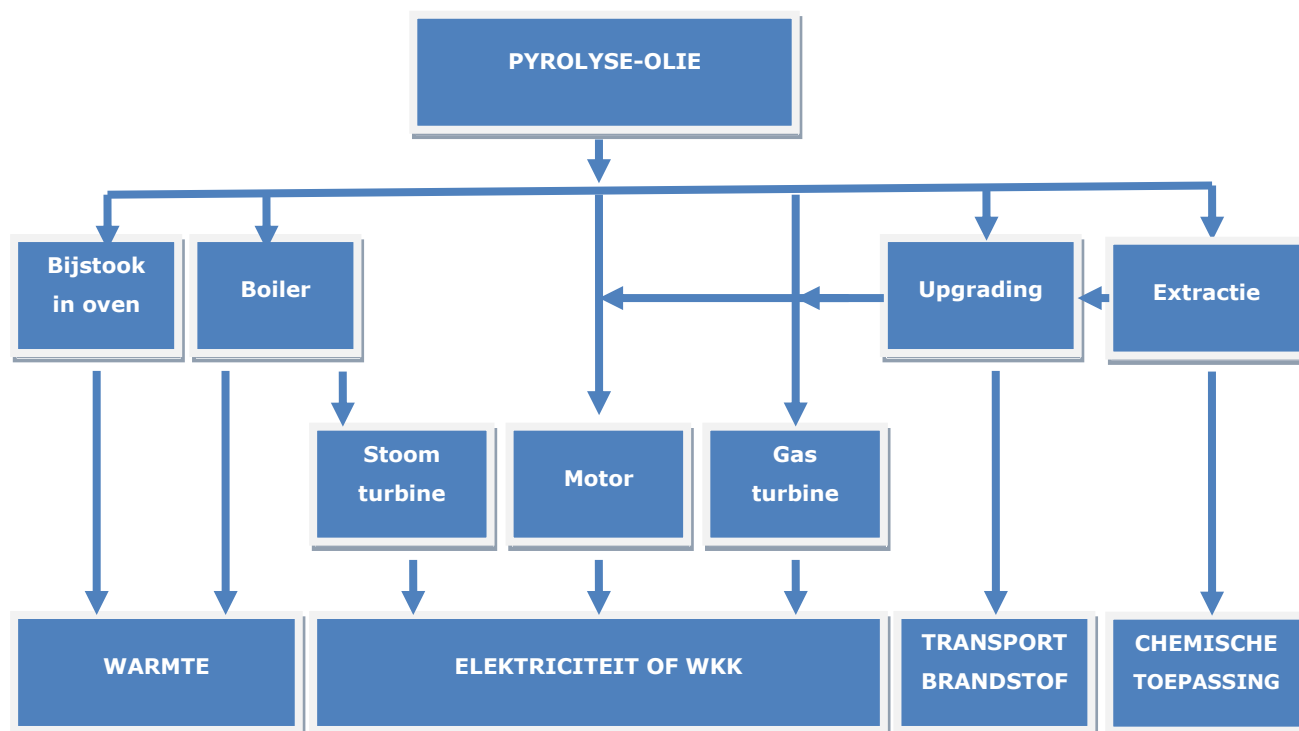
Pyrolyse-olie ontstaat door de condenseerbare pyrolysegassen snel af te koelen. Eenmaal de pyrolyse-olie vloeibaar is, kan ze niet volledig opnieuw verdampt worden. Indien de olie verhit wordt tot 100°C of meer om het water te verwijderen of om lichte fracties weg te destilleren, reageert de olie snel en wordt enerzijds een char residu geproduceerd met circa 50 m% van de originele vloeistof en anderzijds een destillaat van primaire en secundaire producten en water. De olie is dus chemisch onstabiel en dit effect neemt toe bij hogere temperaturen, zodat de olie bij voorkeur op kamertemperatuur wordt bewaard. Deze omzettingen doen zich ook voor bij kamertemperatuur, maar veel langzamer, zodat commerciële toepassingen van de olie wel mogelijk zijn. Pyrolyse-olie werd reeds succesvol opgeslagen in stalen en plastic vaten zonder dat aantasting van de olie het gebruik in tot dan toe geteste applicaties zou verhinderen (T. Bridgwater, 2007).

4.1.9 Veroudering

De complexiteit en de aard van de pyrolyse-olie zorgen voor een ongewoon gedrag, meer specifiek hebben bepaalde eigenschappen de neiging om met de tijd te veranderen. De viscositeit neemt toe, de volatiliteit neemt af en fasescheiding kan optreden (A. V. Bridgwater, 2003).

4.2 TOEPASSINGEN PYROLYSE-OLIE

Bridgwater et al. zien vier grote groepen toepassingsmogelijkheden voor pyrolyse-olie uit snelle pyrolyse: warmteproductie, elektriciteitsproductie, gebruik in transport-brandstoffen en gebruik in chemische toepassingen (A. V. Bridgwater, et al., 2002). Ook de Biomass Technology Group (BTG), ziet een classificatie van pyrolyse-olie in deze 4 grote groepen toepassingen. In figuur 8 worden de toepassingen van pyrolyse-olie weergegeven (aangepast uit A. V. Bridgwater, et al., 2002).



Figuur 8: Toepassingen pyrolyse-olie

4.2.1 Warmteproductie

In de meest eenvoudige situatie kan pyrolyse-olie gebruikt worden voor warmteproductie. De verbranding van pyrolyse-olie in conventionele oliegestookte boilers is op diverse plaatsen in de wereld onderzocht. Testen hebben uitgewezen dat pyrolyse-olie zware en lichte brandstofoliën kan vervangen in industriële toepassingen (Venderbosch & Prins, 2010). In onderstaande tabel worden de eigenschappen van pyrolyse-olie vergeleken met die van zware stookolie (A. V. Bridgwater, et al., 2002).

Tabel 4: Vergelijking van pyrolyse-olie en conventionele brandstofeigenschappen (A. V. Bridgwater, et al., 2002)

		Pyrolysis liquid	Diesel	Heavy fuel oil
Density	kg/m ³ at 15°C	1220	854	963
Typical composition	%C	48.5	86.3	86.1
	%H	6.4	12.8	11.8
	%O	42.5	–	–
	%S	–	0.9	2.1
Viscosity	cSt at 50°C	13	2.5	351
Flash point	°C	66	70	100
Pour point	°C	–27	–20	21
Ash	%wt	0.13	<0.01	0.03
Sulphur	%wt	0	0.15	2.5
Water	%wt	20.5	0.1	0.1
LHV	MJ/kg	17.5	42.9	40.7
Acidity	pH	3	–	–

Er zijn verschillende voorbeelden terug te vinden waarbij pyrolyse-olie gebruikt werd voor warmteproductie. Zo werd pyrolyse-olie gebruikt voor co-verbranding in een kolengebaseerde utility boiler bij de productie van elektriciteit in Manitowoc Public Utilities in Wisconsin. Pyrolyse-olie werd ook goedgekeurd als brandstof voor utility boilers in Zweedse districtverwarming. In Nederland (Harculo) werd in 2002 een succesvolle co-verbrandingstest met 15 ton pyrolyse-olie uitgevoerd in een 350 MWe aardgas gestookte elektriciteitscentrale (Venderbosch & Prins, 2010).

De verbranding van pyrolyse-olie in boilers van verschillende capaciteiten heeft enkele problemen en vraagstukken geïdentificeerd, die later in tabel 5 opgelijst staan. Sommige van deze problemen kunnen aangepakt worden door het verbeteren van de kwaliteit van de vloeistof, terwijl voor andere problemen aanpassingen aan de apparatuur zelf nodig zijn. Om pyrolyse-olie te gebruiken in boiler toepassingen moet aan volgende eisen voldaan worden: (a) voorverwarmen van de olie tot 70°-80°C onmiddellijk voorafgaand aan de verbranding om de viscositeit te reduceren tot 2-4cSt, (b) opstart en shutdown van de boiler op conventionele brandstof om afzet en carbonisatie van de sproeiers te voorkomen en (c) voldoende lage concentratie vaste stoffen in de olie (<0.1 m%) (Oasmaa, Peacocke, Gust, Meier, & McLellan, 2005).

4.2.2 Elektriciteitsproductie

In tweede instantie kan pyrolyse-olie gebruikt worden voor het opwekken van elektriciteit in dieselmotoren of gasturbines. Over het algemeen is de productie van elektriciteit interessanter dan

enkel de productie van warmte, omdat elektriciteit een hogere toegevoegde waarde heeft en dankzij de makkelijkere distributie (Venderbosch & Prins, 2010).

Momenteel bevinden **dieselmotoren** voor stationaire elektriciteitsproductie die werken op pyrolyse-olie zich in een vergevorderde onderzoeksfase. Verschillende tests werden uitgevoerd door dieselmotorfabrikanten zoals Ormrod Diesels en Wärtsilä Diesel, in samenwerking met onderzoeksinstituten zoals Ashton University, VTT, MIT en de Universiteit van Rostock (Venderbosch & Prins, 2010). In tabel 4 hierboven (A. V. Bridgwater, et al., 2002) wordt pyrolyse-olie vergeleken met diesel.

De eerste testen met dieselmotoren werden uitgevoerd door het Finse onderzoeksinstituut VTT op een 55-kWe Valmet motor die werd uitgerust met een pilot injectie. Er werd waargenomen dat, hoewel de pyrolyse-olie moeilijk te ontsteken was, de verbranding gemakkelijk verliep. Pyrolyse-olie met 5% ontstekingsverbeteraar gaf min of meer dezelfde uitlaatprestaties als de conventionele dieselbrandstof en betere uitlaatprestaties dan de referentiebrandstof (RF35) met een slechte ontstekingskwaliteit. Verdere testen werden uitgevoerd met een 60-kWe standaard viercilinder Valmet 420 DC motor, evenzeer uitgerust met een pilot injectie. De belangrijkste conclusies waren: wijzigingen voor de injectiepomp zijn noodzakelijk, injectoren vervaardigd uit een materiaal bestand tegen corrosie zijn meer tolerant voor pyrolyse-olie dan gewone injectoren, de verbranding van pyrolyse-olie verloopt vlot, de gemeten CO en HC emissies zijn aanzienlijk, maar een oxidatiekatalysator kan de emissies doen dalen tot een aanvaardbaar niveau (Oasmaa, et al., 2005).

Wärtsilä voerde een één-cilinder test uit in een Vasa 18V32 motor en testte eveneens verschillende materialen. De belangrijkste conclusies waren als volgt: een pilot injectie is nodig, de pyrolyse-olie verbrandt snel, de emissies zijn aanvaardbaar, de pyrolyse-olie moet een lage concentratie vaste stoffen bevatten, de calorische waarde van de pyrolyse-olie moet goed beheerst worden en de injectie uitrusting moet gemaakt zijn uit corrosiebestendige materialen. Het thermisch rendement bedroeg 44.9% en was bemoedigend. Wärtsilä stopte met onderzoek en ontwikkeling vanwege de slechte kwaliteit (dat wil zeggen, een te hoog gehalte aan vaste stoffen) van de toenmalige pyrolyse-vloeistoffen die beschikbaar waren (Oasmaa, et al., 2005).

Ormrod Diesels doet al sinds 1993 onderzoek naar het gebruik van pyrolyse-olie in een 250-kWe gemodificeerde dual-fuel dieselmotor en heeft veel ervaring opgedaan. Pyrolyse-vloeistoffen van Union Fenosa, BTG, Dynamotive en Ensyn zijn reeds getest. Het thermisch rendement van de motor bedroeg 34.3 m% bij het gebruik van diesel en 32.4 m% bij gebruik van pyrolyse-olie. In de uitstoot emissies is een stijging van CO en vermindering van NOx te zien bij het gebruik van pyrolyse-olie. Problemen en mogelijke oplossingen bij het gebruik van pyrolyse-olie zijn opgenomen in tabel 5 (Oasmaa, et al., 2005).

Tabel 5: Problemen gerelateerd aan het gebruik van pyrolyse-olie in boilers, motoren en turbines (Oasmaa, Peacocke, Gust, Meier, & McLellan, 2005)

Eigenschap	Gewenste specificatie	Waarde bij huidige technologie	Problemen	Mogelijke oplossingen
Variatie	Max. 10%	> 50 %	Veranderingen naargelang gebruikte grondstof en procesparameters	Systeem van kwaliteitscontrole
Water	< 27 m%	18-40 m%	Inhomogeniteit, fasescheiding (> 30 m% water)	Verhoging van de droogtemperatuur van de grondstof (< 50° C)
Totale vaste stoffen	< 0.01 m%	≤ 0.5 m%		Homogene partikelgrootte van de grondstof, hete gasfilter, drie cyclonen bij reactoruitgang, vloeistoffiltratie, centrifuge
Anorganische stoffen	< 0.01 m%	< 0.1 m%	Slijtage van injectors, verhoogde instabiliteit olie, hoge CO emissies	Keuze grondstof, hete gasfilter, drie cyclonen bij reactoruitgang, vloeistoffiltratie, centrifuge
Homogeniteit	Eén fase	Variatie	Ongelijke vloeistofkwaliteit	Vochtigheid grondstof < 12 m%, watergehalte < 27 m%
Stabiliteit	Max. 100% toename in viscositeit bij verouderings test	50% - 150%	Veranderingen in eigenschappen van de olie gedurende opslag en gebruik	Toevoeging van alcohol (methanol, 2-propanol)
Flash point	Afhankelijk per land	> 40°C	Veiligheidsreguleringen voor transport	Aanpassing vloeistof condensatietemperatuur
pH	FDS	2-3	Corrosie brandstofleidingen	Alle leidingen, vaten en pakkingen moeten zuurbestendig zijn
LHV	FDS	16-19 MJ/kg	50% minder dan brandstofolie, geen zelfontbranding bij start-up	Verhoging van de pompdruk voor de injectoren, verhoging diameter brandstofleidingen, duale brandstoftoevoer (%), modificatie verbrandingskamer
Viscositeit	FDS	> 50 cSt bij 20° C	Te hoog voor de meeste brandstofinjectors	Verwarming vloeistoffen om viscositeit te verminderen, toevoeging van cosolvent (alcohol), gebruik van emulsies
Lubriciteit	FDS	Niet bepaald	Ophopingen op de injectienaald en brandstof pomp	Verbetering van smering / vloeieigenschappen, additieven

In 2004 voerde PYTEC (Hamburg, Duitsland) een continue test van 12 uur uit op een dieselmotor in een WKK-installatie (Mercedes-Benz motor type OM 444 LA met 12 cilinders en inhoud van 22 liter). Gefilterde pyrolyse-olie van Fortum, Finland werd gebruikt zonder enige modificatie van de olie. Een speciaal online mengsysteem verzorgde toevoeging van 4 vol% dieselbrandstof. Het verbruik van pyrolyse-olie bedroeg 120 l/h en er werd circa 305 kW/h elektriciteit geproduceerd, die werd afgegeven op het elektriciteitsnet. De injectiesproeiers en de pomp werden aangepast, zodat ze zure media konden verdragen. De emissies van CO waren licht gestegen, alle andere emissies vielen binnen het aanvaardbare bereik (Oasmaa, et al., 2005).

De universiteit van Firenze heeft motortesten uitgevoerd met pyrolyse-olie emulsies. Emulgeren betreft het homogeniseren en mengen van twee stoffen die normaal niet met elkaar zouden mengen. Emulgeren kan worden beschouwd als een middel om de pyrolyse-olie te upgraden (Chiaramonti, Oasmaa, & Solantausta, 2007). De testen wezen uit dat het gebruik van emulsies van pyrolyse-olie in dieselmotoren minder aanpassingen aan de motor vereist dan gebruik van gewone pure pyrolyse-olie. De belangrijkste bevindingen van de testen waren dat de injector en de brandstofpomp gemaakt moeten worden van roestvrij staal of een vergelijkbaar materiaal en dat bijkomend onderzoek nodig is naar de erosie/corrosie eigenschappen emulsies (Oasmaa, et al., 2005).

Lange termijn demonstratieprojecten van pyrolyse-olie in dieselmotoren zijn niet voorhanden omdat grote hoeveelheden pyrolyse-olie niet beschikbaar zijn (Balat, Kirtay, & Balat, 2009). Uit de bestaande projecten kunnen we concluderen dat geringe wijzigingen van zowel de pyrolyse-olie als de dieselmotor ervoor zorgen dat pyrolyse-olie een aanvaardbaar substituut kan zijn voor dieselbrandstof in stationaire motoren. De belangrijkste wijzigingen hebben betrekking op de brandstofpomp, de behuizing en het injectiesysteem (Balat, et al., 2009). Opdat pyrolyse-olie gebruikt kan worden voor motortoepassingen moet aan volgende specificaties minimaal voldaan zijn: (a) voldoende lage concentratie vaste stoffen in de olie (<0.1 m%), (b) viscositeit in een range van 10-20 cSt, (c) variatie van fysieke en chemische eigenschappen binnen een range van 10% van de specificatie en (d) een betere smerende werking ('lubricity') (Oasmaa, et al., 2005).

Pyrolyse-olie kan ook gebruikt worden in **gasturbines**. Pioniertesten met pyrolyse-vloeistoffen werden uitgevoerd door Kasper et al. in een J26-T-29 gasturbine verbrandingsinstallatie opstelling in Teledyne CAE (USA) met trage pyrolyse-olie. Mozes en Bernstein concludeerden dat het noodzakelijk is om bij de ontwikkeling van brandstofsamenstellingen voor pyrolyse-vloeistoffen een kwaliteit en prijs te garanderen opdat bij de ontwikkeling van de motoren de kosten geminimaliseerd kunnen worden en bevredigende prestaties en duurzaamheid gegarandeerd kunnen worden. Ook Boucher et al. onderzochten pyrolyse-olie als brandstof voor gasturbines. De belangrijkste parameters wat betreft prestatie en duurzaamheid bij toepassing van pyrolyse-olie in gasturbines zijn: ontbranding, verbrandingsrendement, turndown ratio, uitlaatgassen, uitlaat CO,

NO_x en koolwaterstoffen, corrosie, erosie en afzetting (depositie), thermische stabiliteit en compatibiliteit van materialen (Chiaramonti, et al., 2007).

De industriële ontwikkeling van het gebruik van pyrolyse-olie in gasturbines wordt voornamelijk uitgevoerd door de Orenda, een divisie van de Magelan Aerospace Corporation (Canada) die onder andere industriële gasturbine pakketten aanbiedt aan haar klanten. Orenda zoekt actief naar opportuniteiten om hun Orenda GT2500 industriële turbine te doen werken op pyrolyse-olie (Venderbosch & Prins, 2010). De GT2500 turbine gebruikt normalerwijze dieselolie, dit in tegenstelling tot de gasturbines voor de luchtvaart, die standaard werken op kerosine. De GT2500 heeft bovendien een 'silo' type verbrandingskamer in plaats van een ringvormige verbrandingskamer die bij luchtvaartturbines gebruikt worden. 'Silo' type verbrandingskamers kunnen gemakkelijker aangepast worden, aangezien er een directe toegang tot de belangrijkste componenten aanwezig is en de dimensies veranderd kunnen worden (Chiaramonti, et al., 2007).

De eerste industriële ontwikkeling met snelle pyrolyse-olie in gasturbines werd uitgevoerd door Orenda in een experimenteel programma. Het betrof een 2.5 MWe class GT2500 turbomachine, ontworpen en geproduceerd door Mashproekt in Oekraïne. Er werden enkele voorbereidende acties genomen, zoals het voorverwarmen van de brandstof tot 70°C om de viscositeit te verminderen, het filteren van de assen/alkali-inhoud tijdens de productie van de pyrolyse-olie, het gebruik van materialen compatibel met de zuurheid van de biobrandstof (vb austenitisch roestvrij staal) en de opstart van de energiecentrale met standaard fossiele brandstof. Er werd een lage druk pyrolyse-olie aanvoersysteem ontworpen. De diesel en de pyrolyse-olie werden beiden voorverwarmd met hete glycol alvorens naar de hoge druk pompen geleid te worden. Ook de verbrander en het inspuitstuk werden aangepast om de lagere heating value van de pyrolyse-olie ten opzichte van dieselolie in rekening te brengen. Bovendien werd ook de 'hot section' herontworpen, zodat alle 'hot section' schoepen en bladen vervangen konden worden op de site zonder de gasturbine te moeten verwijderen. De noodzaak om deze onderdelen schoon te kunnen maken is een typische vereiste bij het gebruik van onconventionele brandstoffen in turbomachines. De GT2500 turbine werd voor het eerst met succes getest met 20 % diesel en 80 % pyrolyse-olie en dan met 100% pyrolyse-olie. Een korte periode van dieselwerking voor de shutdown was voldoende om te voorkomen dat zwart pyrolyse-teer zou afzetten op het mondstuk, de voering en de collector. Toch was er een hoeveelheid as afgezet op bepaalde hete gas onderdelen (Chiaramonti, et al., 2007).

Later heeft Orenda ook emissietesten uitgevoerd op de GT2500 turbine, waarbij gebruik werd gemaakt van DynaMotive en Ensyn pyrolyse-olie, evenals alternatieve brandstoffen zoals ethanol, biodiesel en ruwe bitumen olie. De turbine presteerde goed bij alle brandstoffen, bij verschillende belastingen en tijdens overschakeling van de brandstof. De turbine stabiliseerde snel na verhogingen en verlagingen van belasting. Er werd een stabiele werking aangetoond en een indrukwekkende turndown verhouding tussen ijdel en maximum vermogen (2,5 MWe), ongeacht de

gebruikte brandstof. Het doel van deze emissietesten was om een pakket voor elektriciteitsopwekking te verstrekken, een handling module voor commerciële exploitatie in de demonstratie-installatie in aanbouw in West Lorne, Ontario, Canada (Chiaromonti, et al., 2007).

Deze gasturbine in West Lorne, Canada is ontworpen om op meerdere brandstoffen te kunnen werken, zoals pyrolyse-olie op basis van hout en houtafvalproducten, ethanol, biodiesel en bitumen olie. De plant werd zo ontworpen om bij volcontinue output 2500 kW elektrisch vermogen en ~5400 kg/uur stoom af te zetten bij > 80% WKK efficiëntie (Venderbosch & Prins, 2010). De brandstof behandelingsmodule bestaat uit twee tanks voor diesel- en pyrolyse-olie. De pyrolyse-olie tank is uitgerust met een kachel en een mixer. Stroomopwaarts van de hogedrukpompen worden beide brandstoffen voorverwarmd met hete glycol, die op zijn beurt wordt voorverwarmd door stoom. Ethanol wordt gebruikt om de leidingen van het brandstofsysteem intern schoon te maken na werking op biobrandstof (Chiaromonti, et al., 2007).

In Europa werd minder bijgedragen aan de ontwikkeling van turbines op pyrolyse-olie. De universiteit van Rostock heeft het gebruik van pyrolyse-vloeistoffen getest in een kleine commerciële gasturbine met een nominaal elektrisch vermogen van 75 kW (T216 GT). Werking van de standaard gasturbine op pure pyrolyse-olie was niet mogelijk. Daarom werd een dual mode operatie beschouwd, waarbij de hoofdspuitmond met pyrolyse-olie gevoed wordt en de ontstekingspuitmond met dieselolie. De thermische belasting in de dual fuel modus was 580 kWth, ongeveer 73% van de thermische belasting in de standaard diesel-modus (791 kWth). Pyrolyse-olie vertegenwoordigde ongeveer 39% van de totale thermische input in de dual fuel modus (Chiaromonti, et al., 2007).

In de universiteit van Madrid werd tenslotte geëxperimenteerd met mengsels van pyrolyse-olie en ethanol in een gasturbine verbrander. Het doel van dit onderzoek was om het gebruik van pyrolyse-olie te onderzoeken in een standaard, niet-gemodificeerde gasturbine. Aangezien een niet-gemodificeerde gasturbine niet kan opereren met pure pyrolyse-olie, focuste de analyse zich op mengsels van pyrolyse-olie en ethanol, wat voor acceptabele viscositeit (<10 cSt) bij 80°C zorgt (Chiaromonti, et al., 2007).

4.2.3 Transportbrandstoffen

Biomassa is de enige hernieuwbare bron van gefixeerde koolstof, vandaar dat er aanzienlijke interesse bestaat in de productie van transportbrandstoffen en andere veelgebruikte chemicaliën via synthesesegas of syngas. Syngas vormt de basis voor de productie van quasi elke brandstof en chemische stof die tegenwoordig gebruikt wordt, inclusief conventionele en onconventionele transportbrandstoffen, alledaagse chemicaliën en speciale chemicaliën (T. Bridgwater, 2007).

Er bestaan twee onderzoekspistes om transportbrandstoffen te verkrijgen uit pyrolyse-olie die momenteel onderzocht worden: gasificatie van pyrolyse-olie gevolgd door synthese enerzijds en anderzijds hydroprocessing van pyrolyse-olie of gescheiden pyrolyse-olie (T. Bridgwater, 2007).

4.2.4 Chemische toepassingen

Vandaag de dag zijn enkele honderden chemische constituenten geïdentificeerd en er wordt meer en meer aandacht besteed aan het winnen van individuele componenten of families van chemicaliën uit pyrolyse-olie. De potentieel veel hogere waarde van speciale chemicaliën in vergelijking met brandstoffen kan ervoor zorgen dat de extractie van chemicaliën van zelfs kleine concentraties chemische stoffen haalbaar is. Een geïntegreerde aanpak om chemicaliën en brandstoffen te produceren biedt interessante mogelijkheden voor economische implementatie op korte termijn (A. V. Bridgwater, et al., 1999).

Chemicaliën die reeds gewonnen zijn uit pyrolyse-olie omvatten polyfenolen voor harsen met formaldehyde, calcium en/of magnesiumacetaat voor biologisch afbreekbare ijsbestrijders, meststoffen, levoglucosaan, hydroxyacetaldehyde en een reeks aroma's voor de levensmiddelenindustrie (A. V. Bridgwater, et al., 1999).

In deze masterproef ligt de focus op de twee eerste groepen toepassingen van pyrolyse-olie, namelijk warmte- en elektriciteitsopwekking. Bijkomend onderzoek zal verricht worden naar de toepassingsmogelijkheden van bovenvermelde technieken in warmtekrachtkoppeling. Hoewel ook volop onderzoek wordt gedaan naar de mogelijkheden van upgrading van pyrolyse-olie naar transportbrandstoffen en naar chemische toepassingen, vallen deze toepassingen van pyrolyse-olie buiten het bestek van deze masterproef en zal hier niet dieper op ingegaan worden.

HOOFDSTUK 5: WARMTEKRACHTKOPPELING

5.1 HET BEGRIP ENERGIE: WARMTE EN ELEKTRICITEIT

Het begrip energie wordt vaak aangeduid als de mogelijkheid om arbeid te verrichten. Zowel arbeid als energie worden aangeduid met dezelfde SI eenheid, de Joule (J), hoewel de verbruikseenheid kilowattuur (kWh) ook vaak gebruikt wordt, waarbij $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$. De twee belangrijkste vormen van energie die we beschouwen in verband met warmtekrachtkoppeling zijn thermische energie (warmte) en elektrische energie (elektriciteit). Hoewel warmte en elektriciteit allebei vormen van energie zijn, zijn ze niet gelijk(w)aardig. We kunnen de verschillende energievormen rangschikken volgens hun graad van omzetbaarheid, niet alle vormen van energie zijn namelijk volledig omzetbaar van de ene vorm in de andere. Deze mate van omzetbaarheid is dan een maatstaf voor de kwaliteit van de energie. We definiëren in dit licht de termen exergie en anergie. Exergie is het gedeelte van de energie dat volledig omzetbaar is, terwijl anergie dat deel is dat niet verder omzetbaar is (Cogen Vaanderen, 2006).

Elektriciteit wordt over het algemeen gezien als de meest kwalitatieve vorm van energie, aangezien het heel makkelijk kan worden omgezet in warmte of mechanische energie. Elektriciteit bestaat dus volledig uit exergie. Bovendien is elektriciteit makkelijk te transporteren. Warmte is daarentegen een energievorm van een mindere kwaliteit, die niet meer volledig kan worden omgezet in andere energievormen. Warmte bestaat dus naast exergie ook uit anergie, waarbij de grootte van beide aandelen bepaald wordt door de temperatuur. Al naargelang de warmte op lagere temperatuur beschikbaar is, neemt het aandeel anergie toe en neemt dus de kwaliteit van de warmte af (Cogen Vlaanderen, 2006).

5.2 CONVENTIONELE ENERGIEVOORZIENING

De behoefte aan energie van een gebouw bestaat over het algemeen voornamelijk uit warmte en elektriciteit. De gebruikelijke manier om te voldoen aan deze behoeften is door elektriciteit aan te kopen uit het lokale net en warmte zelf te genereren door een brandstof zoals olie of aardgas te verstoken. Elke energievorm wordt dus in een aparte installatie geproduceerd, we spreken dan ook van gescheiden opwekking.

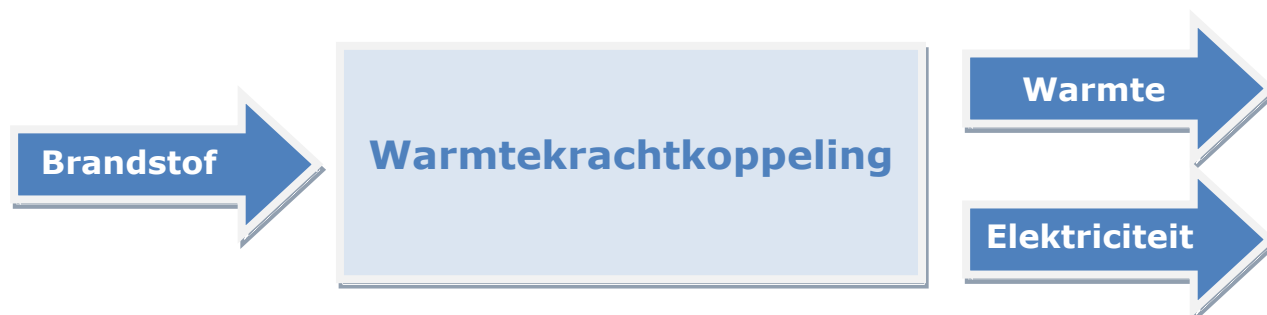
De elektriciteit wordt opgewekt in grote elektriciteitscentrales en via het net naar de eindverbruiker getransporteerd. Zoals hierboven reeds werd aangehaald is elektriciteit, in tegenstelling tot warmte, eenvoudig te transporteren zonder grote verliezen, waardoor het inderdaad mogelijk is elektriciteit te produceren op afstand van het verbruikspunt. Deze methode heeft een redelijk laag rendement; het Belgische elektriciteitscentralepark haalt een gemiddeld rendement van circa 40%.

De betere installaties, de stoom- en gascentrales (STEG's) halen een rendement van bijna 55%. De input energie die niet wordt omgezet in elektriciteit vervalt in de vorm van laagwaardige warmte. Aangezien er meestal geen lokale warmtegebruikers aanwezig zijn en warmte moeilijk te transporteren is, zal dit warmteverlies doorgaans niet gerecupereerd worden. De warmte verdwijnt in koelcircuits of komt samen met de uitlaatgassen terecht in de atmosfeer (Cogen Vlaanderen, 2006).

Warmte wordt, in tegenstelling tot elektriciteit, meestal wel ter plaatse bij de gebruiker opgewekt via een ketel of een boiler. Tijdens de verbranding van de brandstof wordt de chemische energie omgezet in warmte op hoge temperatuur. Het rendement van deze omzetting bedraagt gemiddeld 80% tot 90%. Voor verwarming van gebouwen en het gebruik van warmte in processen is meestal slechts warmte op een lagere temperatuur nodig, waardoor warmte geproduceerd wordt op een niet al te hoge temperatuur. Hierdoor wordt dus een energievorm van hoge kwaliteit, namelijk de chemische energie van de brandstof, gedegradeerd tot een energievorm van lage kwaliteit, met name de warmte op lage temperatuur die slechts in geringe mate omgezet kan worden in een andere energievorm. We kunnen besluiten dat bij gescheiden opwekking de energieverliezen van elektriciteitsproductie aanzienlijk zijn, terwijl bij de warmteproductie de energieverliezen beperkt zijn, maar de kwaliteitsverliezen of exergieverliezen wel belangrijk zijn (Cogen Vlaanderen, 2006).

5.3 DEFINITIE WARMTEKRACHTKOPPELING

In het Engels wordt warmtekrachtkoppeling vertaald als "Cogeneration" of ook wel als "Combined Heat and Power". Het samenspel van deze termen geeft duidelijk weer wat warmtekrachtkoppeling inhoudt. Warmtekrachtkoppeling is namelijk de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische) en nuttige thermische energie, uitgaande van eenzelfde primaire energiebron (Cogen Vlaanderen, 2006). Er wordt met andere woorden gelijktijdig elektriciteit en warmte opgewekt in dezelfde installatie.



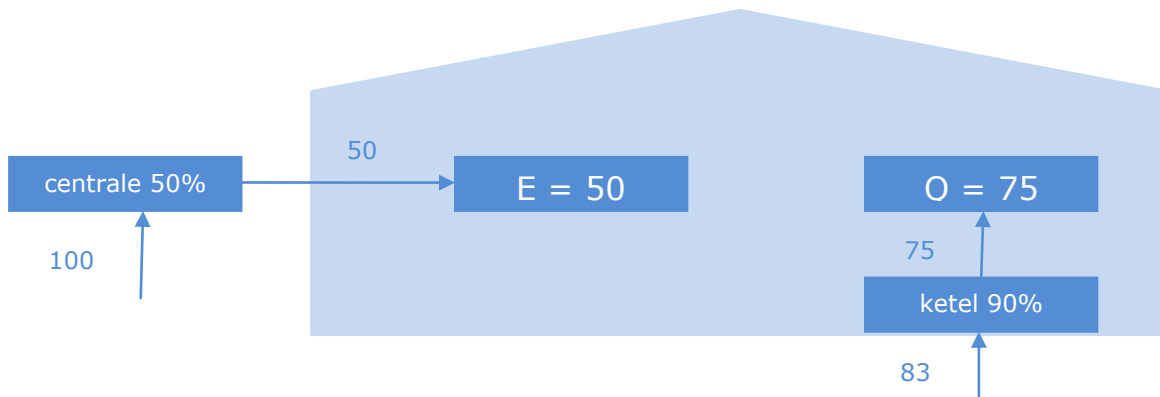
Figuur 9: Principe WKK

Bij het principe van warmtekrachtkoppeling wordt de hoogwaardige brandstof omgezet in hoogwaardige warmte, die gebruikt wordt voor het produceren van mechanische energie. Deze mechanische energie wordt daarna omgezet in elektriciteit, meestal via een alternator. Er blijft bij

dit proces altijd restwarmte over, die nuttig aangewend wordt om aan de warmtevraag van bijvoorbeeld een bedrijf, zwembad, ziekenhuis... te voldoen. We kunnen de opgewekte elektriciteit eigenlijk zien als een nuttig bijproduct van warmteproductie: in plaats van de hoogwaardige brandstof te laten degraderen tot warmte op lage temperatuur die nodig is voor de warmtevraag van de organisatie, wordt tijdens de degradatie met behulp van een turbine of motor elektriciteit geproduceerd. Een WKK wordt dan ook best op de warmtevraag gedimensioneerd. Een WKK heeft alleen maar zin als men de geproduceerde warmte ook nuttig kan gebruiken; als men de warmte niet nuttig kan gebruiken zal een WKK centrale een lager rendement hebben dan een STEG centrale. De reden hiervoor is dat indien een warmtegedimensioneerde warmtekrachtkoppeling een optimale hoeveelheid warmte produceert, maar een teveel aan elektriciteit opwekt voor het gebouw, deze elders nuttig gebruikt kan worden, aangezien elektriciteit gemakkelijk te transporteren is. Bij een elektrisch gedimensioneerde warmtekrachtkoppeling die een optimale hoeveelheid elektriciteit produceert, maar te veel warmte opwekt voor het gebouw, kan deze overtollige warmte niet altijd nuttig aangewend worden en moet ze misschien zelfs weggekoeld worden (Cogen Vlaanderen, 2006).

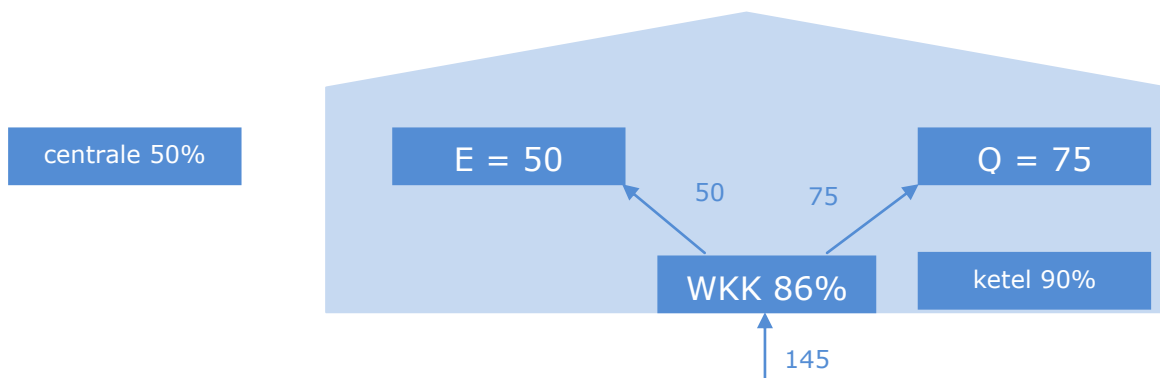
5.4 VOORBEELD BESPARING PRIMAIRE ENERGIE BIJ WKK

Energik (2004) toont met een voorbeeld aan dat bij een goed gedimensioneerde WKK aanzienlijk minder brandstof verbruikt wordt ten opzichte van gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte. Brandstof is primaire energie dus spreken we van een primaire energiebesparing. We beschouwen een bedrijf met een warmtevraag van 75 eenheden en een elektriciteitsbehoefte van 50 eenheden. In de conventionele situatie van gescheiden opwekking, wordt aan warmtevraag voldaan door middel van een ketel met een rendement η_Q van 90% en aan de elektriciteitsbehoefte door aankoop van elektriciteit van een elektriciteitsmaatschappij met een elektrisch rendement η_E van 50%. Om aan de warmtevraag te voldoen zijn dus 83 ($75/0.90$) eenheden primaire energie nodig en om aan de elektriciteitsbehoefte te voldoen zijn 100 ($50/0.50$) eenheden primaire energie nodig. Om aan de warmte- en elektriciteitsvraag te voldoen, zijn dus 183 eenheden primaire energie nodig en het totale rendement bedraagt 68% ($125/183$).



Figuur 10: Gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit (aangepast uit Energik, 2004)

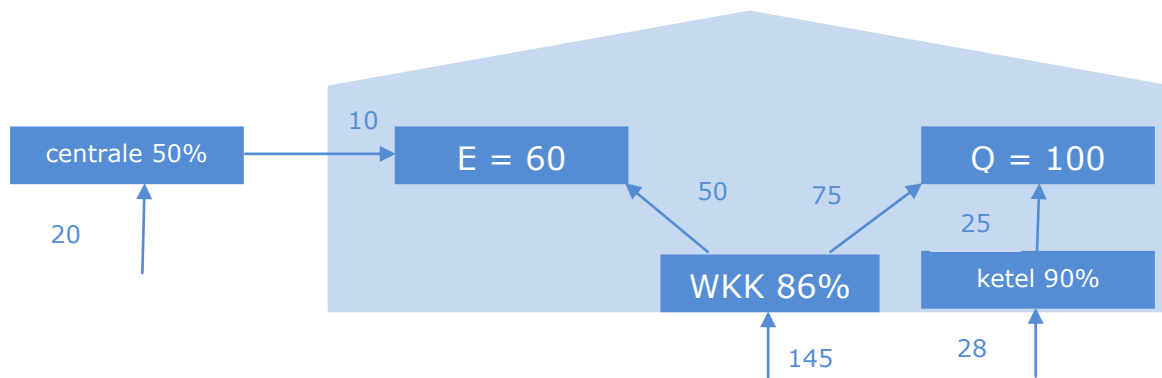
In de optimale situatie waarbij de totale energiebehoefte volledig kan worden opgevangen met een warmtekrachtsysteem, zouden we geen elektriciteit meer moeten aankopen van het net en ook niet meer moeten bijstoken met een ketel om aan de warmtevraag te voldoen. Een WKK met een thermisch rendement α_Q van 52% en een elektrisch rendement α_E van 34% kan in theorie precies aan de gevraagde warmtevraag van 75 eenheden en elektriciteitsvraag van 50 eenheden voldoen en heeft daarvoor $75/0.52 = 50/0.34 = 145$ eenheden primaire energie nodig. Het totale rendement van de brandstofbenutting bedraagt in dit geval 86% ($125/145$). Er zijn nu 38 ($183 - 145$) eenheden primaire energie minder nodig, wat overeenkomt met een daling van 21% ($-38/183$).



Figuur 11: Ideale situatie WKK: gezamenlijke opwekking van elektriciteit en warmte (aangepast uit Energik, 2004)

In praktijk zal de energievraag van een bedrijf niet op elk moment hetzelfde zijn aan de energie die een warmtekrachtkoppeling kan produceren, zodat de mogelijkheid om bijkomende energie te genereren op klassieke wijze voorzien moet worden. We beschouwen nu de situatie waarbij de warmtevraag 100 eenheden bedraagt, terwijl de WKK een thermische energie van 75 kan leveren en waarbij de vraag naar elektriciteit 60 eenheden bedraagt, terwijl de WKK 50 eenheden kan

leveren. Er moeten dus nog 10 ($60 - 50$) eenheden elektriciteit aangekocht worden en 25 ($100 - 75$) eenheden warmte opgewekt worden met behulp van een ketel. In deze situatie zijn 193 ($145 + 10/0.50 + 25/0.90$) eenheden primaire energie nodig ten opzichte van 231 ($100/0.90 + 60/0.50$) eenheden die nodig zouden zijn bij pure gescheiden opwekking. Het rendement bedraagt in deze situatie 83% ($160/193$) ten opzichte van 69% ($160/231$) bij pure gescheiden opwekking.



Figuur 12: Praktijksituatie WKK: combinatie WKK en gescheiden opwekking (aangepast uit Energik, 2004)

Uit bovenstaande voorbeelden wordt duidelijk dat men door het gebruik van een warmtekrachtkoppeling een aanzienlijke hoeveelheid brandstof kan besparen ten opzichte van de situatie van afzonderlijke opwekking.

5.5 VOORDELEN WARMTEKRACHTKOPPELING

Zoals in bovenstaand voorbeeld duidelijk werd, is een belangrijk voordeel van WKK dat de energie van de brandstof veel efficiënter benut wordt. Hierdoor is er bij WKK aanzienlijk minder brandstof nodig dan bij gescheiden opwekking van eenzelfde hoeveelheid elektriciteit en warmte. WKK is dus een interessante techniek om het verbruik van primaire energiebronnen, zoals fossiele brandstoffen, optimaal te benutten. De meeste warmtekrachtkoppelingen werken op fossiele brandstoffen, maar ook hernieuwbare energiebronnen zoals biomassa of biogas kunnen gebruikt worden. In deze masterproef wordt verondersteld dat de WKK op pyrolyse-olie zal draaien, wat natuurlijk een tweeledig voordeel oplevert: er wordt niet alleen een milieuvriendelijke brandstof gebruikt, deze wordt bovendien ook optimaal benut.

Een tweede voordeel, dat gerelateerd is aan de efficiëntere benutting van de brandstof, heeft te maken met een reductie van de luchtvervuiling. Aangezien de brandstof efficiënter benut wordt, is er minder brandstof nodig en worden er dus minder schadelijke stoffen zoals CO_2 , NO_x , CO , roet, SO_2 ... uitgestoten. In deze optiek wordt dus een bijdrage geleverd aan de eerste doelstelling van de 20-20-20 doelstellingen van Europa, namelijk om de hoeveelheid broeikasgassen tegen 2020

terug te dringen met 20%. Bovendien wordt thermische pollutie door bijvoorbeeld koelwater bij WKK bijna volledig vermeden, omdat er slechts een geringe behoefte aan koelwater is (Cogen Vlaanderen, 2006).

Bovenstaande voordelen van WKK ten opzichte van gescheiden productie van warmte en energie zijn vaak ondergeschikt aan de economische kant van het verhaal. De doorslaggevende factor die bepaalt of WKK toegepast wordt, is meestal de economische rendabiliteit. Indien de juiste technologie toegepast wordt, kunnen belangrijke kostenbesparingen qua brandstof gerealiseerd worden dankzij WKK, wat een derde voordeel oplevert.

Een laatste voordeel omvat de gereduceerde transportkosten en transportverliezen van elektriciteit. De elektriciteit wordt met een WKK relatief dichtbij de eindgebruiker opgewekt, waardoor het verlies aan energie door vervoer en distributie gering is (Cogen Vlaanderen, 2006).

5.6 TECHNOLOGIEËN WARMTEKRACHTKOPPELING

Het principe van gecombineerde productie van elektriciteit en warmte in een warmtekrachtinstallatie kan gerealiseerd worden via verschillende technologieën. Elke specifieke technologie heeft een eigen toepassingsgebied.

Grote, meestal industriële WKK-installaties, maken doorgaans gebruik van turbinetechnologie. Het betreft hier dan stoomturbines, gasturbines of een combinatie daarvan in een gecombineerde cyclus van een stoom- en gasturbine (Cogen Vlaanderen, 2006).

Voor kleinschaligere WKK toepassingen, wordt meestal een beroep gedaan op zuigermotoren. Er bestaan verschillende soorten zuigermotoren, maar in warmtekrachtinstallaties worden meestal Dieselmotoren of Ottomotoren gebruikt. De Ottomotoren worden ook wel gasmotoren genoemd, aangezien ze nagenoeg steeds gas gebruiken als brandstof. Wat de vermogensgrootte betreft, kunnen zuigermotoren een range van enkele kW tot enkele tientallen MW bestrijken (Stroobandt, 2007).

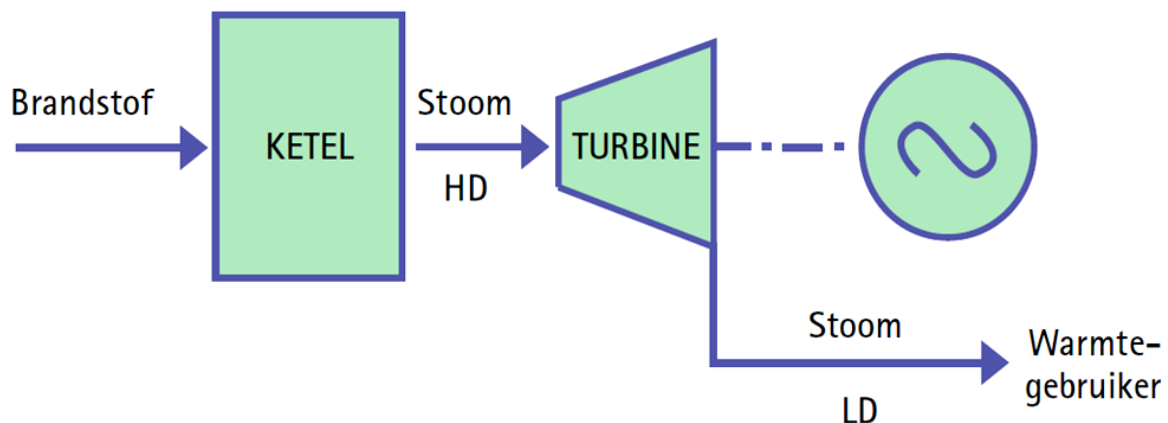
Naast de turbines en motoren bestaan er ook een aantal nieuwere technologieën en technologieën die op de rand van een marktdoorbraak staan. Een voorbeeld hiervan zijn de microturbines, die veel weg hebben van de grote turbines, maar die geschikt zijn voor kleinere vermogens. Er wordt ook onderzoek verricht naar technologieën als Stirlingmotoren, brandstofcellen en Organic Rankine Cycles (Cogen Vlaanderen, 2006). Deze nieuwe technologieën worden echter in deze masterproef niet besproken, aangezien in voorgaand hoofdstuk duidelijk werd dat pyrolyse-olie tot nu voornamelijk in turbines en motoren onderzocht werd.

5.6.1 Warmtekrachtkoppeling met turbines

Turbines worden voornamelijk toegepast in grote warmtekrachtinstallaties die een groot aantal draaiuren hebben. We onderscheiden in deze categorie stoomturbines, gasturbines en een gecombineerde cyclus van een stoom- en gasturbine.

5.6.1.1 Stoomturbines

Een stoomturbine is een van de oudste en meest verspreide technieken om een generator of machine aan te drijven. Het systeem van een stoomturbine is gebaseerd op de Rankinecyclus en bestaat uit 3 grote onderdelen: een warmtebron, een stoomturbine en een afvoer van warmte. In onderstaande figuur wordt de werking van een stoomturbine weergegeven (Cogen Vlaanderen, 2004).



Figuur 13: Werking stoomturbine (Cogen Vlaanderen, 2004)

Meestal wordt een ketel of boiler gebruikt als warmtebron om oververhitte stoom te produceren, met behulp van de warmte die vrijkomt bij de verbranding van een brandstof. In deze boiler kunnen allerlei soorten brandstof gebruikt worden, ook biomassa of afvalproducten, op voorwaarde dat de installatie voorzien is van de nodige apparatuur om de schadelijke uitstoot binnen te normen te houden (Cogen Vlaanderen, 2006). Het oververhitte stoom wordt door een turbine gestuurd, waar deze stoom expandeert en de turbine aandrijft. Een alternator zet de draaiende beweging om in elektrische energie. Na de turbine wordt de stoom gecondenseerd en teruggevoerd naar de ketel, zodat de cyclus kan herbeginnen (Cogen Vlaanderen, 2004).

Voor toepassing in warmtekrachtkoppeling bestaan er twee grote soorten stoomturbines, de tegendrukstoomturbine en de condensatieturbine met stoomaftap. Bij de tegendrukstoomturbine verlaat de stoom de turbine op een druk die hoger of gelijk aan is aan de atmosferedruk, afhankelijk van de warmtebehoefte. De stoom wordt dan toegevoerd aan een thermische belasting, waar deze stoom warmte afgeeft en condenseert. Het condensaat gaat terug het begin van de

cyclus (Cogen Vlaanderen, 2006). Bij de condensatiestoomturbine wordt een deel van de stoom afgetapt tijdens het expansieproces om aan een bepaalde warmtevraag te voldoen. De rest van de stoom wordt dan gecondenseerd en terug naar de stoomketel gestuurd (Cogen Vlaanderen, 2004).

Het uitgaand vermogen van een stoomturbine bedraagt meestal tussen de 0,5 tot 100 MW, hoewel ook hogere vermogens mogelijk zijn. Bij stoomturbines in WKK-toepassingen ligt de klemtoon vooral op warmteproductie. Het thermische rendement ligt tamelijk hoog en het elektrisch rendement tamelijk laag. Meestal bedraagt elektrisch rendement slechts circa 15% tot 20% (Cogen Vlaanderen, 2006).

Een belangrijk voordeel bij stoomturbines is dat de brandstof niet aan bepaalde kwaliteitseisen moet voldoen en dat er flexibiliteit is in de brandstof. De verbranding gebeurt bij de stoomturbine immers uitwendig, waardoor er geen direct contact is tussen vuurhaard en procesfluidum (stoom). Nagenoeg alle types brandstof kunnen dus verstoekt worden. In het vorige hoofdstuk werden met verschillende voorbeelden (Verenigde Staten, Zweden en Nederland) geïllustreerd dat (co)verbranding van pyrolyse-olie in boilers mogelijk is (Venderbosch & Prins, 2010).

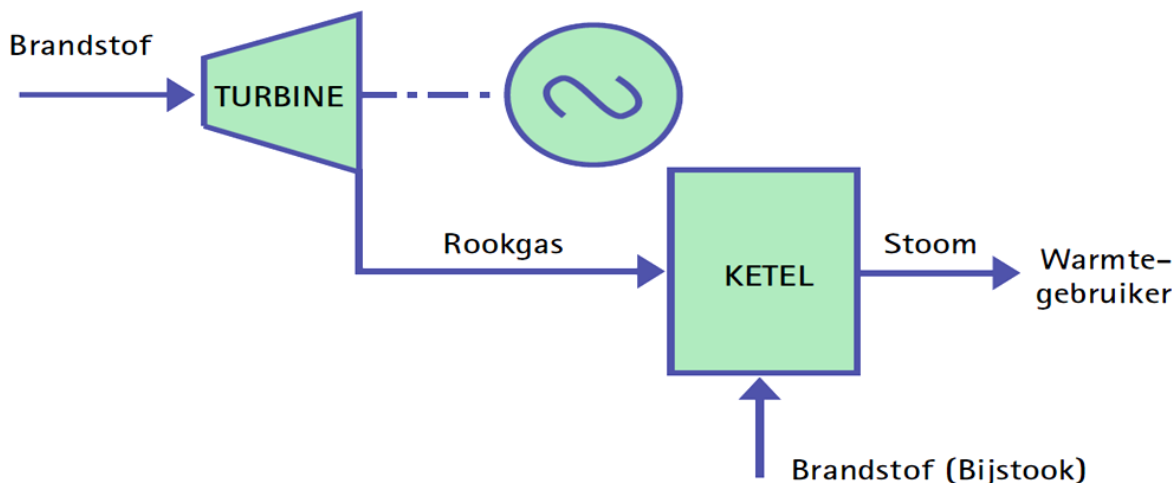
Een nadeel dat gepaard gaat met de uitwendige verbranding, is dat er bij de warmteoverdracht onvermijdelijk verliezen optreden (Cogen Vlaanderen, 2006).

5.6.1.2 Gasturbines

Gasturbines zijn ontwikkeld voor twee doeleinden, enerzijds als heavy-duty eenheden voor applicaties in industriële nutsvoorzieningen en anderzijds als efficiënte, compacte en lichte vliegtuigmotoren. Allebei de systemen zijn succesvol toegepast in WKK-installaties. Enkele belangrijke troeven zijn de hoge beschikbaarheid, lage installatiekosten, het snel en goedkope onderhoud, het hoge rendement bij grote afmetingen en de mogelijkheid verschillende soorten brandstoffen te gebruiken. Het elektrisch vermogen van een gasturbine kan variëren van enkele MW tot meerdere honderden MW (Cogen Vlaanderen, 2006).

Een gasturbine werkt volgens de thermodynamische principes van de Brayton-cyclus. Hierbij wordt atmosferische lucht aangezogen en in een compressor samengedrukt. Vervolgens wordt in de verbrandingskamer aan deze samengedrukte lucht brandstof toegevoegd en dit mengsel wordt ontstoken. Hierdoor ontstaan hete rookgassen op hoge druk, die over een turbine worden ontspannen. De turbine zal bijgevolg draaien en arbeid produceren, die via een generator omgezet wordt in elektrische energie. De uitlaatgassen verlaten de turbine echter op een aanzienlijke temperatuur van 450°C tot 600°C, waardoor recuperatie van de warmte op hoge temperatuur mogelijk is. Deze recuperatie vindt plaats in een afgassenketel, waar de warmte gebruikt wordt om stoom te produceren, die aangewend kan worden voor procesdoeleinden. Indien men hierbij wil

voldoen aan grote warmtebehoefte, kan eventueel de afgassenketel nog bijgestookt worden. Dit wil zeggen dat er nog een bijkomende hoeveelheid brandstof wordt verbrand samen met de zuurstof die nog in de rookgassen zit. In onderstaande figuur wordt het proces weergegeven (Cogen Vlaanderen, 2004).



Figuur 14: Werking gasturbine (Cogen Vlaanderen, 2004)

Het nominale elektrisch rendement van een WKK met gasturbine ligt tussen de 25% en de 40%, afhankelijk van de grootte van de installatie. Dit elektrisch rendement is tamelijk laag en de oorzaak kan gevonden worden bij de compressor, die vaak meer de helft van het nuttige vermogen opverbruikt voor zijn aandrijving (Cogen Vlaanderen, 2006).

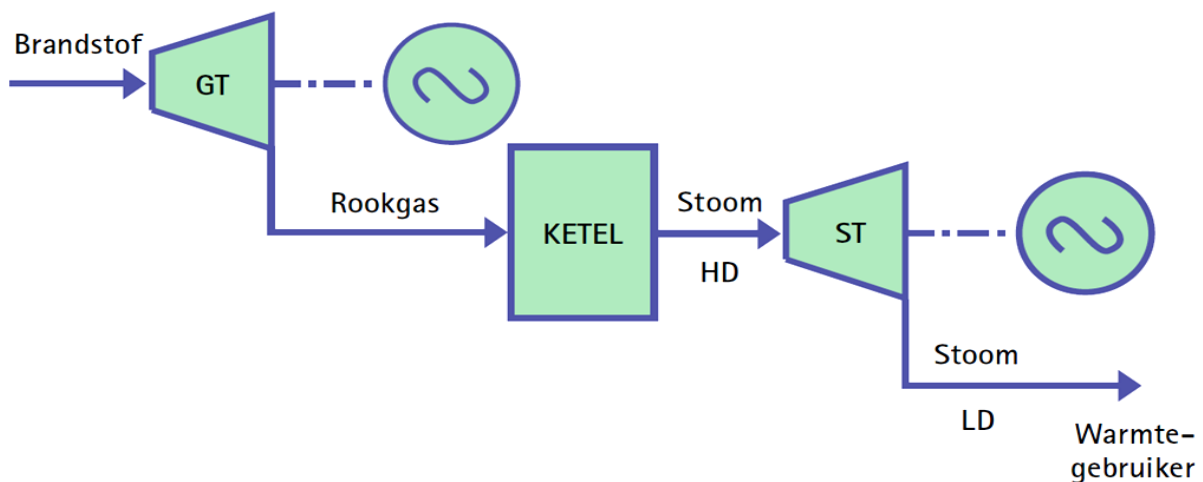
In tegenstelling tot de stoomturbine, is er bij de Brayton-cyclus wel sprake van een inwendige verbranding. Daardoor is een warmtekrachtinstallatie op basis van gasturbines kieskeuriger qua brandstofkeuze. De turbinebladen komen immers rechtstreeks in contact met de uitlaatgassen, waardoor deze uitlaatgassen best geen componenten bevatten die corrosie of erosie veroorzaken. Corrosie kan bijvoorbeeld ontstaan door ongunstige chemische samenstellingen van natrium, calcium, kalium, zwavel en vanadium en erosie kan bijvoorbeeld ontstaan door aanwezigheid van vaste deeltjes in de brandstof met een aanzienlijke grootte. Meestal wordt aardgas gebruikt als brandstof, maar ook lichte petroleum distillaten (zoals dieselolie en benzine) of producten verkregen uit koolvergassing kunnen gebruikt worden (Cogen Vlaanderen, 2006).

In het voorgaande hoofdstuk werd vermeld dat het voor de toepassing van pyrolyse-olie in gasturbines bepaalde vereisten gelden. Zo is vereist dat het aandeel vaste stoffen in de pyrolyse-olie kleiner moet zijn dan 0,1 m% en dat er geen partikels in de pyrolyse-olie aanwezig mogen zitten groter dan 10 μm (Oasmaa, et al., 2005). Bepaalde aanpassingen die noodzakelijk zijn aan de gasturbine, omvatten het modificeren van het toevoersysteem, dat de bio-olie op lage druk

moet invoeren, het herontwerp van schoepen en bladen van de turbine en het gebruik van roestvrij staal (Venderbosch & Prins, 2010).

5.6.1.3 *Gecombineerde Cyclus*

De stoomturbine en gasturbines die hierboven beschreven werden, kunnen ook gecombineerd worden. Zo bekomt men een installatie die werkt met 2 thermodynamische cycli. In onderstaande figuur wordt de werking van een gecombineerde stoom- en gasturbine weergegeven (Cogen Vlaanderen, 2004).



Figuur 15: Werking gecombineerde stoom- en gasturbine (Cogen Vlaanderen, 2004)

Bij een gasturbine wordt met behulp van de in de rookgassen aanwezige warmte stoom opgewekt in een afgassenketel. Eventueel kan de afgassenketel nog bijgestookt worden om de stoom op nog grotere temperatuur te brengen. Bij een gecombineerde cyclus, wordt de stoom niet aangewend om aan een warmtevraag te voldoen, maar wel om een stoomturbine aan te drijven. Op deze manier wordt er dus extra elektriciteit geproduceerd. De warmtebehoefte kan worden vervuld door tegendrukstoom of aftapstoom uit de stoomturbine (Cogen Vlaanderen, 2004).

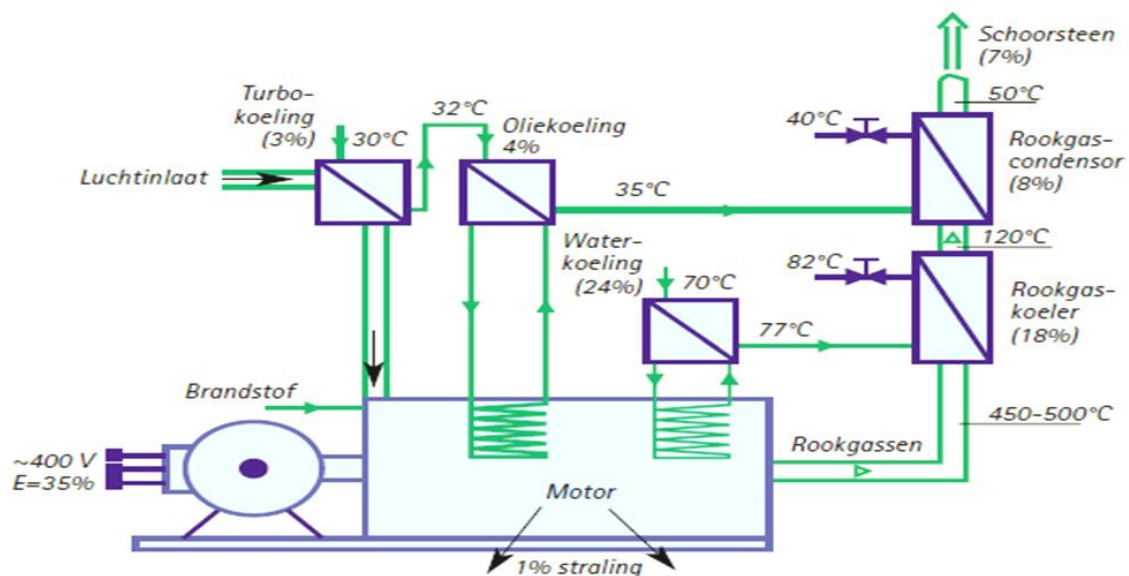
Het is evident dat een gecombineerde opstelling van een gasturbine en stoomturbine een hoger elektrisch rendement geeft. Het elektrische rendement ligt in een range van 35% tot 45%. Dit brengt wel een lager thermisch rendement met zich mee. De gecombineerde opstelling van een gasturbine en een stoomturbine kan vergeleken worden met STEG's die gebruikt worden voor elektriciteitsproductie. Bij deze installaties bestaat echter geen stoomvraag voor procesdoeleinden (Cogen Vlaanderen, 2006).

5.6.2 Warmtekrachtkoppeling met motoren

Er bestaan diverse soorten en types motoren, maar voor de toepassing ervan in warmtekrachtkoppeling worden quasi alleen zuigermotoren gebruikt met een inwendige verbranding. Wat betreft de vermogensgrootte bestrijken deze zuigermotoren een range die lager ligt dan deze van de turbines. De vermogens van zuigermotoren gaan van enkele kW tot enkele tientallen MW (Stroobandt, 2007). De twee meest frequent gebruikte zuigermotoren zijn de Dieselmotor en de Ottomotor, die ook wel gasmotor genoemd wordt, aangezien quasi altijd gas al brandstof wordt gebruikt.

Beide types motor (dieselmotor en gasmotor) hebben een cilindervormige verbrandingskamer, waarin een zuiger op en neer beweegt. Deze zuiger is met behulp van een krukstang en een drijfstaag verbonden met een roterende as. Op deze manier wordt de lineaire beweging van de zuiger omgezet in een roterende beweging. De roterende as drijft op zijn beurt een generator aan die elektriciteit produceert (Cogen Vlaanderen, 2004).

Bij werking van motor komt op verschillende plaatsen een aanzienlijke hoeveelheid warmte vrij. De belangrijkste warmtebronnen zijn de motorblokkoeling en de rookgassen. Ook bij de oliekoeling en (indien aanwezig) bij de intercooler komt warmte vrij. Het is wel een hele opgave om de warmte die vrijkomt nuttig aan te wenden, aangezien de warmte niet enkel vrijkomt op verschillende plaatsen, maar ook op verschillende temperatuurniveaus. Daarenboven is de warmte voorhanden op tamelijk lage temperaturen, zodat warmte meestal enkel geproduceerd kan worden in de vorm van warm water. In onderstaande figuur wordt warmteterugwinning bij een zuigermotor geïllustreerd (Cogen Vlaanderen, 2004).



Figuur 16: Werking warmteterugwinning zuigermotor (Cogen Vlaanderen, 2004)

Doorgaans is het thermisch rendement van een motor niet eenvoudigweg te bepalen. Hierbij spelen de temperatuur waarop de warmte gevraagd wordt en de temperatuur van het retourwater (dat terugkomt naar de motor) een grote rol. Deze temperaturen bepalen namelijk enerzijds welke warmtebronnen er gebruikt kunnen worden en anderzijds de schakelvolgorde van deze warmtebronnen. Al naargelang de vereiste temperatuur en de retourtemperatuur van het water kan dus het thermisch rendement verschillen. In de regel moet een thermisch rendement van 40% à 50% bij een zuigermotor haalbaar zijn (Cogen Vlaanderen, 2004).

Kleine en middelgrote zuigermotoren hebben een elektrisch rendement van circa 35% tot 40%. Grotere en modernere eenheden van enkele tientallen MW kunnen een rendement halen tot 50% (Cogen Vlaanderen, 2006). Ook het type motor heeft een invloed op het elektrisch rendement; dieselmotoren kunnen meestal grotere elektrische rendementen leveren dan gasmotoren.

Het gebruik van interne verbrandingsmotoren heeft enkele belangrijke voordelen. Een eerste troef is dat het gaat om een goed gekende, mature technologie. Op de markt zijn dan ook allerhande uitvoeringen beschikbaar van verschillende fabrikanten. Een investering in een motor is bovendien niet al te duur in vergelijking met een investering in een andere warmtekrachttechnologie met dezelfde grootte orde qua vermogen. Een ander pluspunt betreft de lange levensduur; een interne verbrandingsmotor kan tot 100.000 draaiuren meegaan, gegeven dat een grote revisie wordt uitgevoerd halverwege de levensduur (Cogen Vlaanderen, 2004).

Er zijn echter ook een aantal nadelen verbonden aan het gebruik van motoren in warmtekrachtkoppeling. Een eerste minpunt betreft de onderhoudskosten. Een motor bestaat uit veel bewegende componenten, denken we bijvoorbeeld maar aan de kleppen en de zuiger, waardoor de onderhoudskosten aanzienlijk zijn, zeker in vergelijking met concurrerende warmtekrachttechnologieën met eenzelfde vermogensgrootte. Deze onderhoudskosten vormen een belangrijke kostenpost in de economische analyse. Een tweede minpunt van de zuigermotor betreft het lawaai, dat ook te wijten is aan de aanwezigheid van bewegende onderdelen. Bij het gebruik van motoren moet ook opgelet worden met vervuilende emissies van NO_x en SO_x (Cogen Vlaanderen, 2006). Rookgasreiniging met behulp van een katalysator is vaak onontbeerlijk om aan de gestelde eisen te kunnen voldoen (Cogen Vlaanderen, 2004).

5.6.2.1 Ottomotor

Een Ottomotor in warmtekrachttoepassingen is gebaseerd op de thermodynamische Otto cyclus. Meestal hebben we te maken met een viertakt Ottomotor, waarbij vier afzonderlijke slagen onderscheiden worden: de inlaatslag, de compressieslag, de arbeidsslag of expansieslag en de uitlaatslag (Energik, 2004). Bij de inlaatslag wordt een mengsel van lucht en brandstof aangezogen in de cilinder. In de volgende slag, de compressieslag, wordt dit mengsel gecomprimeerd. Naar het

einde van de compressie toe gebeurt de ontsteking door een vonk die extern werd opgewekt. De voortschrijdende verbranding zorgt ervoor dat de druk in de cilinder stijgt en dat de zuiger teruggedrongen wordt. Er wordt op dit moment arbeid geleverd, vandaar dat we spreken van de expansieslag of arbeidsslag. In de laatste fase van de cyclus worden de hete rookgassen uit de cilinder gedreven (Cogen Vlaanderen, 2004).

Ottomotoren kunnen werken met verschillende brandstoffen, waaronder aardgas, benzine, biogas van waterzuiveringsinstallaties, propaan en stortgas (methaangas van afvalstorten). Ook pyrolysegas kan gebruikt worden in een Ottomotor. Ottomotoren worden soms aangeduid als "gasmotoren", omdat ze vaak werken met een gasvormige brandstof. Een van de belangrijkste eigenschappen van een gas om het te kunnen aanwenden in een gasmotor, is de klopvastheid. Deze klopvastheid wordt uitgedrukt door middel van een methaangetal (Cogen Vlaanderen, 2006).

5.6.2.2 *Dieselmotor*

Een dieselmotor in warmtekrachttoepassingen is gebaseerd op de thermodynamische dieselcyclus. Net zoals bij de viertakt Ottomotor kunnen bij de viertakt dieselmotor vier afzonderlijke slagen onderscheiden worden. Ook hier wordt gesproken over de inlaatslag, de compressieslag, de arbeidsslag of expansieslag en de uitlaatslag (Energik, 2004). Bij de inlaatslag wordt nu echter enkel lucht ingebracht in de cilinder in plaats van een mengsel van lucht en brandstof. Bij de compressieslag wordt de ingevoerde lucht samengedrukt op zulke manier dat een temperatuur bereikt wordt die hoger is dan de ontstekings temperatuur van de brandstof. Even voor het einde van de compressieslag wordt fijn vernevelde brandstof ingespoten in de cilinder, waardoor ontbranding plaatsvindt. Er moet in dit geval dus geen gloeikaars (bougie) worden ontstoken om het mengsel te doen branden, dit gebeurt hier spontaan. Door de verbranding komt er een drukstijging tot stand die ervoor zorgt dat de zuiger wordt teruggedreven, er wordt dus met andere woorden arbeid geleverd en we spreken dan ook van de expansieslag of arbeidsslag. Ook in dit geval wordt deze arbeid omgezet in een roterende beweging en zo in elektriciteit. In de laatste fase worden de rookgassen uitgedreven uit de cilinder (Cogen Vlaanderen, 2004).

Dieselmotoren werken op hogere temperaturen en drukken, waardoor zwaardere brandstoffen gebruikt worden dan bij Ottomotoren. Meestal gaat het om diesel olie en fuel olie. Ook residuele fuel kan gebruikt worden bij grote tweetaktmotoren (Cogen Vlaanderen, 2006).

Dieselmotoren halen over het algemeen een enigszins hoger rendement dan gasmotoren. Het thermisch rendement ligt meestal wel lager, aangezien men geen rookgascondensatie mag toepassen vanwege de zwavelinhoud van de brandstof. Momenteel worden dieselmotoren in warmtekrachtkoppeling niet meer zoveel toegepast, de nadruk ligt eerder op gasmotoren. Dieselmotoren hebben wel weer potentieel in de sector van de bio-olie (Stroobandt, 2007).

In het voorgaande hoofdstuk werd aangehaald dat wereldwijd al verschillende projecten met pyrolyse-olie in dieselmotoren werden uitgevoerd. Lange termijn demonstratieprojecten van pyrolyse-olie in dieselmotoren zijn echter niet voorhanden omdat grote hoeveelheden pyrolyse-olie niet beschikbaar zijn (Balat, et al., 2009). Uit de bestaande projecten kunnen we concluderen dat geringe wijzigingen van zowel de pyrolyse-olie als de dieselmotor ervoor zorgen dat pyrolyse-olie een aanvaardbaar substituut kan zijn voor dieselbrandstof in stationaire motoren. De belangrijkste wijzigingen hebben betrekking op de brandstofpomp, de behuizing en het injectiesysteem (Balat, et al., 2009). Opdat pyrolyse-olie gebruikt kan worden voor motortoepassingen moet aan volgende specificaties minimaal voldaan zijn: (a) voldoende lage concentratie vaste stoffen in de olie (<0.1 m%), (b) viscositeit in een range van 10-20 cSt, (c) variatie van fysieke en chemische eigenschappen binnen een range van 10% van de specificatie en (d) een betere smerende werking ('lubricity') (Oasmaa, et al., 2005).

HOOFDSTUK 6: EUROPESE RICHTLIJNEN EN HET VLAAMSE ENERGIEBELEID

Een Europese Richtlijn is een wetgevend instrument van de Europese Unie die doelstellingen vastlegt waaraan EU-landen moeten voldoen. De lidstaten moeten de Europese Richtlijnen tijdig in hun wetgeving opnemen, maar ze hebben de keuze qua vorm en middelen van implementatie (Europese Unie, 2011). De Europese Unie heeft het afgelopen decennium twee Richtlijnen gepubliceerd die de opwekking van energie met warmtekrachtkoppeling enerzijds en met hernieuwbare energiebronnen anderzijds stimuleert en die in het kader van deze masterproef dus relevant zijn.

6.1 EU-RICHTLIJN 2004/8/EG: WARMTEKRACHTKOPPELING

In de Europese Richtlijn 2004/8/EG wordt een kader gecreëerd voor de bevordering en ontwikkeling van hoogrenderende warmtekrachtkoppeling op basis van een economisch aantoonbare warmtevraag, waarbij gelijktijdig thermische en elektrische of mechanische energie opgewekt wordt. Het motief van de uitvaardiging van deze richtlijn heeft meerdere aspecten. Warmtekrachtkoppeling kan helpen bij de totstandkoming van de energiedoelstellingen van de Europese Unie. Het is een beproefd hulpmiddel waarmee het energierendement vergroot wordt en energie wordt bespaard. Bovendien helpt warmtekrachtkoppeling bij de bestrijding van de klimaatsverandering door de CO₂-uitstoot te beperken en de netwerkverliezen te verkleinen. Tot slot kan warmtekrachtkoppeling het concurrentievermogen verbeteren door ontwikkeling van hoogrenderende WKK technologieën die exportpotentieel hebben (Europese Commissie, 2008).

De Richtlijn vraagt de lidstaten om op nationaal niveau diverse steunmaatregelen uit te werken om nuttige energieproductie op basis van WKK te stimuleren, zoals investeringssteun, belastingvrijstellingen of -verlagingen, groencertificaten en directe prijssteunregelingen. De steunregelingen moeten een looptijd van minstens 4 jaar hebben en frequente veranderingen in administratieve procedures moeten vermeden worden om een stabiele economische en administratieve omgeving voor investeringen te creëren. De steun mag enkel gegeven worden aan 'hoogrenderende' warmtekrachtkoppelingen en de warmtekrachtproducent moet de opgewekte warmte nuttig kunnen aanwenden (Europees Parlement en de Raad, 2004).

De lidstaten dienen ook een systeem van "garanties van oorsprong" op te stellen. Garanties van oorsprong zijn documenten die aangeven op welke locaties en met welke energiebronnen de geleverde elektriciteit werd opgewekt. Bovendien vermelden ze de primaire brandstofbesparing die de warmtekrachtkoppeling realiseert. Deze garanties van oorsprong laten de consument toe een

doelbewuste keuze te kunnen maken voor elektriciteit uit warmtekrachtkoppeling, aangezien de documenten aantonen dat de leverancier effectief stroom heeft opgewekt met behulp van een hoogrendabele WKK (Europees Parlement en de Raad, 2004).

Richtlijn 2004/8/EG werd door de Vlaamse regering omgezet in het Besluit van de Vlaamse regering ter bevordering van elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties. Dit besluit past het bestaande besluit inzake warmtekrachtcertificaten van 2004 aan en implementeert de Europese vereisten en definities in de Vlaamse wetgeving. In het volgende hoofdstuk wordt het systeem van warmtekrachtcertificaten in Vlaanderen verder uitgelegd. Zowel de voorwaarden waaraan installaties moeten voldoen om recht te hebben op de steun als de berekening van het aantal certificaten waarop men recht heeft worden hierbij besproken.

6.2 EU-RICHTLIJN 2009/28/EG: HERNIEUWBARE BRONNEN

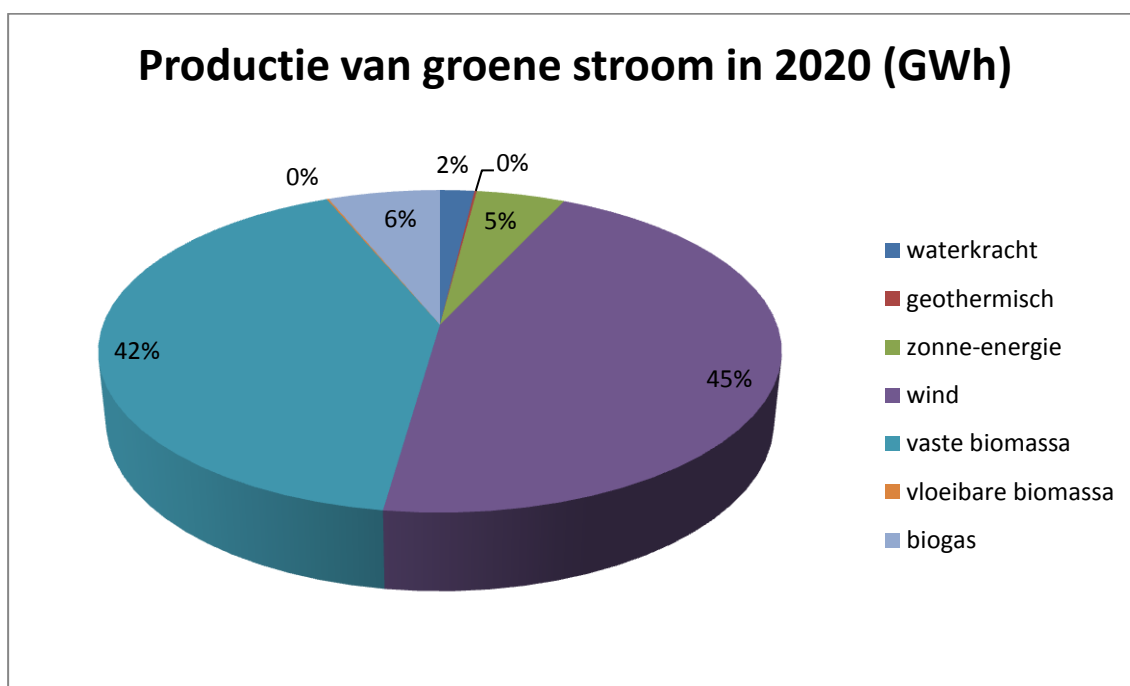
In Richtlijn 2009/28/EG wordt een kader vastgelegd voor het bevorderen van energie uit hernieuwbare bronnen. De richtlijn werd afgekondigd in navolging van de Europese goedkeuring van de 20/20/20 doelstellingen die bepalen dat 20% van het finale energieverbruik in de EU in 2020 opgewekt moet zijn uit hernieuwbare energiebronnen. Elke lidstaat krijgt bindende nationale streefcijfers opgelegd voor het totaal aandeel van energie uit hernieuwbare bronnen in het bruto-eindverbruik van energie en voor het aandeel van energie uit hernieuwbare bronnen in het vervoer. België krijgt 13% opgelegd als streefcijfer voor het aandeel energie uit hernieuwbare bronnen in het bruto-eindverbruik van energie (Europees Parlement en de Raad, 2009).

De Raad meent dat overheidssteun noodzakelijk is om de doelstellingen in verband met de productie van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen te kunnen realiseren zolang de elektriciteitsprijzen niet de volledige ecologische en sociale kosten en voordelen van de gebruikte energiebronnen reflecteren. Een steunregeling is een instrument dat het gebruik van hernieuwbare bronnen bevordert door de kosten van deze energievorm te verlagen, de verkoopprijs te verhogen of het volume aangekochte energie te vergroten. Dit laatste kan gebeuren door de energieproducenten te verplichten een welbepaald aandeel hernieuwbare energiebronnen in hun productie op te nemen of door de consument te verplichten een gedeelte van hun energieverbruik uit hernieuwbare bronnen te halen (Europees parlement en de Raad, 2009).

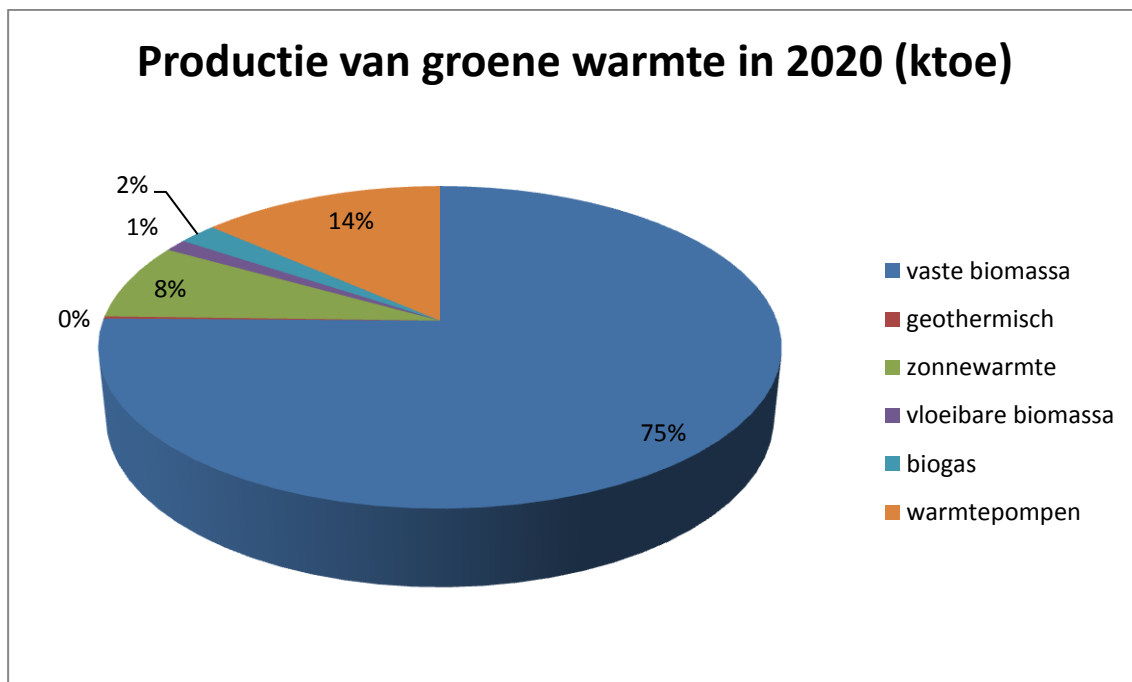
De Raad laat de lidstaten ook toe hun energiedoelstellingen te realiseren door een statistische overdracht van een gespecificeerde hoeveelheid energie uit hernieuwbare bronnen van de ene lidstaat naar de andere. Ook gezamenlijke projecten tussen lidstaten onderling zijn mogelijk (Europees parlement en de Raad, 2009).

In de richtlijn wordt aan alle lidstaten gevraagd een actieplan op te stellen waarin de maatregelen beschreven staan om de verwezenlijking van de opgelegde doelstellingen te behalen. In het plan moeten ook streefcijfers worden opgenomen van het aandeel energie uit hernieuwbare bronnen verbruikt voor elektriciteit, vervoer, verwarming en koeling in 2020.

Op 1 december 2010 werd het Belgisch actieplan hernieuwbare energie ingeleverd bij de Europese commissie, 5 maanden na het verlopen van de uiterste indiendatum. België streeft ernaar de vereiste 13% hernieuwbare energie zelf op te wekken, maar laat wel nog de mogelijkheid open om desnoods die doelstelling te verwezenlijken met projecten elders in Europa. In het plan worden de bestaande maatregelen voor bevordering van hernieuwbare energie opgesomd. In het actieplan wordt ook vermeld wat de verwachte bijdrage van verschillende hernieuwbare energiebronnen is in 2020 (Energie Overleggroep Staat-Gewesten ENOVER/CONCERE, 2010). In onderstaande grafieken worden de aandelen van de verschillende hernieuwbare energiebronnen voor opwekking van respectievelijk groene stroom en voor opwekking van groene warmte weergegeven. Zoals duidelijk is weergegeven in onderstaande grafieken, wordt het grootste aandeel verwacht van vaste biomassa. Vloeibare biomassa, waar ook pyrolyse-olie onder valt, wordt verwacht slechts een geringe bijdrage te hebben in de productie van groene stroom en warmte.



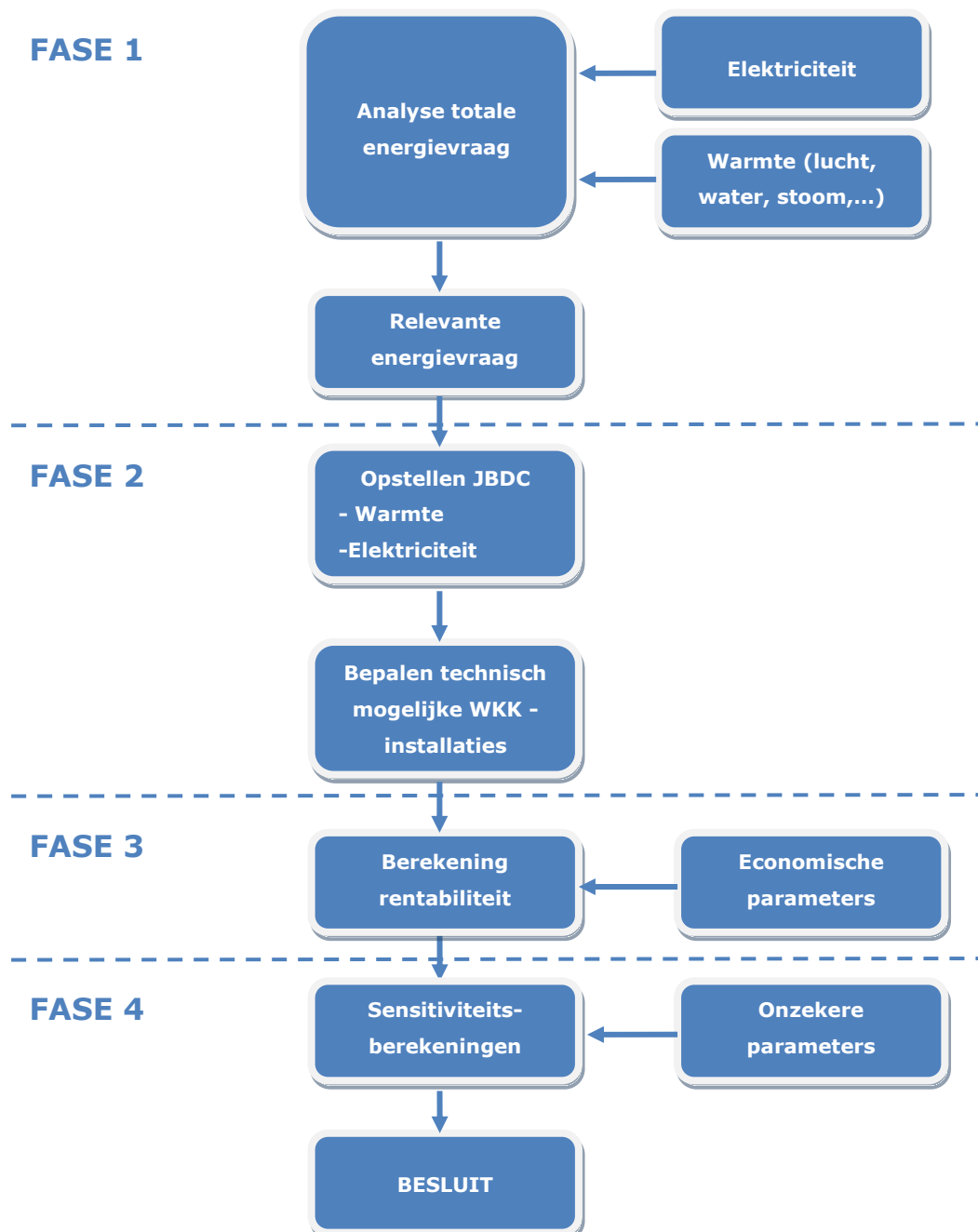
Figuur 17: Verwachte productie van groene stroom uit hernieuwbare energie in 2020 (GWh) (grafiek opgesteld met cijfers uit het actieplan hernieuwbare energie)



Figuur 18: Verwachte productie van groene warmte uit hernieuwbare energie in 2020 (ktoe) (grafiek opgesteld met cijfers uit het actieplan hernieuwbare energie)

HOOFDSTUK 7: AANPAK HAALBAARHEIDSONDERZOEK

Om de financiële haalbaarheid van een warmtekrachtkoppeling bij de verschillende gevalstudies te onderzoeken, wordt in dit onderzoek gesteund op de structuur van Energik (2004). In onderstaande figuur wordt de structuur weergegeven van een haalbaarheidsonderzoek (aangepast uit Energik, 2004).



Figuur 19: Structuur van een haalbaarheidsstudie (aangepast uit Energik, 2004)

Zoals in bovenstaande figuur duidelijk is, verloopt de haalbaarheidsstudie in vier grote fasen. Een eerste fase bestaat uit een analyse van de energievraag, waarbij zowel de warmte- als elektriciteitsvraag geanalyseerd worden. In de tweede fase worden aan de hand van jaarbelastingduurcurves de technisch mogelijke installaties bepaald. In de derde fase wordt de rendabiliteit onderzocht aan de hand van maatstaven als de netto contante waarde (NCW), de interne rendementsvoet en de verdisconteerde terugverdientijd. Tot slot wordt er een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd, aangezien we met onzekere parameters en schattingen werken.

7.1 FASE 1: ANALYSE ENERGIEVRAAG

Kennis van de energievraag is onmisbaar om een warmtekrachtsysteem op een correcte manier technisch te dimensioneren. Indien door een verkeerde analyse van de energievraag de WKK niet correct gedimensioneerd wordt, kan dit verregaande gevolgen hebben op economisch vlak. Het uitgangspunt van de haalbaarheidsstudie is dan ook een analyse van de energievraag.

De meest nauwkeurige informatie wordt bekomen door het verbruik effectief gedetailleerd te meten. Metingen brengen echter een aanmerkelijke kost met zich mee en kunnen heel wat tijd vergen. Een alternatieve methode om het verbruik in te schatten, is door facturen van elektriciteit en brandstof te analyseren (Cogen, 2006).

De totale energievraag is niet per definitie gelijk aan de voor een warmtekrachtkoppelingssysteem relevante energievraag. In bepaalde gevallen bestaat de voor de WKK relevante energievraag slechts uit een deel van de totale energievraag, zoals wanneer de activiteiten van het bedrijf verspreid zijn over meerdere gebouwen (Energik, 2004).

Ook moet rekening gehouden worden met verspillingen die in de toekomst makkelijk te vermijden zijn door bijvoorbeeld energiebesparingen, zoals betere isolatie, energiezuinige toestellen... Men moet er rekening mee houden dat deze besparingsmaatregelen best ingevoerd worden alvorens te investeren in een warmtekrachtinstallatie, anders zal de installatie overgedimensioneerd zijn en dit komt de rentabiliteit niet ten goede (Daoud & Lebbe, 2009).

7.2 FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES

Nadat men een globaal beeld heeft van de energievraag van de organisatie, kan men overgaan tot het bepalen van de keuze qua technologie voor de warmtekrachtkoppelingssysteeminstallatie.

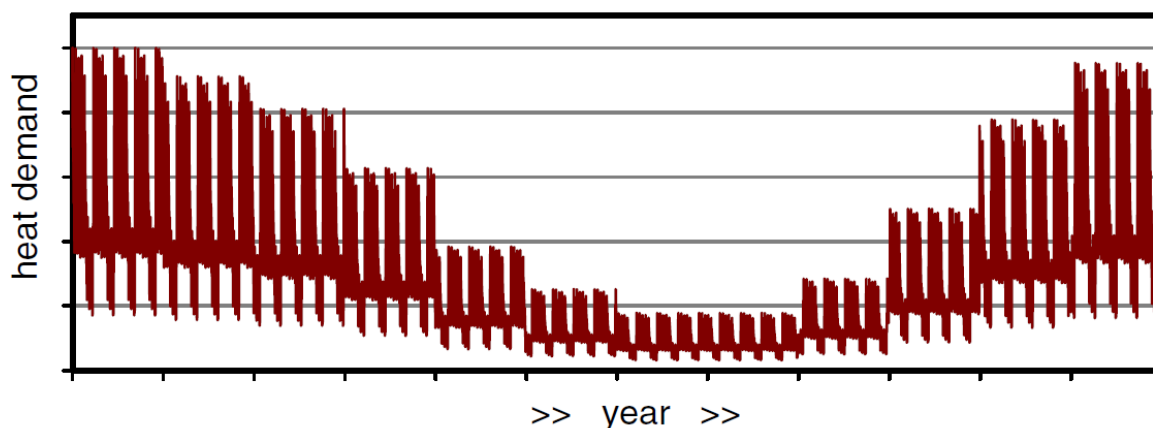
Een eerste onderscheid qua type technologie wordt gebaseerd op het temperatuurniveau waarop men de warmte in het bedrijf nodig heeft. Indien de temperatuur van de benodigde warmte lager

ligt dan 120°C, wordt best gekozen voor een WKK met motor (gasmotor of dieselmotor). Indien de temperatuur hoger ligt dan 120°C, wordt best geselecteerd voor een WKK met turbine (gasturbine, stoomturbine of STEG) (Energik, 2004).

Om de optimale dimensionering te bepalen, wordt vervolgens een jaarbelastingduurcurve opgesteld. In zulke jaarbelastingduurcurve, ook wel monotoondiagram genoemd, wordt de elektrische of thermische belasting uitgezet in functie van de belastingduur, waarbij de x-as 1 jaar of 8760 uren voorstelt (Energik, 2004).

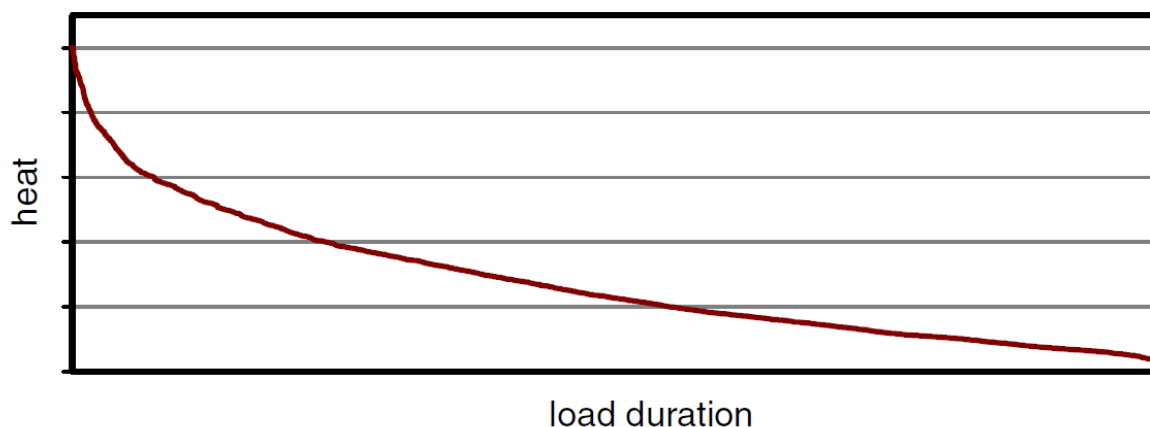
Meestal gebeurt de dimensionering op basis van het thermische vermogen. De reden hiervoor is dat indien een warmtegedimensioneerde warmtekrachtkoppeling een optimale hoeveelheid warmte produceert, maar een teveel aan elektriciteit opwekt voor het gebouw, deze elders nuttig gebruikt kan worden, aangezien elektriciteit gemakkelijk te transporteren is. Bij een elektrisch gedimensioneerde warmtekrachtkoppeling die een optimale hoeveelheid elektriciteit produceert, maar te veel warmte opwekt voor het gebouw, kan deze overtollige warmte niet altijd nuttig aangewend worden en moet ze misschien zelfs weggekoeld worden, wat erg in contradictie is met de opzet van het gebruik van een warmtekrachtinstallatie (Cogen Vlaanderen, 2006).

Om een jaarbelastingduurcurve op te stellen, vertrekt men meestal van het jaarpatroon van de warmtevraag. Het jaarpatroon geeft de warmtevraag weer op elk ogenblik van het jaar. Een typisch aggregaat chronologisch jaarpatroon voor de dienstensector (kantoorgebouwen, ziekenhuizen, sportcenters, ...) wordt weergegeven in onderstaande figuur. Dit profiel wordt duidelijk gedomineerd door ruimteverwarming; de warmtevraag is groot in de winter en klein gedurende de zomer (Voorspools & D'Haeseleer, 2006).



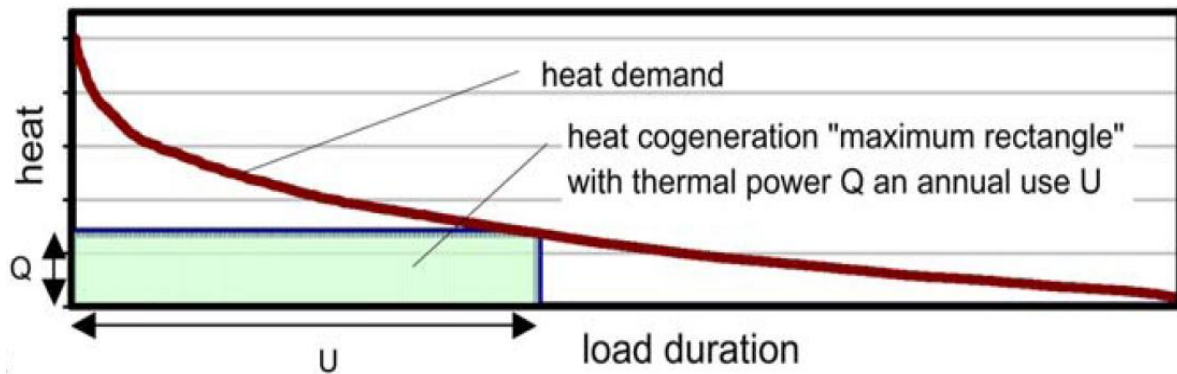
Figuur 20: Voorbeeld jaarpatroon warmtevraag (Voorspools & D'Haeseleer, 2006)

Om een jaarbelastingduurcurve op te stellen vertrekkende van een jaarpatroon, worden de waarden van de warmtevraag gerangschikt in de tijd, te beginnen met de grootste waarde. Horizontaal staat dus de tijd uitgezet in uren (van 0 tot 8760 uur = 1 jaar) en verticaal staat het vermogen uitgezet, beginnende bij het grootste vermogen dat optreedt in dat jaar. Van de jaarbelastingduurcurve kan dan afgelezen worden hoeveel uur een bepaald thermisch vermogen nodig is. De jaarbelastingduurcurve van hierboven getoonde profiel qua warmtevraag wordt weergegeven in onderstaande figuur. Het oppervlak dat door de grafiek en de assen wordt ingesloten, geeft de totale jaarlijkse warmtevraag weer in kWh (Voorspools & D'Haeseleer, 2006).



Figuur 21: Jaarbelastingduurcurve (Voorspools & D'Haeseleer, 2006)

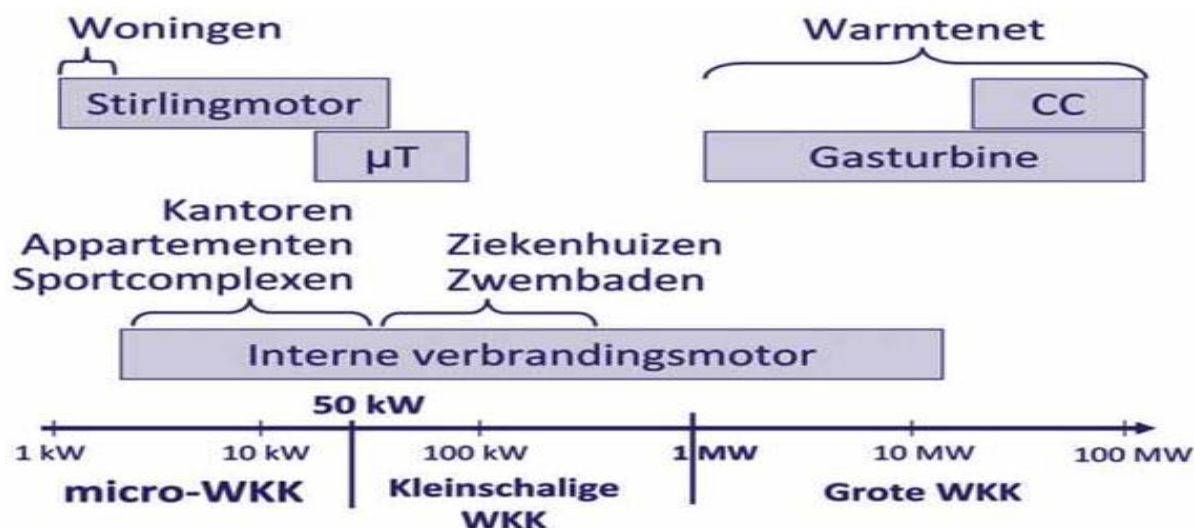
Het dimensioneren zelf gebeurt vervolgens met de methode van de 'grootste rechthoek'. In de jaarbelastingduurcurve wordt namelijk getracht een rechthoek met een zo groot mogelijke oppervlakte te fitten onder de curve. Op die manier wordt het warmtevermogen van de WKK bepaald die de grootste hoeveelheid warmte produceert en die de grootste besparing aan primaire energie realiseert. De intersectie van deze rechthoek met de verticale as geeft dan de optimale waarde qua thermisch vermogen van de warmtekrachtfaciliteit. Als de installatie op vollast werkt, zal gedurende u uren een vermogen van Q kW_{th} geleverd worden. In het aggregaat warmtevraagprofiel van het voorbeeld uit de dienstensector, weergegeven in onderstaande figuur, bedraagt het thermisch vermogen ($=Q$) van de optimale WKK-installatie ongeveer 28% van het maximaal benodigd piekvermogen (zie snijpunt grafiek met y-as) en de WKK zal zo'n 3700 ($=u$) uur per jaar draaien (Voorspools & D'Haeseleer, 2006).



Figuur 22: Jaarbelastingduurcurve met aanduidingen (Voorspools & D'Haeseleer, 2006)

Er dient opgemerkt te worden dat gedurende de werkingsperiode u van de WKK, de installatie niet de totale verwarmingsbehoefte van de organisatie kan voorzien. Er blijft immers een oppervlakte over tussen de warmtevraag (rode curve) en het vermogen geleverd door de installatie (blauwe lijn). Deze energiebehoefte dient geleverd te worden door bijkomende ketels. Een warmtekrachtinstallatie kan dus nooit volledig een verwarmingsketel vervangen, maar is complementair. In periodes van een warmtevraag lager dan het vermogen van de WKK, zal enkel de verwarmingsketel werken en is de warmtekrachtinstallatie inactief (8760 uur – u uur).

Nadat het optimale te installeren vermogen bepaald is, wordt nagegaan welk type WKK-installatie hiermee het best overeenstemt. Er bestaan immers verschillende technologieën met elk een eigen toepassingsgebied. Voor grote vermogens zijn stoom- en gasturbines de meest voorkomende uitvoeringsvormen en voor kleine vermogens zijn interne verbrandingsmotoren het meest geschikt. Voor kleinere vermogens zijn ook microgasturbines beschikbaar, maar deze worden nog niet vaak toegepast. Daarnaast staat een micro-WKK gebaseerd op een Stirlingmotor op de rand van een marktdoorbraak en wordt volop onderzoek verricht naar nieuwe technologieën, zoals brandstofcellen. In onderstaande figuur wordt een overzicht gepresenteerd van de verschillende technologieën en hun toepassingsgebieden (Cogen Vlaanderen, 2010).



Figuur 23: Verschillende WKK-technologieën met hun toepassingsgebieden (Cogen Vlaanderen, 2010)

7.3 FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE

Na het analyseren en dimensioneren van de energievraag, wordt in de volgende fase een economische analyse gemaakt van de technisch mogelijke configuraties. Om de rendabiliteit van een installatie na te gaan, is het noodzakelijk om een duidelijk inzicht te krijgen in de kosten en opbrengsten die gepaard gaan met een WKK.

7.3.1 Kosten

In de literatuur (Cogen Vlaanderen, 2006) worden 2 grote kostenposten besproken: enerzijds zijn er de investeringskosten van het systeem en anderzijds de kosten voor de werking ervan.

7.3.1.1 Investeringskosten

De investeringskosten, ook wel kapitaalkosten of projectkosten genoemd, bestaan uit 3 grote groepen: de aanschafkost van alle onderdelen, de kosten voor de installatie ervan en de projectkosten.

In eerste instantie zijn er de **uitrustingskosten**, dit zijn de kosten voor de aanschaf van alle onderdelen, inclusief belastingen en vervoer ervan naar de site. De uitrustingskosten zijn afhankelijk van de componenten waaruit het systeem bestaat. Belangrijke onderdelen zijn: het motorblok en de generator, de bijstook, het warmterecuperatiesysteem, het uitlaatgassysteem, de elektronica en automatisering, de elektrische en thermische aansluiting, de geluidsomkasting, de vervoerskosten en eventueel belastingen.

Een tweede groep investeringskosten bestaat uit de **installatiekosten**, dit zijn kosten die noodzakelijk zijn om een WKK te kunnen en mogen installeren. De installatiekosten kunnen bestaan uit installatievergunningen, de aankoop van het terrein en de voorbereiding van dit terrein, de constructie van de bouw en de uitrusting en de documentatie en bouwtekeningen.

Tot slot zijn er de **projectkosten**, ook wel de 'soft costs' of 'ingenieurs- en managementkosten' genoemd. Dit zijn kosten voor ontwerp en professionele dienstverlening voor analyse, planning en ontwikkeling van een warmtekrachtsysteem. Deze projectkosten kunnen oplopen tot 15-30% van de totale investeringskosten. De belangrijkste projectkosten zijn de kosten voor het gedetailleerd ontwerp (design) door architecten en of/studiebureau, de kosten voor het beheer van het project, de verzekering van de risico's inherent aan de bouwwerf, de kosten voor keuringen en inspectie, de kosten voor milieustudies en milieuvergunningen, de kosten voor keuringen en inspecties en tot slot de wettelijke kosten.

Goudswaard et al. (2008) geeft in onderstaande tabel de globale investeringskosten weer per kW_e voor verschillende vaakvoorkomende WKK-installaties. In de eerste kolom wordt het type installatie gespecificeerd (STEG, gasturbine of gasmotor). In de volgende twee kolommen wordt een vermogensrange weergegeven, in de laatste twee kolommen wordt tot slot gespecificeerd tussen welke range het investeringsbedrag per kW_e zal liggen (minimum en maximum) voor de eerder bepaalde vermogensrange. Het gaat hierbij om 'turn-key'-investeringen, dit wil zeggen dat de installaties volgens de specificaties opgeleverd worden. De kosten van de netaansluiting zijn hierbij nog niet opgenomen.

Tabel 6: Investeringskosten (Goudswaard et al., 2008)

	Vermogensrange		Investeringsrange (€/kWe)	
	Van	Tot	Min	Max
Grote STEG	80 MWe	400 MWe	600	900
Kleine STEG	15 MWe	80 MWe	1.000	1.300
GT groot	8 MWe	45 MWe	800	1.100
GT klein	2 MWe	8 MWe	1.100	1.600
GM groot	800 kWe	10 MWe	350	700
GM klein	250 kWe	800 kWe	600	1.400

7.3.1.2 Werkings- en onderhoudskosten

De werkings- en onderhoudskosten zijn net zoals de investeringskosten systeemspecifiek. Ze hangen in zekere mate af van de beslissingen genomen in de ontwerp- en constructiefase. Sommige beslissingen die leiden tot een vermindering van de investeringskosten zorgen ervoor dat de werkingskosten stijgen en komen zo de economische prestaties van het project niet ten goede.

Een eerste werkingskost bestaat uit de **brandstofkost**, die vaak tot 80% van de totale werkingskosten kan oplopen. Aan de hand van het aantal werkingsuren en de rendementen van de WKK kan een eerste inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid benodigde brandstof (Cogen Vlaanderen, 2006).

De **uitbatingskosten** vormen een tweede categorie binnen de werkingskosten. Hieronder verstaan we vooral de (eventuele) personeelskosten, welke in grote mate afhangen van de grootte van het systeem en de mate van automatisatie. Andere uitbatingskosten zoals kosten van smeerolie, toevoegwater en chemicaliën zijn klein in verhouding tot de personeelskosten (Cogen Vlaanderen, 2006)

Een volgende categorie werkingskosten bestaat uit de **onderhoudskosten**. Onderhoud is een belangrijke factor voor een optimale werking van de WKK-installatie. We onderscheiden hierbij een klein onderhoud, zoals het verversen van de olie, een groot onderhoud, zoals het reinigen van de rookgaskoeler en een volledige revisie, wat een complete revisie van de motor inhoudt. Onderhoud kan uitgevoerd worden in eigen beheer of kan uitbesteed worden aan een extern bedrijf, vaak de leverancier. Voordelig aan het eigen beheer zijn de lagere onderhoudskosten en de hoge betrokkenheid bij de installatie. Nadelig zijn het gebrek aan specifieke kennis en daardoor de noodzaak aan bijscholing. In geval van volledige uitbesteding van het onderhoud, liggen de kosten van onderhoud hoger en is men geheel afhankelijk van de onderhoudsfirma. De voordelen van uitbesteding zijn dat men een beter zicht heeft op de kosten (gespecificeerd in het contract) en dat de onderhoudsfirma verantwoordelijk is. Ook een tussenvorm is mogelijk, waarbij bijvoorbeeld de eigenaar het klein onderhoud uitvoert en de onderhoudsfirma het groot onderhoud verricht. In Vlaanderen wordt vaak gekozen voor uitbesteding van het onderhoud (Energik, 2004). Onderhoudsprijzen waarbij alles inbegrepen is, variëren meestal tussen de 12 en 15 €/MWh voor kleinere WKK-installaties die draaien op aardgas en liggen rond de 10 €/MWh voor grotere installaties vanaf een elektrisch vermogen van 1MW. Voor motoren die werken op alternatieve brandstoffen, zoals bijvoorbeeld bio-olie, liggen de onderhoudskosten een stuk hoger doordat meer servicebeurten en revisies nodig zijn (Stroobandt, 2007).

Een volgende werkingskost bestaat uit de **verzekeringskosten**. Verzekering tegen materiële schade en schade aan derden bij machinebreuk zijn veel voorkomend. Bovendien kan men zich ook verzekeren tegen verlies van inkomsten, verlies van interesten, kosten bij bedrijfsonderbreking...

De verzekeringskosten bedragen per jaar zo'n 0.25% tot 2% van de totale investeringskosten (Cogen Vlaanderen, 2006).

Tot slot kunnen we nog administratieve kosten, managementlonen, belastingen en interesten op lening (indien van toepassing) rekenen tot de werkingskosten (Cogen Vlaanderen, 2006).

7.3.2 Opbrengsten

De opbrengsten die gepaard gaan met een WKK-installatie bestaan enerzijds uit besparingen op de energierekening. Anderzijds zijn er ook de subsidies die de overheid geeft doordat WKK-installaties een gunstige invloed hebben op het brandstofverbruik en op het milieu. Bij de subsidies wordt een onderscheid gemaakt tussen investeringssubsidies, die eenmalig worden toegekend en in verhouding staan tot het geïnvesteerde bedrag en exploitatiesubsidies, die lopen over een langere tijd en in verhouding staan tot de energetische prestaties van de installatie.

7.3.2.1 Besparing op de energierekening

Warmtekrachtkoppeling kan op een efficiëntere wijze energie produceren dan een situatie van gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte, het brandstofverbruik van de WKK-installatie ligt dan ook lager dan de som van het verbruik van de referentiecentrale en -ketel.

De warmte die de warmtekrachtinstallatie produceert, wordt verbruikt door de eigenaar van de installatie of door de warmteverbruiker op wiens domein de WKK staat. We kunnen daarom de opbrengst van de geproduceerde warmte gelijkstellen aan de vermeden kost voor de productie van eenzelfde hoeveelheid warmte in een ketel. De opbrengst uit de geproduceerde warmte wordt benaderd met onderstaande formule:

$$\frac{Q \times V_F}{\eta_B}$$

Hierbij stelt Q de opgewekte hoeveelheid warmte (MWh) voor, V_F de waarde van de brandstof (€/MWh) en η_B het rendement van de referentieketel.

Op dezelfde wijze kunnen de opbrengsten berekend worden uit de productie van elektriciteit:

$$E \cdot V_E$$

Waarbij E (in MWh) de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit voorstelt en V_E (in €/MWh) de waarde van de geproduceerde elektriciteit (Cogen Vlaanderen, 2006).

7.3.2.2 Investeringsubsidies

Zoals eerder vermeld, zijn investeringssubsidies eenmalige subsidies die proportioneel zijn aan het geïnvesteerde bedrag. In België bestaan er verschillende investeringssubsidies, gaande van feitelijke terugbetalingen van een deel van het investeringsbedrag tot eerder fiscale voordelen (Cogen Vlaanderen, 2006).

Een eerste investeringssubsidie is de **verhoogde investeringsaftrek**. Een investeringsaftrek laat de onderneming toe om in het investeringsjaar een bepaald percentage van de initiële aanschafsom af te trekken van de belastbare winst, zonder dat dit invloed heeft op de afschrijvingen (Mercken, 2004). De investeringsaftrek bestaat uit de basisaftrek, die in 2011 3.5% bedraagt en een verhoogde investeringsaftrek van 10% voor energiebesparende maatregelen (Vlaams Energieagentschap, 2010). Niet alle investeringen komen in aanmerking voor een verhoogde aftrek. De investeringen moeten behoren tot één van de 12 categorieën die opgesomd staan in de bijlagen van het aanvraagformulier en deze categorieën bevatten bovendien een aantal beperkingen.

Een investering in een warmtekrachtinstallatie valt onder categorie 7. Volgende apparatuur komt in aanmerking:

- Krachtwerktuigen (gasturbines, diesel- en gasmotoren en stoomketels);
- Generatoren;
- Warmtewisselaars of recuperatieketels die met uitlaatgassen werken;
- Installaties voor het opslaan van brandstof;
- Installaties voor het transport van brandstoffen;
- Installaties voor geluidsisolatie;
- Rookgasreinigingsapparatuur;
- Apparatuur ter behandeling van ketelvoedingswater;
- Apparatuur voor aansluiting op het interne elektriciteitsnet.

Investeringen komen bovendien enkel in aanmerking voor een verhoogde aftrek mits de gemiddelde rendementen van kracht en warmte gelijktijdig voldoen aan:

$$N_k + \frac{2}{3} N_w \geq 50\% \text{ en } \frac{N_k}{N_k + N_w} \geq 25\% \text{ en } \frac{N_w}{N_k + N_w} \geq 25\%$$

Waarbij N_k de verhouding is (uitgedrukt in procenten) tussen de op jaarbasis geproduceerde mechanische of elektrische energie en de totale aan het systeem op jaarbasis toegevoerde energie, berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof en waarbij N_w de verhouding is (uitgedrukt in procenten) tussen de op jaarbasis gebruikte warmte-energie en de totale aan het systeem op jaarbasis toegevoerde energie, berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof (Vlaams energieagentschap, 2010).

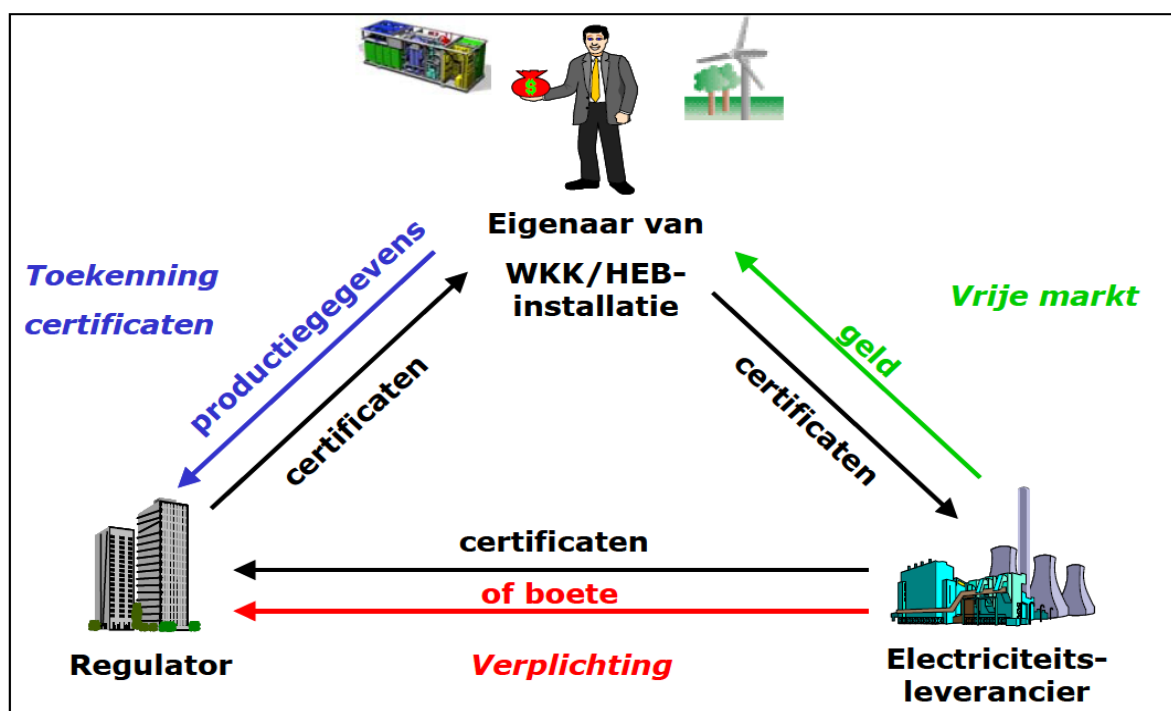
Tot voor kort konden WKK-installaties ook beroep doen op een **ecologiepremie** van de Vlaamse regering. Eind 2010 is de ecologiepremie echter hervormd. Ecologie-investeringen komen nu enkel in aanmerking voor steun als ze voorkomen op de limitatieve technologieënlijst en installaties die al

groenestroom- of warmtekrachtkoppelingscertificaten ontvangen, kunnen niet meer in aanmerking komen voor steun (Vlaamse Regering, 2010a).

De steun **aan demonstratieprojecten in Vlaanderen** vormt een laatste categorie investeringssubsidies. De Vlaamse overheid zorgt namelijk voor ondersteuning voor nieuwe technologieën of voor een eerste exploitatie van bestaande technologieën in een nieuwe sector. De overheid tracht via demonstratieprojecten bepaalde technologieën of productieprocedures te bevorderen die om een of andere reden nog niet genoeg zijn doorgebroken op de markt. De financiële steun bedraagt maximaal 50% van de kosten, maar in de praktijk zijn percentages van ongeveer 30-35% meer gangbaar. Het maximumbedrag bedraagt €250 000 (Cogen Vlaanderen, 2006).

7.3.2.3 Exploitatiesubsidies

Exploitatiesubsidies of uitbatingssubsidies zijn subsidies die proportioneel zijn met de energetische prestaties van de installatie en die dus lopen over een lange tijd, dit in tegenstelling tot de investeringssubsidies. In Vlaanderen zijn twee certificaten systemen operationeel: de warmtekrachtcertificaten (voor primaire energiebesparingen met kwalitatieve WKK systemen) en de groenestroomcertificaten (voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen). De grote lijnen van beide certificaten systemen zijn analoog en worden geschetst in onderstaande figuur (Cogen Vlaanderen, 2006).



Figuur 24: Vlaams certificatenstelsel (Cogen Vlaanderen, 2006)

De eigenaar van de WKK of de installatie voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen krijgt van de Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt (VREG) een aantal certificaten na het meedelen van productiegegevens van zijn installatie. De hoeveelheid certificaten wordt bepaald aan de hand van de verschafte productiecijfers. De eigenaar van de installatie kan deze certificaten dan verkopen aan de leveranciers van elektriciteit tegen marktprijs van de certificaten. De certificatenmarkt is niet rechtstreeks verbonden aan de elektriciteitsmarkt, men is dus niet verplicht zijn certificaten te verkopen aan de elektriciteitsleverancier waarmee men een contract heeft voor elektriciteit. Opdat er op de markt een vraag zou zijn en opdat de marktprijs niet nul zou zijn, worden de elektriciteitsleveranciers verplicht jaarlijks een aantal certificaten (quotum) in te leveren bij de regulator. Indien ze niet voldoende certificaten indienen bij de regulator, moeten de elektriciteitsleveranciers per certificaat dat ze tekort hebben een boete betalen.

Een eerste soort certificaten betreft de **warmtekrachtcertificaten**. Met het Besluit van 7 juli 2006 ter bevordering van elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties werden de Europese richtlijnen inzake warmtekrachtkoppeling omgezet in Vlaamse wetgeving. Hierbij werd het Vlaams certificatenstelsel, dat in 2004 het levenslicht zag, verder uitgebreid en afgestemd op de Europese vereisten.

Het warmtekrachtcertificatenstelsel is opgebouwd rond het principe dat warmtekrachtkoppeling warmte en elektriciteit kan opwekken uitgaande van minder brandstof dan de conventionele, separate productie van elektriciteit en warmte. De besparing aan primaire energie is dan ook het uitgangspunt voor de toekenning van de certificaten. De VREG kent de warmtekrachtcertificaten maandelijks toe per schijf van 1000 kWh primaire energiebesparing. Het aantal certificaten wordt berekend aan de hand van de absolute primaire energiebesparing (PEB) met behulp van volgende formule (Cogen Vlaanderen, 2006):

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E * \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right)$$

Met E : geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh) door de WKK binnen de maand;

α_Q : thermisch rendement van de WKK;

η_Q : thermisch rendement van de referentieketel;

α_E : elektrisch rendement van de WKK;

η_E : elektrisch rendement van de referentieketel.

De referentierendementen worden bepaald door de Vlaamse regering (2006a) en zijn opgenomen in tabel 1 en 2 van bijlage 1. Voor het elektrisch en thermisch rendement van de WKK-installatie mogen ontwerpgegevens gebruikt worden indien het gaat om een installatie met een nominaal elektrisch vermogen kleiner dan 200 kW. Zoniet moeten de gemiddelde rendementen berekend

worden met behulp van metingen van de nuttige outputs en de verbruikte brandstof (Vlaamse Regering, 2006a).

Warmtekrachtcertificaten worden enkel toegekend indien de beschouwde installatie aan enkele voorwaarden voldoet. In eerste instantie moet de WKK gelegen zijn in het Vlaams gewest en in dienst genomen of ingrijpend gewijzigd zijn na 1 januari 2002. De steun is dus specifiek toegespitst op nieuwe of nog te bouwen WKK-installaties. Ten tweede moet de installatie voorzien zijn van de benodigde meetapparatuur om permanent de netto elektriciteitsproductie, de netto warmteproductie en het brandstofverbruik te meten. Tenslotte kan de eigenaar pas aanspraak maken op certificaten als de installatie 'kwalitatief' is. Het begrip 'kwalitatief' komt overeen met het begrip 'hoogrenderend' uit de Europese Richtlijn 2004/8/EG betreffende WKK-installaties. Een grootschalige WKK met een vermogen van minstens 1 MWe is kwalitatief indien de relatieve primaire energiebesparing (RPEB) minstens 10 % bedraagt. Een kleinschalige WKK met een vermogen kleiner dan 1 MWe wordt evenwel al als kwalitatief beschouwd indien de RPEB simpelweg groter is dan 0% (Vlaamse Regering, 2006a). De formule die de Vlaamse regering (2006a) in het besluit hanteert voor de relatieve primaire energiebesparing is:

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \right)$$

Met α_Q : thermisch rendement WKK;
 α_E : elektrisch rendement WKK;
 η_Q : thermisch rendement referentieketel;
 η_E : elektrisch rendement referentiecentrale.

Hierbij zijn de referentierendementen η_Q en η_E niet gelijk aan de hierboven vermelde Vlaamse waarden, maar wel aan de Europees vastgelegde waarden die ook in het Ministerieel Besluit van 6 oktober 2006 inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties (Vlaamse Regering, 2006b) teruggevonden kunnen worden. Wat betreft de thermische referentierendementen, worden in tabel 1 van bijlage 2 de waarden weergegeven in functie van de aangewende brandstof en de warmtevorm. De elektrische referentierendementen staan opgelijst in tabel 2 van bijlage 2. Ze worden weergegeven in functie van het jaar van indienstname en van de aangewende brandstof. Deze rendementen zijn gebaseerd op ISO-omstandigheden (15°C omgevingstemperatuur, 1.013 bar, 60% relatieve vochtigheid) en ze dienen te worden verhoogd met 0.1 procentpunt per °C dat de gemiddelde buitentemperatuur lager ligt dan 15°C en verlaagd te worden met 0.1 procentpunt per °C dat de gemiddelde buitentemperatuur hoger ligt dan 15°C. Daarnaast dient er ook nog een correctie uitgevoerd te worden voor de aansluitspanning. Het referentierendement bekomen na temperatuurscorrectie moet vermenigvuldigd worden met een factor die in functie is van de aansluitspanning (zie bijlage 2 tabel 3).

De warmtekrachtcertificaten worden toegekend volgens een degressief principe (Cogen Vlaanderen, 2006). Na de eerste vier jaren wordt het aantal certificaten dat een eigenaar kan indienen afgebouwd. Vanaf het vijfde jaar heeft de eigenaar nog recht op een fractie X van het oorspronkelijk aantal certificaten. Deze fractie is groter naarmate de warmtekrachtinstallatie een grotere RPEB kent en dus meer kwalitatief is. Wie dus investeert in een 'betere' WKK die relatief veel brandstof bespaart, kan dus langer genieten van de certificaten en krijgt dus ook meer steun. Onderstaande formule wordt gebruikt om te berekenen op hoeveel certificaten men recht heeft (Cogen Vlaanderen, 2006):

$$X = \frac{RPEB - 0,2 * (T - 48)}{RPEB}$$

Met X : fractie van de certificaten waarop men recht heeft;
T : tijd in maanden sinds de indiening van de WKK-installatie;
RPEB : relatieve primaire energiebesparing.

Bij de berekening van de relatieve primaire energiebesparing zijn het niet de Europese referentierendementen, maar de rendementen uit het Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 die gebruikt dienen te worden, dus dezelfde als die gebruikt worden voor de berekening van het aantal bekomen certificaten. Deze rendementen zijn terug te vinden in tabel 1, 2 en 3 van bijlage 1.

De eigenaars van de kwalitatieve WKK-installaties kunnen hun certificaten doorverkopen aan de elektriciteitsleveranciers, aangezien zij de plicht hebben om jaarlijks een bepaald aantal certificaten in te leveren bij de VREG. Het exacte aantal certificaten dat een elektriciteitsleverancier moet inleveren, wordt bepaald door de hoeveelheid elektriciteit die hij gedurende dat jaar aan de eindafnemers levert, vermenigvuldigd met een bepaald quotum (Vlaamse Regering, 2006a). De Vlaamse regering heeft een stijgend quotum vastgelegd tot 2012, vanaf 2013 wordt een constante energiebesparing door middel van warmtekrachtkoppeling vooropgesteld, zoals af te lezen valt uit onderstaande tabel.

Tabel 7: Jaarlijks quotum certificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers (Vlaamse Regering, 2006a)

2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Vanaf 2013
1,19%	2,16%	2,96%	3,73%	4,39%	4,90%	5,20%	5,23%

Indien de elektriciteitsleveranciers onvoldoende certificaten aan de VREG kunnen voorleggen, wordt een administratieve boete van €45 opgelegd per ontbrekend certificaat. De marktprijs die de leverancier bereid is te betalen voor de certificaten hangt af van de hoogte van deze boeteprijs en ook van de verhouding tussen het aanbod en de vraag naar warmtekrachtcertificaten op de markt. Indien er sprake is van schaarste aan certificaten, zal de marktprijs deze boeteprijs benaderen. Indien er echter meer certificaten op de markt beschikbaar zijn dan het totaal aantal certificaten dat nodig is opdat alle leveranciers aan hun verplichting kunnen voldoen, zal de marktprijs dalen. Daarom bestaat er een bijkomende garantie om toch een goede prijs te garanderen voor de warmtekrachtcertificaten. De netbeheerder is namelijk verplicht warmtecertificaten aan te kopen tegen €27, deze prijs wordt ook wel de minimumprijs genoemd. Deze verplichting geldt gedurende 10 jaar na de indienstname van de warmtekrachtinstallatie en de installatie moet aangesloten zijn op het net, installaties die niet op het distributienet aangesloten zijn (eilandwerking) kunnen dus geen aanspraak maken op deze minimumsteun (Vlaamse Regering, 2009).

De evolutie van het aantal verhandelde certificaten en de gemiddelde marktprijs per certificaat wordt weergegeven in onderstaande tabel (VREG, 2011a).

Tabel 8: Verhandelde warmtekrachtcertificaten en eenheidsprijs per inleveringsronde (VREG, 2011a)

Periode	Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten	Gemiddelde jaarprijs per certificaat
1 april 2005 – 31 maart 2006	174.669	37,37 €
1 april 2006 – 31 maart 2007	381.439	41,17 €
1 april 2007 – 31 maart 2008	978.698	41,48 €
1 april 2008 – 31 maart 2009	1.794.151	41,14 €
1 april 2009 – 31 maart 2010	2.426.052	39,19 €
1 april 2010 – 31 maart 2011	2.302.420	37.31 €

Een tweede soort certificaten betreft de **groenestroomcertificaten**. Indien elektriciteit opgewekt wordt uit hernieuwbare energiebronnen, kunnen daarvoor groenestroomcertificaten bekomen worden. De hernieuwbare energiebronnen staan opgelijst in het Besluit van de Vlaamse Regering van 19 november 2010 houdende algemene bepalingen over het energiebeleid (Vlaamse Regering, 2010b).

De groenestroomcertificaten worden afgeleverd indien elektriciteit opgewekt wordt door middel van:

- Zonne-energie,
- Windenergie,

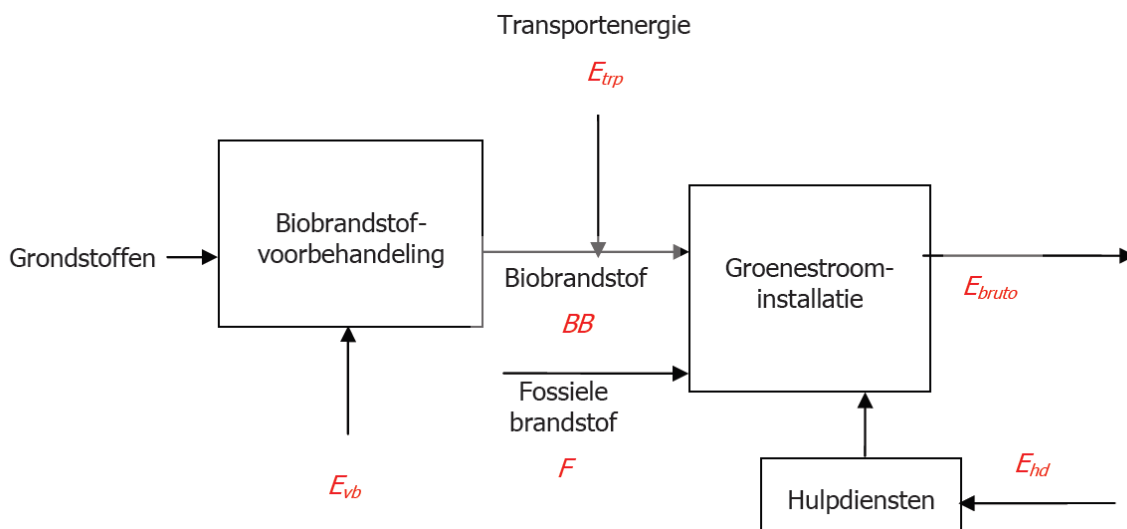
- Waterkracht kleiner dan 10 MW,
- Getijdenenergie en golfslagenergie,
- Aardwarmte,
- Biogas dat voorkomt uit de vergisting van organische stoffen in vergistingsinstallaties of in stortplaatsen;
- Energie opgewekt uit volgende organisch-biologische stoffen:
 - o Producten bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw;
 - o Korteomloophout;
 - o Houtstromen die niet gebruikt worden als industriële grondstof;
 - o Dierlijke mest;
 - o Organisch-biologische afvalstoffen die selectief ingezameld werden en niet in aanmerking komen voor materiaalrecyclage of worden verwerkt conform de bepalingen van het van toepassing zijnde sectorale uitvoeringsplan;
 - o Organisch-biologische afvalstoffen die gesorteerd worden uit restafval en niet in aanmerking komen voor materiaalrecyclage of worden verwerkt conform de bepalingen van het van toepassing zijnde sectorale uitvoeringsplan;
 - o Het organisch-biologische deel van restafval, op voorwaarde dat de verwerkingsinstallatie in kwestie door energierecuperatie een primaire energiebesparing realiseert van minstens 35% van de energie-inhoud van de afvalstoffen, verwerkt in de installatie.

Indien een hernieuwbare energiebron gebruikt wordt als input voor de warmtekrachtinstallatie en deze hernieuwbare energiebron staat op bovenvermelde lijst, dan komt de installatie in principe in aanmerking voor zowel groenestroom- als warmtekrachtcertificaten. In deze masterproef wordt verondersteld dat de warmtekrachtinstallatie zal draaien op pyrolyse-olie en dat dus naast warmtekrachtcertificaten ook groenestroomcertificaten verkregen kunnen worden.

Om het aantal groenestroomcertificaten te berekenen waarop de eigenaar recht heeft, wordt enkel gekeken naar de nettoproductie van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen. Het begrip "netto" houdt in dat er nog energie moet worden afgetrokken van de gemeten elektriciteitsproductie. Het betreft energie die verbruikt wordt door:

- de hulpvoorziening van de productie-installatie;
- het eventuele transport uit het buitenland van de hernieuwbare energiebron;
- de eventuele voorbehandeling nodig om de hernieuwbare energiebron geschikt te maken voor elektriciteitsproductie.

In volgende figuur worden de relevante aspecten bij de berekening van het aantal groenestroomcertificaten schematisch voorgesteld (VREG, 2007).



Figuur 25: Schematisch overzicht berekening groenestroomcertificaten (VREG, 2007)

We kunnen in formulevorm als volgt weergeven hoeveel elektriciteit in aanmerking komt voor groenestroomcertificaten (VREG, 2007):

$$E_{GSC} = G \times (E_{bruto} - E_{hd}) - E_{vb} - E_{trp}$$

E_{GSC}	hoeveelheid elektriciteit (in MWh) die in aanmerking komt voor de toekenning van groenestroomcertificaten;
E_{bruto}	bruto elektriciteitsproductie door de productie-installatie (in MWh);
G	groenfactor, die van toepassing is indien de productie-installatie een coverbranding doet van fossiele en hernieuwbare brandstoffen;
E_{hd}	(equivalente) hoeveelheid elektriciteit, die verbruikt wordt voor de voeding van de hulpdiensten van de productie-installatie (in MWh);
E_{vb}	(equivalente) hoeveelheid elektriciteit die verbruikt wordt om de hernieuwbare energiebron geschikt te maken als brandstof voor elektriciteitsproductie (in MWh), ook 'voorbehandelingsenergie' genoemd;
E_{trp}	equivalent elektriciteitsverbruik van de energie die wordt verbruikt voor het transport van de gebruikte hernieuwbare energiebron tot aan de grens van het Vlaams Gewest, indien de gebruikte hernieuwbare energiebron uit het buitenland afkomstig is (in MWh).

In het kader van het huidige onderzoek naar WKK op basis van pyrolyse-olie, is vooral de voorbehandelingsenergie een belangrijke factor om in rekening te brengen. Alle energie die verbruikt wordt bij de voorbehandeling, vanaf de oogst van het kortetoomloophout tot het

pyrolyseproces moet in mindering worden gebracht van de elektriciteit die in aanmerking komt voor de toekenning van groenestroomcertificaten.

Net zoals bij het systeem van warmtekrachtcertificaten, kunnen eigenaars van een installatie voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen hun bekomen certificaten doorverkopen aan de elektriciteitsleveranciers, aangezien zij de plicht hebben om jaarlijks een bepaald aantal certificaten in te leveren bij de VREG. Het exacte aantal certificaten dat een elektriciteitsleverancier moet inleveren, wordt bepaald door de hoeveelheid elektriciteit die hij gedurende dat jaar aan de eindafnemers levert, vermenigvuldigd met een bepaald percentage (quotum). De Vlaamse regering heeft een stijgend quotum vastgelegd dat in onderstaande tabel wordt weergegeven (Vlaamse Regering, 2009). In 2021 moet het minimumaandeel bijvoorbeeld 13% van de leveringen bedragen.

Tabel 9: Jaarlijks quotum certificatenverplichting voor elektriciteitsleveranciers (Vlaamse Regering, 2009)

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
0.08%	1.20%	2.00%	2.50%	3.00%	3.75%	4.90%	5.25%	6.00%	7.00%
2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
8.00%	9.00%	10.0%	10.5%	11.0%	11.5%	12.0%	12.5%	13.0%	

Indien een elektriciteitsleverancier onvoldoende certificaten aan de VREG kan voorleggen, wordt een administratieve boete van €125 opgelegd per ontbrekend certificaat. Vanaf 2015 bedraagt dit €100 per ontbrekend certificaat (Vlaamse Regering, 2009). Indien er sprake is van schaarste aan certificaten, zal de marktprijs deze boeteprijs benaderen. Indien er echter meer certificaten op de markt beschikbaar zijn dan het totaal aantal certificaten dat nodig is opdat alle leveranciers aan hun verplichting kunnen voldoen, zal de marktprijs dalen. Daarom bestaat er een bijkomende garantie om toch een goede prijs te bekomen voor de groenestroomcertificaten. Groenestroomcertificaten kunnen namelijk ook verkocht worden aan ELIA of aan de distributienetbeheerder tegen vastgestelde prijzen.

ELIA, de transmissienetbeheerder van het Belgische hoogspanningsnet, wordt verplicht de groenestroomcertificaten aan te kopen die uitgereikt worden tijdens de eerste tien jaar na de indiening van een installatie. De minimumprijzen per certificaat en dus per 1000 kWh worden bepaald in functie van gebruikte productietechnologie. In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de minimumprijzen (Federale Regering, 2002).

Tabel 10: Overzicht minimumprijzen per technologie Elia (Federale regering, 2002)

Technologie	Minimumprijs per certificaat (€/MWh)
Off-shore windenergie	90 €/MWh
On-shore windenergie	50 €/MWh
Waterkracht	50 €/MWh
Andere hernieuwbare energiebronnen (waaronder biomassa)	20 €/MWh

Ook de distributienetbeheerder is verplicht om groenestroomcertificaten aan te kopen van installaties in dienst genomen na 8 juni 2004 en waarvan de elektriciteit niet langer dan 24 maanden voor de verkoop van de bijbehorende certificaten is geproduceerd. Ook hier hangt de minimumprijs per certificaat af van de gebruikte technologie. In onderstaande tabel worden de minimumprijzen weergegeven (Vlaamse regering, 2009).

Tabel 11: Overzicht minimumprijzen per technologie distributienetbeheerder (Vlaamse regering, 2009)

Technologie	Installatie in dienst voor 01/01/2010	Installatie in dienst na 01/01/2010
windenergie op land	80 € / MWh	90 € / MWh
Biomassa/biogas uit organisch biologische stoffen	80 € / MWh	90 € / MWh
Organisch-biologisch deel van restafval, stortgas en biogas uit afvalwaterzuiveringslib	95 € / MWh	90 € / MWh
Waterkracht, getijden- en golfslagenergie	95 € / MWh	90 € / MWh
aardwarmte	95 € / MWh	90 € / MWh
Andere technologieën	-	60 € / MWh

De marktwaarde van de groenestroomcertificaten ligt niet vast, maar door het principe van boetes en minimumprijzen, zal de marktwaarde altijd schommelen tussen de minimumprijs van de netbeheerder en de boeteprijs die de leveranciers moeten betalen per ontbrekend groenestroomcertificaat. De gemiddelde marktwaarde van een groenestroomcertificaat schommelt momenteel rond de 104 euro per certificaat. In onderstaande tabel wordt het aantal bilateraal verhandelde groenestroomcertificaten en hun gemiddelde prijs weergegeven (VREG, 2011b).

Tabel 12: Verhandelde groenestroomcertificaten en eenheidsprijs per periode (VREG, 2011b)

Periode	Aantal verhandelde groenestroomcertificaten	Gemiddelde prijs per groenestroomcertificaat
Januari 2010	225 336	107.46 €
Februari 2010	115 530	107.59 €
Maart 2010	827 505	106.67 €
April 2010	198 523	106.04 €
Mei 2010	129 455	106.30 €
Juni 2010	172 219	106.99 €
Julli 2010	154 798	107.77 €
Augustus 2010	116 076	106.99 €
September 2010	195 317	106.18 €
Oktober 2010	92 219	106.53 €
November 2010	185 241	106.16 €
December 2010	173 042	105.32 €
Januari 2011	572 478	105.23 €
Februari 2011	364 111	103.31 €
Maart 2011	234 617	103.56 €

7.3.3 Maatstaven voor economische prestaties

Om te bepalen of het zinvol is om te investeren in warmtekrachtkoppeling op basis van pyrolyseolie, is het nodig de economische haalbaarheid na te gaan. Er bestaan verschillende evaluatiemaatstaven om de economische haalbaarheid na te gaan die hieronder besproken worden.

7.3.3.1 De Netto Contante Waarde (NCW)

Bij deze methode wordt de huidige waarde bepaald van alle kasstromen die voortvloeien uit het project. De jaarlijkse cashflows worden verdisconteerd (op eenzelfde tijdsequivalente basis gebracht) aan de hand van een gekende kapitaalkost (Mercken, 2004). De verdisconteerde cashflows doorheen de levenscyclus van het project worden gesommeerd en de netto investeringskost wordt in mindering gebracht. Zo bekomt men de uiteindelijke NCW van het beschouwde project. We kunnen deze NCW interpreteren als de totale winst die een investeerder kan realiseren door over te schakelen op het nieuwe energiesysteem. De beslissingsregel bij de NCW methode zegt dat een project economisch verantwoord gerealiseerd kan worden als de berekende NCW groter is dan 0. De NCW wordt berekend aan de hand van volgende formule (Mercken, 2004):

$$NCW_i = \sum_{t=1}^n [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * \widehat{A}_t] * A_{t-i} - I_0 + b * c * I'_0$$

Met:

- b belastingtarief;
- O_t inkomende kasstroom in jaar t;
- Q_t uitgaande kasstromen in jaar t;
- \widehat{A}_t afschrijvingsbedrag in jaar t;
- A_{t-i} actualisatiefactor = actuele waarde van €1 in jaar t = $1/(1+i)^t$;
- I_0 initiële investeringskosten;
- c percentage investeringsaftrek;
- I'_0 investeringsbedrag van toepassing op het aftrekpercentage;
- i reële kapitaalkost na belastingen.

In eerste instantie worden de jaarlijkse netto cashflows berekend ($O_t - Q_t$). Naast de impact van deze cashflows zelf, moet ook rekening gehouden worden met het effect dat deze cashflows hebben op de winstbelastingen. Indien de inkomsten groter zijn dan de uitgaven (positieve cashflow dankzij het investeringsproject) en de winst dus vergroot wordt, vergroten de te betalen belastingen eveneens. Er is dus sprake van een bijkomende uitgave die gepaard gaat met het investeringsproject en deze wordt verrekend door de jaarlijkse netto cashflows met factor (1-b) te vermenigvuldigen. Evenzo zorgt een negatieve netto cashflow voor een daling van de bedrijfswinsten en dus voor een kleinere belastingsuitgave, wat ook weer verrekend wordt dankzij vermenigvuldiging van de netto cashflows met factor (1-b). Voor de berekeningen van de NCW zal in dit onderzoek de vennootschapsbelasting van 33.99% gehanteerd worden indien de organisaties onderworpen zijn aan een winstbelasting en 0% voor organisaties die niet onderworpen zijn aan de winstbelasting.

In de formule van de NCW vinden we ook afschrijvingen terug, hoewel dit boekhoudkundige kosten zijn en er dus geen uitgaven of kasstromen mee gepaard gaan. Afschrijvingen hebben echter een invloed op de NCW doordat deze boekhoudkundige kosten leiden tot verlaging van het gerealiseerde resultaat van de onderneming en zo ook tot een verminderde vennootschapsbelasting die betaald dient te worden op de winst (Mercken, 2004). Deze vermindering beschouwen we als inkomst en berekenen we door het af te schrijven bedrag op jaarbasis \widehat{A}_t te vermenigvuldigen met het belastingstarief b (33.99%). Dit principe wordt ook wel het belastingschild van de afschrijvingen genoemd, vanwege de positieve invloed op de NCW van het investeringsproject. Het jaarlijks af te schrijven bedrag \widehat{A}_t wordt bepaald door de gehanteerde afschrijvingsmethode. Men kan kiezen voor lineaire afschrijving, waarbij het bedrag elk jaar hetzelfde is, of voor double declining balance (DDB) of sum of the year digits methode (SYD), waarbij de activa tijdens de eerste jaren sneller afgeschreven worden en dus ook het belastingvoordeel van de afschrijvingen sneller gerealiseerd wordt. In de praktijk hanteert men

meestal DDB als het fiscaal toegelaten is en lineaire afschrijvingen in de andere gevallen (Mercken, 2004).

Om de kasstromen die doorheen levensduur van het project gegenereerd worden te kunnen vergelijken en te kunnen optellen, is het noodzakelijk een correctie uit te voeren. De cashflows worden verdisconteerd met een factor A_{t-i} om de bedragen op een gemeenschappelijke tijdsbasis te kunnen beschouwen, een euro vandaag is immers meer waard dan een euro die in de toekomst ontvangen wordt. A_{t-i} geeft aan hoeveel een euro die in jaar t ontvangen wordt vandaag de dag waard is, uitgaande van een reële kapitaalkost na belastingen i . Na de verdiscontering kunnen de jaarlijkse netto cashflows gesommeerd worden en zo weten we wat de investering gedurende de levensduur oplevert.

Tot slot moeten de initiële investeringskosten I_0 in rekening gebracht worden, waarbij de investeringsaftrek het netto investeringsbedrag een beetje verlaagt (of anders gezegd de NCW een beetje verhoogt).

7.3.3.2 De interne opbrengstvoet (IRR, Internal Rate of Return)

De interne opbrengstvoet is een evaluatiemaatstaf die de discontovoet weergeeft die overeenstemt met een netto contante waarde gelijk aan nul (Mercken, 2004). De IRR geeft dus aan hoe hoog de nominale kapitaalkost mag oplopen vooraleer het niet langer economisch verantwoord is om het project uit te voeren. In vergelijking met de netto contante waarde methode heeft de IRR methode als voordeel dat een idee wordt gegeven van het relatieve rendement van de investering en dat de IRR berekend kan worden zonder dat het vereiste rendement gekend is (Mercken, 2004).

7.3.3.3 De verdisconteerde terugverdientijd (DBP, Discounted PayBack)

De verdisconteerde terugverdientijd becijfert hoeveel tijd er verloopt alvorens de initiële investeringsuitgave wordt terugverdiend door de netto kasstromen van het project, rekening houdende met de tijdswaarde van geld (Mercken, 2004). Deze methode wordt ook wel de kapitaalrecuperatie-methode of break-even leeftijd genoemd, aangezien de tijd wordt berekend die nodig is om de contante waarde van de kasstromen van negatief naar positief te brengen. Indien bij de investeringsanalyse in een WKK-installatie de verdisconteerde terugverdientijd kleiner is dan de levensduur van het project, kan het project worden aanvaard (Mercken, 2004).

7.3.4 Belastingseffecten

Belastingen kunnen een grote invloed uitoefenen op het resultaat van de investeringscalculatie. Er bestaan verschillende soorten belastingen: verbruiksbelastingen (zoals de BTW) en inkomstenbelastingen (zoals de vennootschapsbelasting) (Mercken, 2004).

BTW is voor een BTW-plichtige onderneming aftrekbaar en in principe neutraal. Door deze aftrekbaarheid vormt BTW geen kost of kasstroom en voor investeringscalculaties wordt de BTW dus niet in rekening gebracht. Voor een eindgebruiker-consument of niet-BTW-plichtige ondernemingen, zoals vele VZW's, universiteiten, overheidsorganisaties... geldt dat zij wel degelijk de BTW-last dragen. Het maakt voor zulke organisaties niet uit dat een gedeelte van het bedrag dat aan de leverancier betaald moet worden, uiteindelijk bestemd is voor de fiscus. Bij de investeringsanalyse moet voor zulke organisaties BTW wel in rekening worden gebracht (Mercken, 2004). Concreet betekent dit bijvoorbeeld dat het investeringsbedrag voor een bepaalde investering voor een niet-BTW-plichtige onderneming 21% hoger zal liggen dan voor een BTW-plichtige onderneming.

De vennootschapsbelasting is een belasting op het boekhoudkundig resultaat van een onderneming. In België moet in de meeste gevallen een uniform tarief van 33,99% betaald worden. Op het eerste zicht lijken vennootschapsbelastingen nadelig te zijn voor de vennootschap, het lijkt oninteressant om als vennootschap 33,99% belastingen te moeten betalen terwijl anderen (bijvoorbeeld VZW's) niets betalen. Zoals hierboven bij de bespreking van de NCW bleek, hebben winstbelastingen echter een tweedelig effect: aan de ene kant romen zij de kasstromen vóór belastingen af, aangezien er nog maar 1-b van overblijft en anderzijds genereren zij een positief effect, aangezien het belastingschild op de afschrijvingen $b * \widehat{A}_t$ bedraagt.

Voor elk van de drie organisaties waarvoor onderzocht wordt of een investering in een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie haalbaar is, moet per gevalstudie nagegaan worden of de organisatie BTW-plichtig is en of ze onderworpen is aan de vennootschapsbelasting.

7.4 FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID

In de vorige fase (economische analyse) trekken we ons niet veel aan van onzekerheid. De resultaten en gevolgen van een investeringsbeslissing zijn echter niet met zekerheid gekend. Een aantal kosten en baten zijn bepaald aan de hand van actuele gegevens, die tijdens de levensduur van het project wel eens zouden kunnen veranderen. Sommige van de inputgegevens hebben we niet in de hand en zijn vaak moeilijk te voorspellen, denken we bijvoorbeeld maar aan de brandstofprijzen, de elektriciteitsprijzen, de toekomstige overheidspolitiek die het beleid omtrent warmtekracht- of groenestroomcertificaten kan wijzigen... Rekening houden met onzekerheid en risico betekent dat er moet worden nagedacht over de verschillende resultaten en hun bijhorende waarschijnlijkheden. Dit kan het best op een systematische manier gebeuren.

In eerste instantie wordt de gevoeligheid van de basisoplossing voor veranderingen in de waarden van de parameters nagegaan. De vraag die hierbij gesteld wordt is: wat is het effect op de NCW van de verandering van één bepaalde parameter? Dit wordt ook wel een sensitiviteitsanalyse

genoemd (Mercken, 2004). Met behulp van Tornadodiagrammen zal voor de 3 gevalstudies worden aangetoond hoe de onzekerheid in één enkele parameter doorwerkt in de uiteindelijke NCW van het project.

Naast de sensitiviteitsanalyse, waarbij de invloed van individuele parameters wordt nagegaan, is het ook van belang om oog te hebben voor simultane veranderingen van de parameterwaarden. Om de onzekerheid in afzonderlijke parameters te vertalen naar de onzekerheid in het projectresultaat, zou men bijvoorbeeld elke parameter haar meest negatieve waarde kunnen toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt en daarna elke parameter haar meest positieve waarde toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt. Deze methode geeft echter een veel te groot en onrealistisch onzekerheidsgebied voor de NCW, aangezien het wel heel onwaarschijnlijk is dat alle parameters gelijktijdig hun meest extreme waarde aannemen. Een algemeen erkende werkwijze om de onzekerheden van de parameters op een realistische manier te vertalen naar de onzekerheid in projectuitkomst, is de zogenaamde Monte Carlo methode.

Een Monte Carlo simulatie kan worden toegepast indien een systeem elementen bevat die beïnvloed worden door het toeval. Voor het investeringsproject in de warmtekrachtkoppeling geldt dat quasi alle parameters probabilistisch zijn van aard. Het uiteindelijk resultaat wordt bepaald door een voorlopig onbekende combinatie van de parameterwaarden (Mercken, 2004).

Bij een Monte Carlo simulatie worden verschillende experimenten uitgevoerd, waarbij telkens een scenario wordt samengesteld op basis van toevallig gekozen waarden voor de verschillende parameters. Voor elk scenario wordt dan de NCW berekend. Door dit experiment veelvuldig uit te voeren, verkrijgt men uiteindelijk een kansverdeling van de NCW.

Een Monte Carlo simulatie bestaat uit 5 grote stappen (Mercken, 2004):

- Identificatie van de sleutelparameters waarvan de waarde onzeker is en die een door het toeval bepaalde waarde zullen aannemen;
- Bepaling van de kansverdeling voor deze parameters;
- Toevallige keuze van een parameterwaarde voor elke parameter aan de hand van een toevalsgetallengenerator;
- Berekening van de NCW van het toevallig samengestelde scenario;
- Verzameling van experimentele gegevens en verwerking ervan tot kansverdeling van de NCW.

Voor de verschillende gevalstudies zal telkens een Monte Carlo simulatie uitgevoerd worden van 10.000 runs met behulp van het software pakket Crystal Ball.

Naast de sensitiviteitsanalyse en Monte Carlo analyse, zal voor elke gevalstudie nagegaan worden wat er zou gebeuren indien de warmtekrachtcertificaten of groenestroomcertificaten zouden wegvallen. Ook wordt voor alle gevalstudies berekend hoe hoog de maximumprijs van de pyrolyse-olie mag zijn opdat de NCW van het investeringsproject in een WKK die werkt op pyrolyse-olie niet negatief wordt.

HOOFDSTUK 8: GEVALSTUDIE ZWEMBAD

8.1 BESCHRIJVING GEVALSTUDIE

Zwembaden zijn erg energiedichte gebouwen in onze samenleving. Het hoge waterverbruik, de continue verwarming van het water, de hoge waterverdamping en de hoge luchttemperatuur liggen hier aan de basis. Een zwembad moet nagenoeg het hele jaar verwarmd worden. De kosten van het energieverbruik kunnen oplopen tot 30% van de operationele kosten van een zwembad (Trianti-Stourna et al., 1998). Daarom is het zowel om economische als ecologische redenen belangrijk na te gaan of er mogelijkheden voor energiebesparing gevonden kunnen worden.

Het stedelijk zwembad van Lommel bestaat uit een groot bad met 5 banen, een instructiebad en een glijbaanbad met een 35m lange glijbaan. Het zwembad biedt plaats voor zo'n 150 zwemmers. Daarnaast is er een cafetaria met terras. De ingang van het zwembad is naar het noordwesten gericht. Bij binnenkomst kom je in het voorgebouw terecht, waar de kassa en toiletten zich bevinden. Via de kleedhokjes kom je in de doucheruimte en daarna de zwemhal terecht. De muur die op het zuidoosten gericht is, bestaat voor het grootste deel uit glas. Zowel het voorgebouw als de zwemhal hebben een plat dak zonder lichtkoepels, dat een tiental jaren geleden gerenoveerd werd. De technische installatie van het zwembad bevindt zich hoofdzakelijk in de kelder.



Figuur 26: Groot zwembad (links) en doucheruimte (rechts)

Enkele belangrijke cijfermatige gegevens betreffende de afmetingen en klimatologische condities van het zwembad worden weergegeven in volgende tabellen.

Tabel 13: Afmetingen zwembaden

	Lengte	Breedte	Diepte	Volume	Oppervlakte
Groot bad	25 m	10 m	1.2 m – 3 m	460 m ³	250 m ²
Instructiebad	11 m	6 m	0.7 m – 1 m	56 m ³	66 m ²
glijbaanbad	6 m	4 m	1.1 m	26 m ³	24 m ²

Tabel 14: Klimatologische condities

Temperatuur zwembadhal	29,5°C
Temperatuur zwembadwater	29°C
Relatieve luchtvochtigheid	65 %

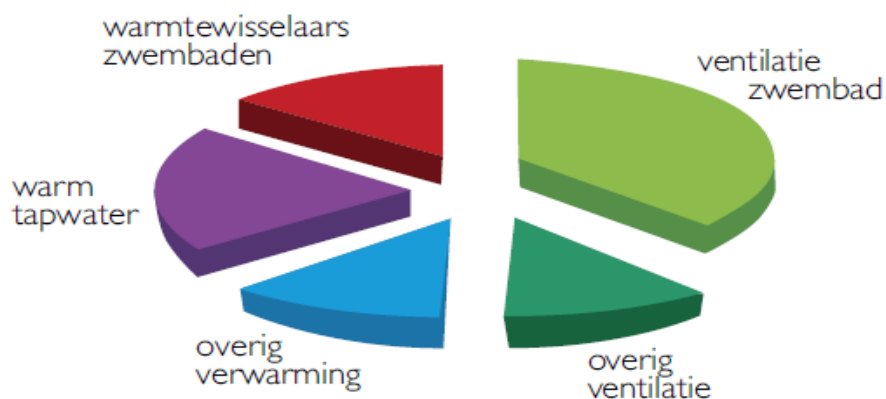
De temperatuur van het zwembadwater wordt constant gehouden op circa 29°C. Deze temperatuur sluit nauw aan bij de ideale temperatuursrange van 27-28°C die in de literatuur wordt teruggevonden (Trianti-Stourna, et al., 1998). De optimale binnenluchttemperatuur in de zwembadhal ligt maximum 1-2°C hoger dan de watertemperatuur, zoniet zou er teveel verdamping van het zwembadwater naar de lucht plaatsvinden en zou de luchtvochtigheid te hoog worden (Trianti-Stourna, et al., 1998). De relatieve vochtigheid in de zwembadhal mag volgens Vlare II maximum 65% bedragen.

8.2 FASE 1: ANALYSE VAN DE ENERGIEVRAAG

Kennis van de energievraag is onmisbaar om een warmtekrachtsysteem op een correcte manier technisch te dimensioneren. In het stedelijk zwembad bestaat de energievraag enerzijds uit brandstofverbruik voor het verwarmen van het zwembadwater, de zwembadruimte en het douchewater en anderzijds uit elektriciteitsverbruik voor verlichting en het aandrijven van diverse pompen.

8.2.1 Warmtevraag

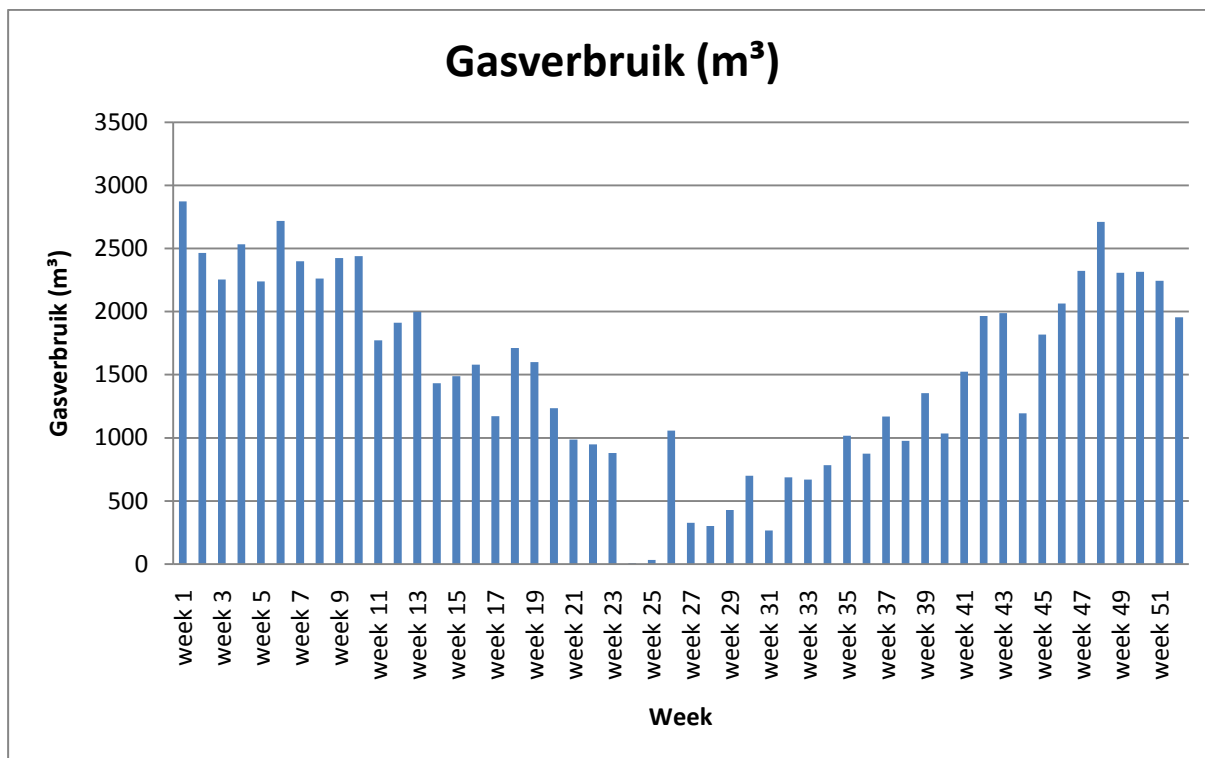
In een zwembad zijn de verwarming van de ventilatielucht en verwarming van het badwater de twee belangrijkste warmteposten. In onderstaande afbeelding is een uitsplitsing weergegeven van de diverse warmtevragers in een typisch zwembad (Klok, 2009).



Figuur 27: Uitsplitsing diverse warmtevragers (Klok, 2009)

De grootste post (30 tot 40 %) bestaat uit de verwarming van de ventilatielucht van de zwembaden. Voor een prettige en gezonde omgeving moet de lucht immers een aantal maal per dag ververs worden, om de waterdamp en het chloorgehalte van de lucht laag genoeg te houden (Isaac, Hayes, & Akers, 2010). Ook verwarming van het bad- en suppletiewater is een belangrijke energievragers. Suppletiewater is nodig om het waterverlies van verdamping te compenseren en om een toename van de concentratie vervuilende stoffen in het water te voorkomen. Verder is ook de verwarming van het warm tapwater een beduidende warmtevrager.

In het stedelijk zwembad van Lommel wordt aardgas gebruikt voor de verwarming van alle bovenstaande warmtevragers. Het totale jaarverbruik aan aardgas bedroeg in 2009 zo'n 85.973 m³ en in 2010 circa 79.407 m³. Een uitsplitsing van het totale gasverbruik (m³) wordt in onderstaande grafiek weergegeven voor de 52 weken van het jaar 2010. In bijlage 3 kunnen tevens de cijfermatige verbruiksgegevens van het zwembad voor 2010 worden teruggevonden.



Figuur 28: Gasverbruik (m³) stedelijk zwembad

Zoals te zien is in bovenstaande figuur, wordt er meer aardgas verbruikt tijdens de wintermaanden dan tijdens de zomermaanden. In week 24 en 25 valt het aardgasverbruik terug naar quasi 0. Dit kunnen we verklaren doordat het zwembad eind juni altijd twee weken jaarlijkse sluiting houdt. In week 26 is er sprake van een piek omdat het verse bassinwater dan verwarmd moet worden.

De gegevens over het aardgasverbruik werden bekomen door wekelijks de meterstand van het gasverbruik te noteren. Er werd geen gebruik gemaakt van facturen. De juiste conversiefactor om het gasverbruik in m³ om te zetten naar het gasverbruik in kWh, kon dus ook niet op deze facturen afgelezen worden. Om het verbruik van aardgas in kubieke meter (m³) om te rekenen naar kWh, is het nodig gebruik te maken van een omzettingcoëfficiënt die de calorische waarde van het aardgas aangeeft. Een m³ aardgas bevat tussen de 9,5278 en 12,7931 kWh (VREG, 2011c). De juiste omzettingcoëfficiënt die gebruikt moet worden voor de omrekening verschilt op maandbasis van het ene geaggregeerde ontvangststation (GOS) tot het andere. In een geaggregeerd ontvangststation (GOS) wordt de druk van het gas dat van de hogedruk leidingen van Fluxys komt, verlaagt naar het lagedruk distributienet van de netbeheerder. In Lommel is Inter-Energa de distributienetbeheerder van aardgas en Infrac de netoperator. De gemiddelde calorische bovenwaarde voor het geaggregeerd ontvangststation (GOS) in Lommel voor 2010 bedraagt 11.3780 kWh/m³ onder normale omstandigheden. Dit gemiddelde werd berekend op basis van maandelijkse meetgegevens van Infrac (2011) die worden weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 15: Calorische bovenwaarden van het aardgas aan het geaggregeerd ontvangstation (GOS) Lommel (Infrax, 2011)

Maand	CBW kWh/m ³ n
januari 2010	11,3251
februari 2010	11,3294
maart 2010	11,3036
april 2010	11,4402
mei 2010	11,4526
juni 2010	11,3639
juli 2010	11,3494
augustus 2010	11,2924
september 2010	11,3872
oktober 2010	11,4629
november 2010	11,4052
december 2010	11,4242
Gemiddelde	11,3780

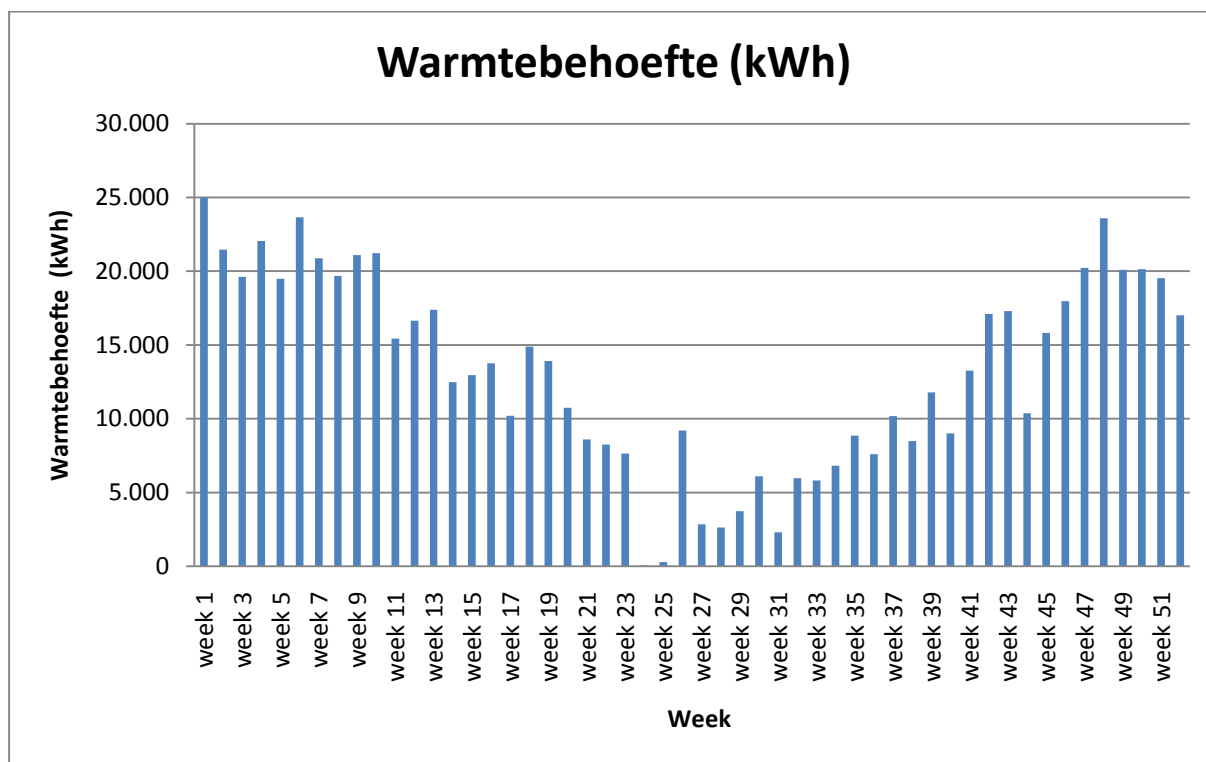
De wekelijkse verbruiksgegevens (in m³) voor het jaar 2010, die in bijlage 3 worden weergegeven, worden met behulp van deze omzettingcoëfficiënt van 11.3780 kWh/m³ omgerekend naar verbruiksgegevens in kWh.

Het aardgasverbruik (in kWh) stemt echter niet overeen met de effectieve warmtebehoefte van het zwembad. Om de effectieve warmtebehoefte van het zwembad te kennen, moeten nog twee correcties worden uitgevoerd.

Het aardgasverbruik (in kWh) werd berekend op basis van de calorische bovenwaarde. Deze bovenste verbrandingswaarde is echter enkel van toepassing indien de latente warmte van de waterdamp uit de rookgassen wordt gerecupereerd, wanneer dus de rookgassen gecondenseerd worden. Meestal wordt deze warmte echter niet benut en moet men gebruik maken van de onderste verbrandingswaarde, die gemiddeld 90% bedraagt van de bovenste verbrandingswaarde (Energik, 2004). Het verbruik in kWh moet dus vermenigvuldigd worden met 0.90 indien we te maken hebben met een niet-condenserende ketel.

Bovendien moeten we ook rekening houden met het rendement van de ketel om vanuit het verbruik de echte warmtevraag te berekenen. Indien wordt uitgegaan van een gasgestookte ketel met een rendement van 85%, dienen we opnieuw het gefactureerde verbruik te vermenigvuldigen met 0.85.

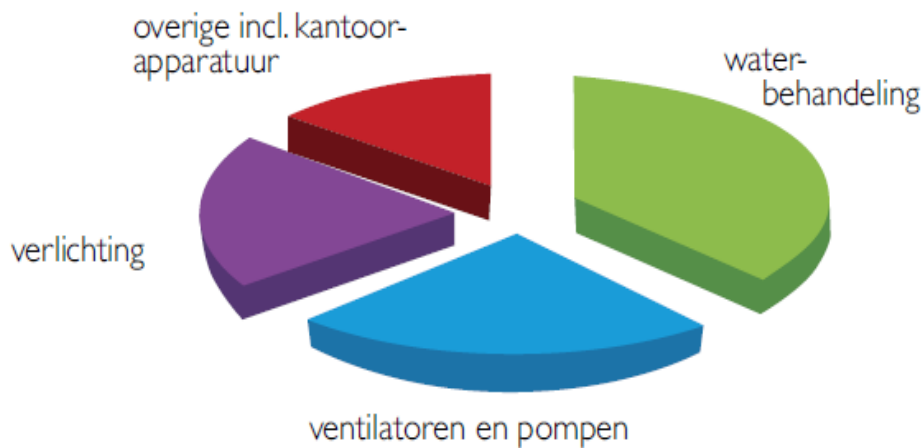
In bijlage 3, waar de wekelijkse verbruiksgegevens van het zwembad zijn weergegeven, wordt de kolom "warmtebehoefte (kWh)" bekomen door de kolom "gasverbruik (kWh)" te vermenigvuldigen met 0.90 (correctie onderste verbrandingswaarde) en met 0.85 (correctie rendement ketel). In onderstaande figuur wordt de wekelijkse warmtebehoefte weergegeven. De totale warmtebehoefte voor het jaar 2010 bedraagt 691.172 kWh.



Figuur 29: Warmtebehoefte (kWh) zwembad

8.2.2 Elektriciteit

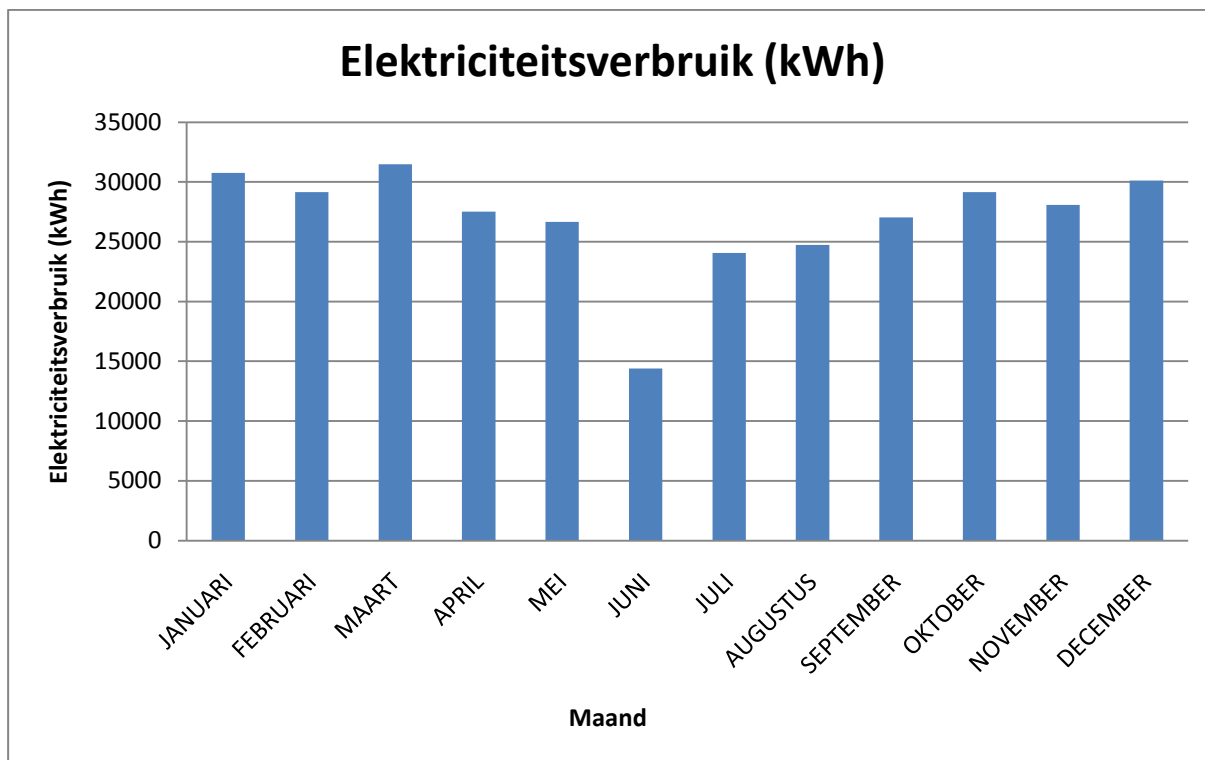
Wat betreft de elektriciteitsvraag, wordt een opsplitsing van de belangrijkste verbruiksposten in een typisch zwembad weergegeven in de volgende figuur (Klok, 2009).



Figuur 30: Uitsplitsing verbruiksposten elektriciteit (Klok, 2009)

Een eerste grote post betreft de waterbehandeling. Er wordt veel elektriciteit verbruikt door de verschillende pompen, die een groot deel van de dag in bedrijf zijn om de waterkwaliteit te garanderen. Ook ventilatoren en pompen van de klimaatinstallaties verbruiken de nodige elektriciteit. Om de luchtkwaliteit in de zwembaden op peil te houden is immers een aanzienlijke hoeveelheid ventilatie nodig. Tot slot wordt er nog elektriciteit verbruikt door de verlichting en door de apparatuur in de kantoren en de cafetaria (Klok, 2009).

In bijlage 4 worden de maandelijkse verbruiken van elektriciteit weergegeven. Het jaarlijkse elektriciteitsverbruik bedroeg in 2010 in totaal zo'n 323.152 kWh. Aan de hand van de maandelijkse factuurgegevens werd onderstaand verbruikspatroon van elektriciteit voor 2010 vastgesteld. Net zoals in bovenstaand verbruikspatroon van warmte, zien we ook hier een hoger verbruik in de winter en een lager verbruik in de zomer. Het verschil tussen zomer en winter is echter veel minder uitgesproken dan in het verbruikspatroon van warmte. Het lage elektriciteitsverbruik in juni is te wijten aan de jaarlijkse sluitingsperiode gedurende twee weken eind juni.



Figuur 31: Elektriciteitsverbruik (kWh) stedelijk zwembad

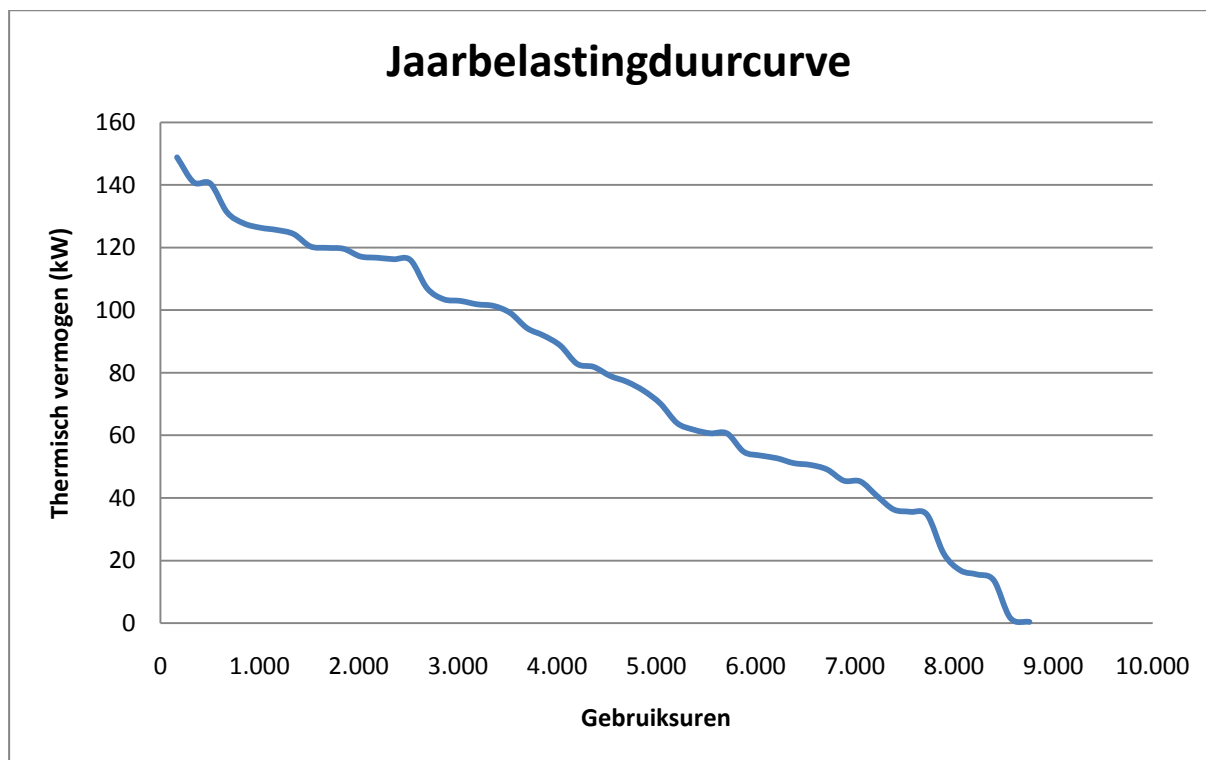
8.3 FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES

Nadat in de vorige fase de energievraag in kaart is gebracht, kan in de tweede fase de warmtekrachtinstallatie technisch gedimensioneerd worden. Aan de hand van de verzamelde gegevens over de energievraag wordt een jaarbelastingduurcurve opgesteld. In zo'n diagram worden, zoals eerder uitgelegd, de 8760 uurlijkse waarden van de energievraag gerangschikt volgens grootte (en dus niet chronologisch). We kunnen zowel voor warmte als voor elektriciteit een jaarbelastingduurcurve opstellen (Cogen Vlaanderen, 2006).

Om van bovenstaande verbruiksdiagrammen over te gaan naar een jaarbelastingduurcurve, dienen twee grote stappen ondernomen te worden. Een jaarbelastingduurcurve wordt ook wel 'geordend vermogensdiagram' genoemd, we moeten dus enerzijds van het energieverbruik in kWh overgaan naar vermogen in kW en anderzijds de benodigde vermogens ordenen. We verkrijgen het vermogen in kW door het verbruik in kWh te delen door het aantal uren waarover dit gebruik gerealiseerd werd.

8.3.1 Jaarbelastingduurcurve warmte

Aangezien alle warmte verbruiksgegevens (in kWh) per week zijn gemeten, delen we het verbruik door het aantal uren per week, namelijk 168 uur en zo krijgen we het vermogen in kW. Daarna worden de benodigde vermogens gerangschikt in de tijd, te beginnen met de grootste waarde. In bijlage 3 zijn de cijfergegevens en berekeningen van de jaarbelastingduurcurve terug te vinden.

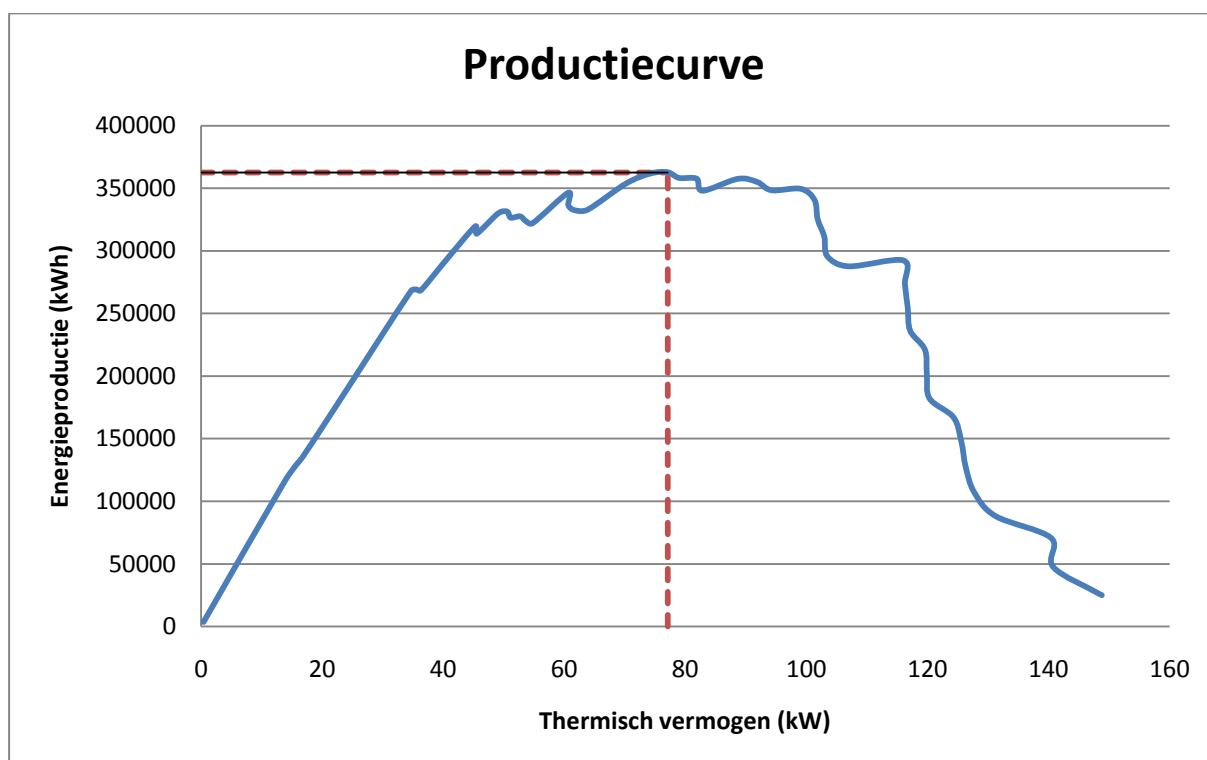


Figuur 32: Thermische jaarbelastingduurcurve zwembad

Op de grafiek staat op de horizontale as het aantal uren (gaande tot 8760 uren, wat overeenkomt met een jaar), met per uur het benodigde vermogen in kW op de verticale as. De uren staan gesorteerd van een hoog benodigd vermogen naar een laag benodigd vermogen. Het oppervlak dat door de grafiek en de assen wordt ingesloten, geeft de totale jaarlijkse warmtevraag weer in kWh, in dit geval dus 691.172 kWh. Van de jaarbelastingduurcurve kan ook afgelezen worden hoeveel uur een bepaald thermisch vermogen nodig is. Er is bijvoorbeeld gedurende ongeveer 2000 uur op een jaar een thermisch vermogen groter dan 120 kW nodig.

Uitgaande van bovenstaande jaarbelastingduurcurve kunnen we een inschatting maken van het vermogen en het aantal draaiuren van de optimale warmtekrachtinstallatie, door te zoeken naar de installatie die het meeste warmte produceert (energie, gemeten in kWh). Dit komt overeen met het zoeken naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve.

Om te bepalen wat de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve is, kan gebruik worden gemaakt van een productiecurve. Deze curve wordt bekomen door voor elk vermogen op de Y-as van de jaarbelastingduurcurve, de oppervlakte van de rechthoek onder de curve te berekenen. Deze oppervlakte geeft de geproduceerde hoeveelheid energie (kWh) weer, aangezien het vermogen (kW) vermenigvuldigd wordt met het aantal gebruiksuren (uur). In de productiecurve wordt dan de geproduceerde hoeveelheid energie (in kWh) op de Y-as in functie van het vermogen van het systeem (in kW) op de X-as uitgezet. We gaan hierbij wel uit van de veronderstelling dat het systeem slechts één mogelijk werkingpunt heeft, namelijk vollast. Het maximum van de productiecurve correspondeert dan met de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve (Cogen Vlaanderen, 2006).



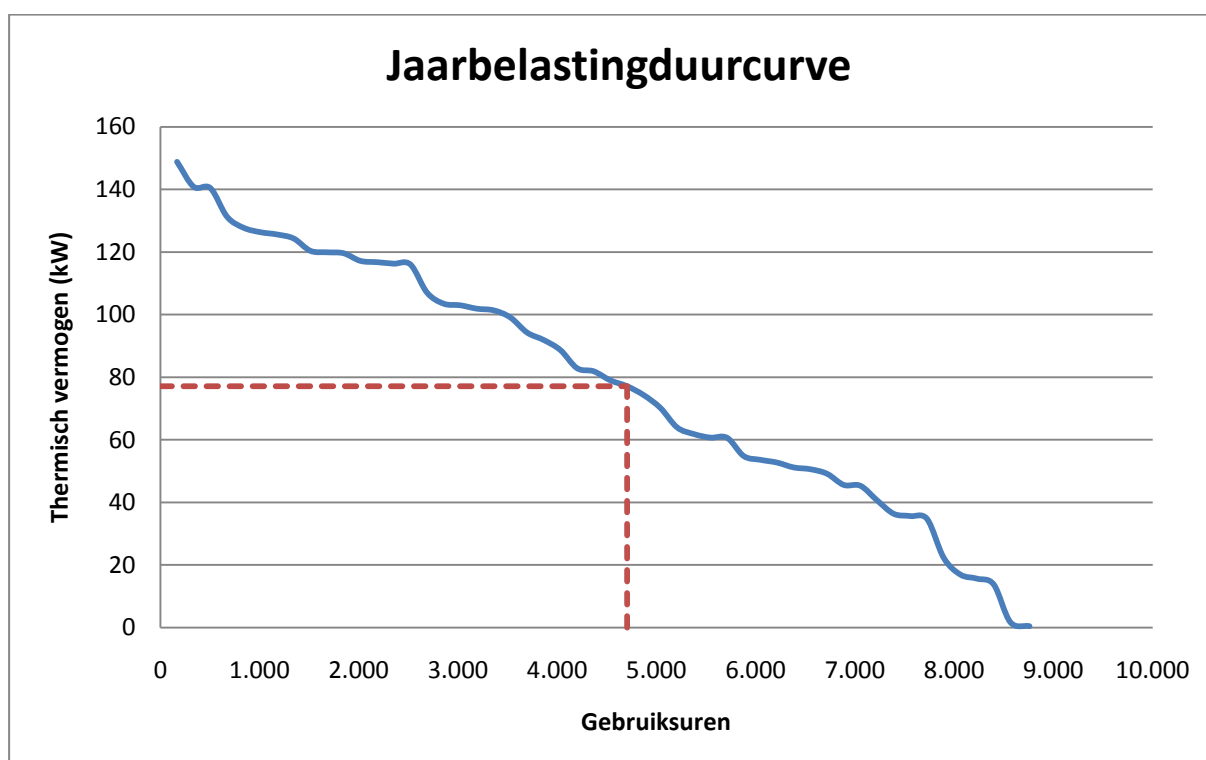
Figuur 33: Thermische productiecurve zwembad

De productiecurve geeft weer hoeveel warmte een warmtekrachtinstallatie met een bepaald vermogen jaarlijks op vollast kan produceren. Uit de figuur blijkt dat een installatie met een thermisch vermogen van 77 kW optimaal is, aangezien hierbij de grootste hoeveelheid warmte geproduceerd kan worden (362.651 kWh per jaar).

Een belangrijke opmerking bij de grafiek is dat voor een grote range aan thermische vermogens, een quasi even grote hoeveelheid warmte geproduceerd kan worden. Indien een installatie gekozen wordt uit een thermische vermogensrange van 70 kW – 99 kW, is de hoeveelheid opgewekte warmte maximaal 5% minder dan onder optimale omstandigheden (362.651 kWh bij 77 kW). Dit is

een belangrijke conclusie die we in het vervolg van de analyse zeker in overweging moeten nemen. Voor de technische en ook de financiële haalbaarheid is het van belang dat een WKK-installatie zoveel mogelijk draaiuren maakt. Indien we het thermisch vermogen van de installatie verminderen, zal het aantal uren dat de machine in vollast kan werken toenemen. Een installatie met een thermisch vermogen tussen de 70 en 77 kW is dus ideaal.

Na het bepalen van het optimale vermogen (77 kW) met behulp van de productiecurve, kunnen we deze optimale hoeveelheid ook aanduiden in de jaarbelastingduurcurve. We zijn er nu zeker van dat bij 77 kW een maximale hoeveelheid warmte geproduceerd wordt van 362.651 kWh per jaar.



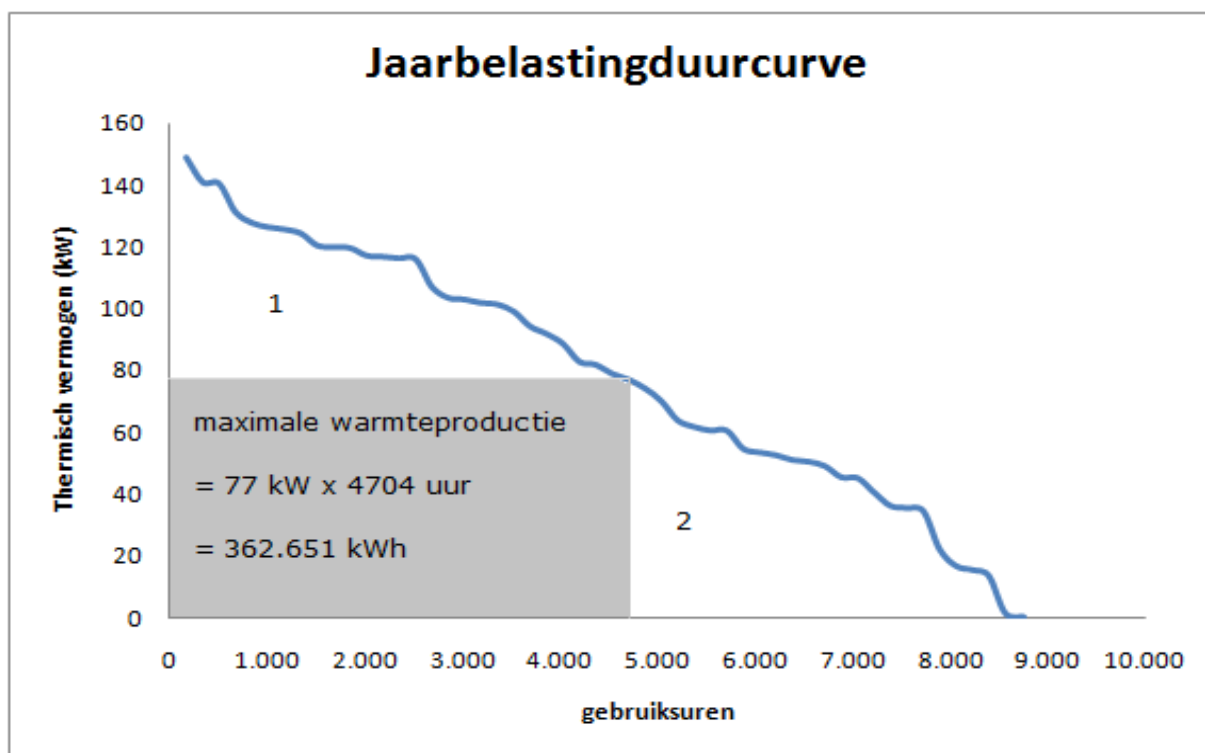
Figuur 34: Thermische jaarbelastingduurcurve zwembad met aanduiding optimale installatie

De intersectie van de 'optimale rechthoek' met de verticale as geeft de optimale waarde qua thermisch vermogen van de warmtekrachtfaciliteit, in dit geval 77 kW. Als de installatie op vollast werkt, zal gedurende 4.704 uren per jaar een vermogen van 77 kW geleverd worden. Het thermisch vermogen van de optimale WKK-installatie (77 kW) bedraagt ongeveer 52% van het maximaal benodigd piekvermogen van 149 kW (zie snijpunt grafiek met y-as).

In onderstaande grafiek worden de verschillende oppervlaktes onder de jaarbelastingduurcurve besproken. De warmteproductie die gerealiseerd wordt met een optimale warmtekrachtinstallatie

wordt aangeduid in de grijze rechthoek. Een installatie met een thermisch vermogen van 77 kW die 4.704 uren werkt per jaar, produceert 362.651 kWh warmte. De volledige oppervlakte onder de curve stelt de totale jaarlijkse warmtebehoefte van het zwembad (691.172 kWh) voor. De beschouwde WKK-installatie kan dus zo'n 52% ($362.651 \text{ kWh} / 691.172 \text{ kWh}$) van de totale warmtebehoefte leveren of anders gesteld: de aangeduide rechthoek bedraagt 52% van de totale oppervlakte onder de jaarbelastingduurcurve.

Gedurende een groot deel van de werkingsperiode van de WKK kan de installatie echter niet de totale verwarmingsbehoefte van de organisatie voorzien, er wordt dan immers een groter vermogen verlangd dan door de warmtekrachtkoppeling geleverd kan worden. In onderstaande grafiek wordt dit grafisch voorgesteld als de oppervlakte tussen de warmtevraag en het vermogen geleverd door de installatie (oppervlakte 1). Deze energiebehoefte dient geleverd te worden door bijkomende ketels. Ook wanneer de installatie inactief is (oppervlakte 2), dient de energiebehoefte met bijkomende ketels vervuld te worden.



Figuur 35: Thermische jaarbelastingduurcurve zwembad met aanduiding oppervlaktes

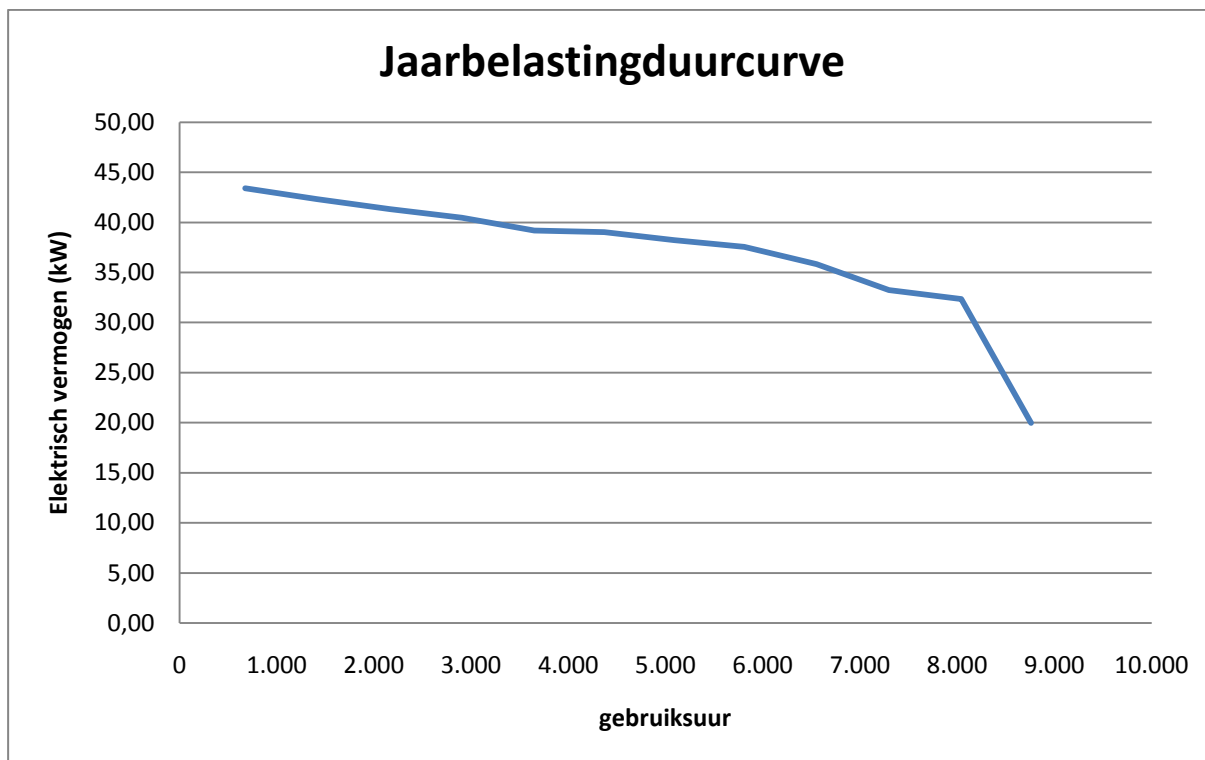
8.3.2 Jaarbelastingduurcurve elektriciteit

In de meeste gevallen vertrekt men bij het dimensioneren van een installatie van de warmtevraag. Het argument hiervoor is dat in tegenstelling tot warmte, elektriciteit makkelijk getransporteerd

kan worden. Indien een warmtegedimensioneerde WKK een teveel aan elektriciteit opwekt, kan deze elektriciteit elders nuttig gebruikt of op het net gezet worden, terwijl lokaal een optimale hoeveelheid warmte opgewekt wordt met de installatie. Indien een elektrisch gedimensioneerde WKK een optimale hoeveelheid elektriciteit produceert, maar te veel warmte opwekt, kan deze niet altijd nuttig aangewend worden of dient ze zelfs weggekoeld te worden (Cogen Vlaanderen, 2006).

Er zijn twee argumenten om de installatie toch op de elektriciteitsvraag te dimensioneren (Cogen Vlaanderen, 2006). Bij een warmtegedimensioneerde installatie kan het voorvallen dat de WKK niet actief is tijdens een periode met een hoge elektriciteitsvraag. De elektriciteit dient dan aangekocht te worden bij het openbare net en dit kan leiden tot een hoge penalisatie voor het piekverbruik. Bovendien is het terugleveren van overtollige elektriciteit aan het net economisch niet erg aantrekkelijk, de verkoopprijzen van elektriciteit liggen namelijk een stuk lager dan de aankooprijzen. Beide argumenten zorgen ervoor dat men uit economische beweegredenen toch kan kiezen voor een elektrisch gedimensioneerde installatie. In deze gevalstudie bij wijze van voorbeeld ook de jaarbelastingduurcurve van elektriciteit opgesteld.

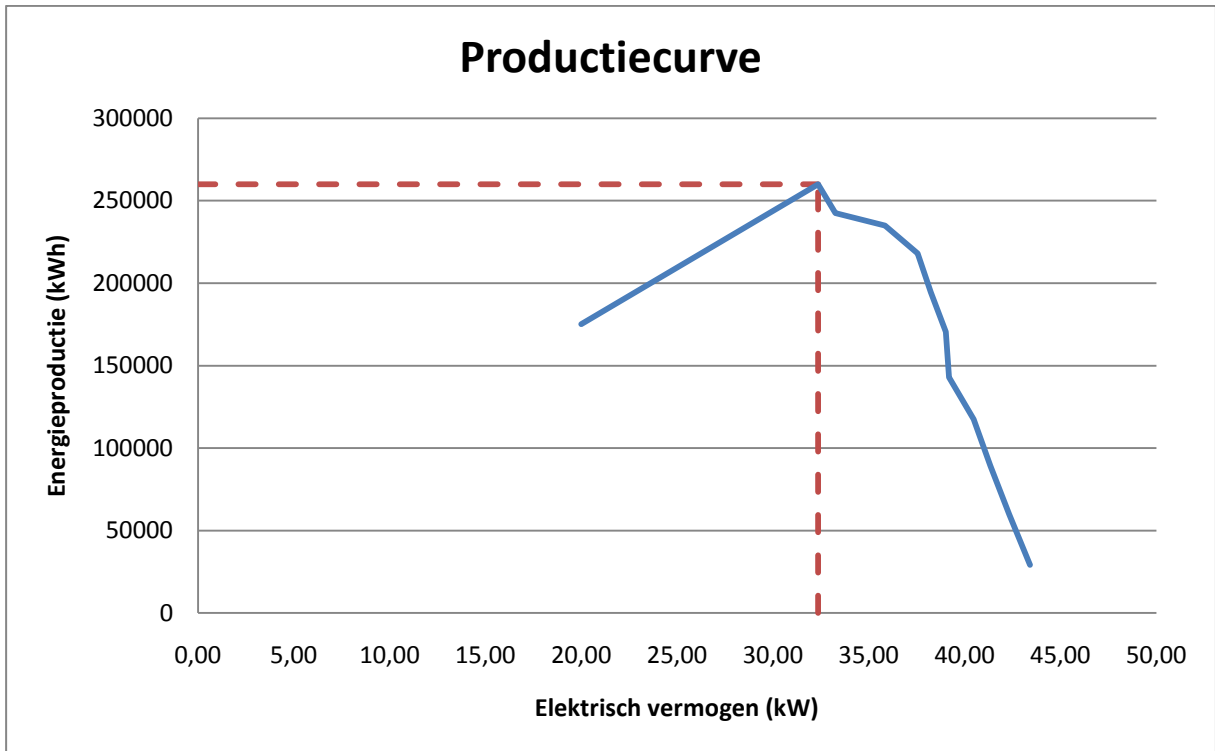
Ook voor de dimensionering op basis van elektriciteitsvraag wordt een jaarbelastingduurcurve opgesteld, uitgaande van de maandelijkse verbruiksgegevens van het zwembad. Aangezien alle verbruiksgegevens van elektriciteit (in kWh) gemeten werden op maandelijkse basis, wordt het verbruik gedeeld door het aantal uren per maand, om zo het vermogen te verkrijgen dat die maand nodig was. Daarna worden de benodigde vermogens gerangschikt in de tijd, te beginnen met de grootste waarde.



Figuur 36: Elektrische jaarbelastingduurcurve zwembad

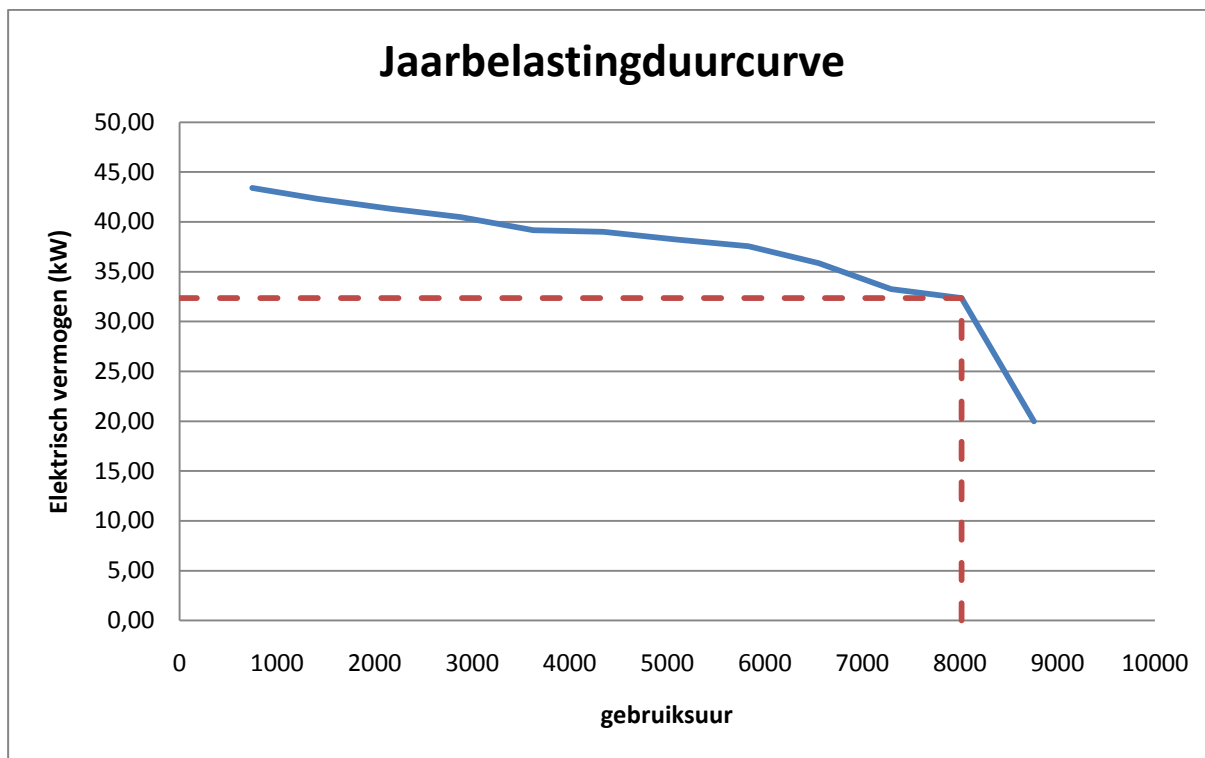
Op de grafiek staat op de horizontale as het aantal uren (gaande tot 8760 uren, wat overeenkomt met een jaar), met per uur het benodigde vermogen in kW op de verticale as. De uren staan gesorteerd van een hoog benodigd vermogen naar een laag benodigd vermogen. Het oppervlak dat door de grafiek en de assen wordt ingesloten, geeft de totale jaarlijkse elektriciteitsvraag weer in kWh, in dit geval 323.152 kWh.

Uitgaande van bovenstaande jaarbelastingduurcurve kunnen we een inschatting maken van het vermogen en het aantal draaiuren van de optimale warmtekrachtinstallatie, door te zoeken naar de installatie die het meeste elektriciteit produceert (energie, gemeten in kWh). Dit komt overeen met het zoeken naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve. Om deze grootste rechthoek te vinden, stellen we opnieuw een productiecurve op.



Figuur 37: Elektrische productiecurve zwembad

De productiecurve geeft weer hoeveel elektriciteit een warmtekrachtinstallatie met een bepaald vermogen jaarlijks op vollast kan produceren. Uit de figuur blijkt dat een installatie met een elektrisch vermogen van 32,34 kW optimaal is, aangezien hierbij de grootste hoeveelheid elektriciteit geproduceerd kan worden (260.014 kWh elektriciteit per jaar). We kunnen dit optimale vermogen ook aanduiden in de jaarbelastingduurcurve.



Figuur 38: Elektrische jaarbelastingduurcurve zwembad met aanduiding optimale installatie

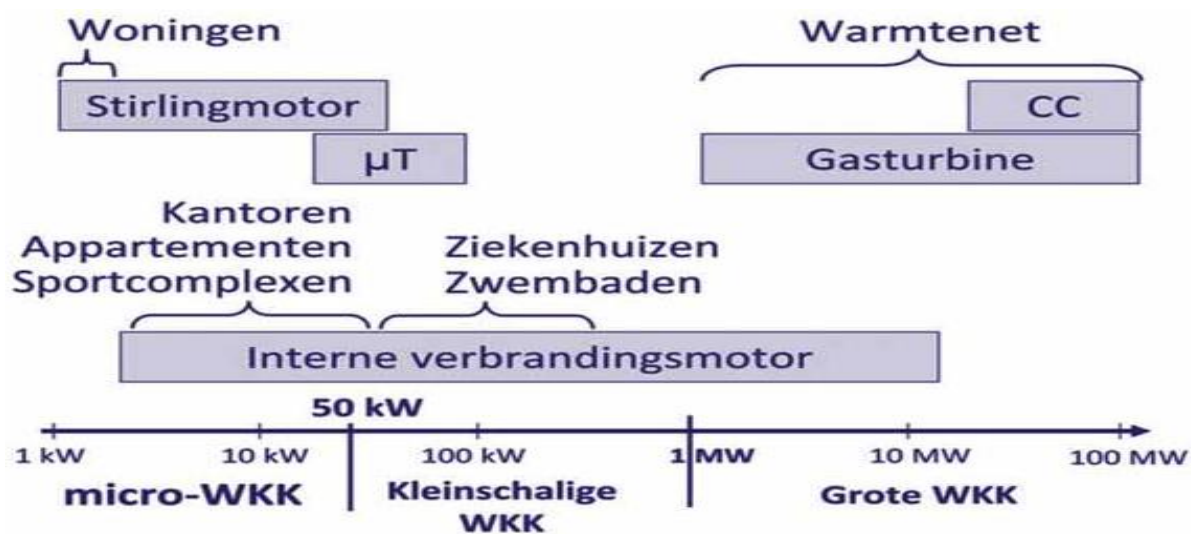
De intersectie van de 'optimale rechthoek' met de verticale as geeft de optimale waarde qua elektrisch vermogen van de warmtekrachtfaciliteit, in dit geval $32,34 \text{ kW}_e$. Als de installatie op vollast werkt, zal gedurende 8.040 uren per jaar een vermogen van $32,34 \text{ kW}_e$ geleverd worden. Het elektrisch vermogen van de optimale WKK-installatie bedraagt ongeveer 75% van het maximaal benodigd piekvermogen van $43,40 \text{ kW}_e$.

8.3.3 Evaluatie JBDC's en keuze meest geschikte technologie

In theorie volstaat het om te zoeken naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurves. In praktijk moet bij de dimensionering ook rekening gehouden worden met een reeks andere factoren, zoals de beschikbare installaties op de markt (niet alle vermogens zijn beschikbaar), de verkoopprijs van elektriciteit per kWh, warmtekrachtverhouding, de betrouwbaarheid van de WKK-installatie (meerdere kleine WKK's in plaats van één grote zijn betrouwbaarder), de mogelijkheid van werking op deellast, het aantal start-stops, etc. (Cogen Vlaanderen, 2010).

In het stedelijk zwembad van Lommel wordt de gewenste warmte gevraagd aan een temperatuurniveau lager dan 120°C en er is geen behoefte aan stoom. Dit is al een eerste indicatie om te kiezen voor een motor en niet voor een technologie met een turbine (Energik, 2004).

Bovendien blijkt ook uit figuur 23 (hoofdstuk 7), die hieronder voor het gemak herhaald wordt, dat een interne verbrandingsmotor aangewezen is bij kleinschalige WKK's (Cogen Vlaanderen, 2010).



Figuur 39: Verschillende WKK-technologieën met hun toepassingsgebieden (Cogen Vlaanderen, 2010)

In het vervolg van de analyse wordt verder gewerkt met de dimensionering op basis van de warmtevraag, aangezien dit volgens Cogen Vlaanderen (2006) de voorkeur geniet. Zoals hierboven al werd aangehaald, is de reden hiervoor dat in tegenstelling tot warmte, elektriciteit goed transporteerbaar is. Het is dus beter de optimale hoeveelheid warmte te produceren en het eventuele overschot aan elektriciteit op het net te zetten, dan een optimale hoeveelheid elektriciteit te produceren en niets met het eventuele overschot aan warmte te kunnen doen.

Uitgaande van de grootste rechthoek die bekomen werd bij de dimensionering op basis van de warmtevraag, kunnen we concluderen dat het te installeren thermisch vermogen gelijk is aan 77 kW. Het te installeren elektrisch vermogen dat hiermee samenvalt kan bepaald worden aan de hand van het Excel bestand van Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010). Bij een installatie op bio-olie met een elektrisch vermogen van 54 kW_e hoort een elektrisch rendement van 33% en een thermisch rendement van 47% en een thermisch vermogen van 77 kW_t. Deze gegevens worden samengevat in volgende tabel.

Tabel 16: Kenmerken warmtekrachtinstallatie zwembad

Kenmerk WKK-installatie	Waarde
Elektrisch vermogen	54 kW _e
Elektrisch rendement	33 %
Thermisch rendement	47 %
Totale rendement	80 %
Thermisch vermogen	77 kW _{th}

Om te verifiëren of een installatie met een elektrisch vermogen van 54 kW_e effectief een thermisch vermogen heeft van 77 kW_{th} (zoals voor onze gevalstudie optimaal is), kunnen we volgende berekeningen doen. Een WKK-installatie op bio-olie met een elektrisch vermogen van 54 kW_e zal volgens Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) een elektrisch rendement hebben van 33% en een thermisch rendement van 47%. Via deze rendementen kan de warmtekrachtverhouding en finaal ook het thermisch vermogen bepaald worden. De warmtekrachtverhouding wordt door Cogen Vlaanderen (2006) gedefinieerd als de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid warmte en de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit en kan berekend worden aan de hand van de rendementen. De warmtekrachtratio bedraagt $0,47/0,33 = 1,42 \text{ kW}_{th}/\text{KW}_e$. Het thermisch vermogen wordt nu bekomen door het elektrisch vermogen te vermenigvuldigen met deze warmtekrachtverhouding. Het thermisch vermogen bedraagt dan $54 \text{ kW}_e * 1,42 \text{ kW}_{th}/\text{KW}_e \approx 77 \text{ kW}_{th}$.

In bijlage 3, waar de cijfergegevens van de jaarbelastingduurcurve zijn weergegeven, is te zien dat een installatie van 77 kW_{th} gedurende 4.704 uren in werking zal zijn. Bij 4.704 werkingsuren zal met een geïnstalleerd elektrisch vermogen van 54 kW_e 254.016 kWh elektrische energie per jaar geproduceerd worden en met een geïnstalleerd thermisch vermogen van 77 kW_{th} 362.208 kWh thermische energie per jaar. Deze thermische energie kan ook afgelezen worden uit bijlage 3 (kolom 'bepaling rechthoek'), maar vanwege afrondingsfouten is de waarde lichtjes afwijkend.

De totale warmtevraag over een volledig jaar bedraagt 691.172 kWh, zodat nog 328.964 kWh warmte nodig is die geleverd wordt door een verwarmingsketel. Aangezien er jaarlijks een elektriciteitsbehoefte is van 323.152 kWh en er 254.016 kWh elektriciteit geproduceerd kan worden met behulp van de WKK-installatie, moet er nog zo'n 69.136 kWh elektriciteit van het net aangekocht worden. Bovenstaande cijfergegevens staan samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 17: Warmte- en elektriciteitsproductie WKK-installatie zwembad

Totale warmtebehoefte	691.172	kWh _{th}
Totale elektriciteitsvraag	323.152	kWh _e
Warmte geleverd door WKK	362.208	kWh _{th}
Elektriciteit geleverd door WKK	254.016	kWh _e
Warmte geleverd door ketel	328.964	kWh _{th}
Elektriciteit aangekocht van het net	69.136	kWh _e

8.4 FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE

In deze fase van het onderzoek wordt nagegaan of een investering in de vooropgestelde warmtekrachtinstallatie economisch gezien levensvatbaar is.

Het stedelijk zwembad is samen met de evenementenhal De Soeverein en de stedelijke sporthal ondergebracht in een autonoom gemeentebedrijf (AGB) "AGB Lommel Sport en Recreatie". Een autonoom gemeentebedrijf is een door de gemeenteraad opgerichte, van de gemeente afgescheiden, publieke rechtspersoon. Het AGB Lommel Sport en Recreatie is een bedrijf dat door het Lommelse gemeentebestuur werd opgericht in 2004, met een eigen bestuursorgaan en met een eigen boekhouding. Als gevolg van die verzelfstandiging is het bedrijf onderworpen aan de belastingsregeling, meer bepaald de vennootschapsbelasting en moet rekening gehouden worden met de regels van de BTW-wetgeving.

Bij het onderzoek naar de economische haalbaarheid van een investering in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie, gaan we ervan uit dat het AGB Lommel Sport en Recreatie het project in eigen beheer zal uitvoeren. Dit wil zeggen dat de opbrengsten en jaarlijkse inkomende cashflows die het project oplevert enkel bestemd zijn voor het AGB. Men kan op deze manier onmiddellijk beschikken over de warmteproductie en men heeft het volle beslissingsrecht om de opgewekte elektriciteit te gebruiken of te leveren aan het openbaar net. Hiertegenover staat dat er geen derde partij of energiebedrijf wordt betrokken bij de financiering van het investeringsproject en dat men dus de initiële investeringsuitgave van de WKK-installatie voor honderd procent zelf zal dragen. Ook de jaarlijkse uitbatings- en onderhoudskosten vallen ten laste van het autonoom gemeentebedrijf. In de economische balans zullen ook de subsidies en financiële voordelen opgenomen worden waarop men recht heeft bij de investering in warmtekrachtkoppeling.

De economische evaluatie wordt uitgevoerd aan de hand van verwachte kasstromen en niet op basis kosten en opbrengsten (boekhoudkundige resultaten). Een kasstroom is immers objectiever

te bepalen dan een boekhoudkundige opbrengst of kost, die bijvoorbeeld beïnvloed wordt door afschrijvingsmethodes en waarderingsgrondslagen.

Het is belangrijk op te merken dat enkel differentiële kasstromen beschouwd worden in de investeringsanalyse. We beschouwen dus enkel inkomsten en uitgaven die ontstaan ten gevolge van het nieuwe energiesysteem, die niet zouden voorkomen in de bestaande situatie zonder WKK-installatie. Cashflows die zich voordoen onder de huidige situatie en die nog steeds ondervonden zullen worden bij het nieuwe energiesysteem, zullen niet opgenomen worden.

8.4.1 Investeringskosten

We gaan uit van een investering in een WKK-installatie op pyrolyse-olie die hierboven aangeduid werd als meest geschikte technologie, met een elektrisch vermogen van 54 kW_e en een thermisch vermogen van 77 kW_{th}.

De investeringskosten in een WKK op bio-olie worden volgens Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) berekend aan de hand van een logaritmische functie in functie van de grootte van de motor, waarbij schaalvoordelen optreden vanaf een elektrische capaciteit van 1600 kW_e. De formule voor de berekening van de investeringskosten per kW_e is dan ook verschillend al naargelang we te maken hebben met een installatie met een elektrisch vermogen kleiner of groter dan 1600 kW_e.

$$I = (-93,709 \times \ln(P_e) + 991.53) \times 2 \quad \text{Indien } P_e < 1600 \text{ kW}_e$$

$$I = 600 \quad \text{Indien } P_e > 1600 \text{ kW}_e$$

De investeringskosten per kW_e voor de vooropgestelde warmtekrachtinstallatie, met een elektrisch vermogen van 54 kW_e, bedragen 1.235 €/kW_e, wat neerkomt op een totale investering van €66.714.

Verder is ook een investering in een rookgasreiniger van belang om de uitstoot van schadelijke stoffen te beperken. De investeringskost hiervan bedraagt voor de gekozen installatie €4.356 (Stroobandt 2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010).

Aangezien de gegevens van Stroobandt dateren van 2007, moeten bovenstaande kostprijzen nog geconverteerd worden naar huidige prijzen. Voor deze conversie wordt de Marshall & Swift Equipment Cost Index gebruikt. Deze index geeft in dimensieloze cijfers aan hoe de kosten van industriële installaties veranderen doorheen de tijd. De Marshall & Swift Equipment Cost Index bedroeg in 2007 1.373,3 en in 2010 1.457,4, de prijzen van industriële installaties zijn dus met zo'n 6,12 % gestegen in deze periode (Chemical Engineering, 2011). De investeringskost voor de WKK bedraagt dan €70.800 en de investeringskost voor de rookgasreiniger bedraagt dan €4.623.

Het is aangewezen om bij de start van een project rekening te houden met onvoorziene omstandigheden en daarom in de budgetraming een toeslag voor onvoorziene kosten in rekening te brengen. De risicopremie kan best geschat worden op 15 à 20% van de totale investeringskosten (Cogen Vlaanderen, 2006). Aangezien we in deze masterproef te maken hebben met een nieuwe technologie, warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie, rekenen we met een risicopremie van 20% van de totale investeringskost.

Uitgaande van bovenstaande gegevens, worden de totale investeringskosten geraamd op € 90.507.

Tabel 18: Investeringskosten WKK-installatie zwembad

Warmtekrachtinstallatie	€ 70.800
Rookgasreiniger	€ 4.623
Risicopremie	€ 15.085
Totaal	€ 90.507

8.4.2 Uitgaande kasstromen

8.4.2.1 Onderhouds- en uitbatingskosten

Doordat de motor draait op pyrolyse-olie, ligt de onderhoudsprijs een stuk hoger dan voor conventionele kleine warmtekrachtinstallaties op aardgas. Een onderhoudsformule waarbij alles inbegrepen is, kost voor een conventionele WKK-installatie op aardgas ongeveer 12 à 15 €/MWh. Bij motoren die draaien op alternatieve brandstoffen zoals bio-oliën, zijn de onderhoudskosten een pak hoger doordat meer servicebeurten en kleine revisies vereist zijn (Stroobandt, 2007).

Uit de Excel file van Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) kunnen ook de onderhouds- en uitbatingskosten van een WKK-installatie op bio-olie en van de rookgasreiniger bepaald worden. Voor de gekozen installatie bedragen de onderhouds- en uitbatingskosten van de installatie 45,9 €/MWh_e en voor de rookgasreiniger (ureum) 16,8 €/MWh_e. Uitgaande van 254.016 kWh_e of 254 MWh_e geproduceerde elektrische energie per jaar, komt dit neer op €11.656 onderhouds- en werkingskosten van de WKK en €4.272 onderhoudskosten voor de rookgasreiniger.

Ook hier moet rekening gehouden worden met een verandering van het prijspeil. Om de cijfers van 2007 naar 2010 te converteren, wordt gebruik gemaakt van de consumptieprijsindex. In december 2007 bedroeg deze index 108,40 en in december 2010 115,00 (FOD Economie, 2011a). De consumptieprijsindex steeg dus met 6,09%. Indien de bovenvermelde onderhoudskosten aangepast worden naar het prijspeil van 2010, worden de onderhouds- en uitbatingskosten van de

WKK geraamd op € 12.366 en voor de rookgasreiniger op €4.533. De totale onderhouds- en uitbatingskosten bedragen in dit geval €16.898 op jaarbasis.

Tabel 19: Onderhouds- en uitbatingskosten zwembad

Onderhouds- en uitbatingskosten WKK	€ 12.366
Ureum rookgasreiniger	€ 4.533
Totaal	€ 16.898

8.4.2.2 Aankoopkosten pyrolyse-olie

Een tweede grote exploitatiekost is de aankoop van de pyrolyse-olie die nodig is om de installatie te doen draaien. Uitgaande van een jaarlijkse warmteproductie van 362.208 kWh_{th} en een elektriciteitsproductie van 254.016 kWh_e kunnen we de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie berekenen.

In eerste instantie moeten we hiervoor de thermische en elektrische efficiëntie kennen. De thermische efficiëntie van de WKK-installatie bedraagt 47% en dat de elektrische efficiëntie 33% (zie tabel kenmerken warmtekrachtinstallatie zwembad).

Verder moeten we ook de onderste verbrandingswaarde (LHV) van de pyrolyse-olie kennen. We gaan er vanuit dat 47% van de onderste verbrandingswaarde van de olie wordt omgezet in warmte en 33% van de onderste verbrandingswaarde van de olie wordt omgezet in elektriciteit. We gaan niet uit van de bovenste verbrandingswaarde (HHV), aangezien dit tot een overschatting zou leiden van de geproduceerde warmte en elektriciteit. Bij gebruik van de bovenste verbrandingswaarde wordt immers verondersteld dat de latente energie (warmte) van de waterdamp in de rookgassen gerecupereerd kan worden. In de praktijk wordt deze latente energie echter niet gebruikt en dienen de berekeningen uitgevoerd te worden met de onderste verbrandingswaarde. In de literatuur (Lu, Li, & Zhu, 2009) vinden we een onderste verbrandingswaarde van pyrolyse-olie terug van 14-18 MJ/kg. Uitgaande van een dichtheid van 1,2 kg/l (T. Bridgwater, 2007) krijgen we zo een onderste verbrandingswaarde van 16,8 - 21,6 MJ/l. Ringer (2006) neemt als onderste verbrandingswaarde 18 MJ/l en deze waarde wordt ook in deze studie gehanteerd voor de berekening van de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie. 18 MJ/l komt overeen met 5 kWh/l, aangezien 1 kWh overeenstemt met 3,6 MJ.

$$362.208 \text{ kWh}_{th} = V_{olie} * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} * 0,47$$

$$254.016 \text{ kWh}_e = V_{olie} * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} * 0,33$$

Uit beide berekeningen komt naar voren dat een volume pyrolyse-olie van zo'n 154.131 liter benodigd is voor de benodigde warmte- en elektriciteitsproductie, gegeven de thermische en elektrische rendementen en gegeven de LHV van de pyrolyse-olie.

Ringer (2006) schat dat de verkoopprijs van ruwe pyrolyse-olie circa \$7,62 per GJ bedraagt. Dit komt overeen met €5,28 per GJ (wisselkoers december 2010) of €0,019 per kWh. Coenen en Schlatmann (2007) gaan ervan uit dat pyrolyse-olie zo'n €6 per GJ kost. Volgens Van Stijn (persoonlijke communicatie, 19 november 2010) bedraagt de verkoopprijs van pyrolyse-olie €9 per GJ of €0,0324 per kWh. Deze hoogste prijs wordt gehanteerd in deze masterproef. Uitgaande van een LHV van 18 MJ/l (of 5 kWh/l) betekent dit een prijs van €0,162 per liter. Bij een jaarlijks verbruik van 154.131 liter bekomt men zo een kostprijs van €24.969. Dit kan ook geverifieerd worden met volgende berekeningen:

$$\text{kosten olie (€)} = \frac{362.208 \text{ kWh}}{0,47} * 0,0324 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 24.969 \text{ €}$$

$$\text{kosten olie (€)} = \frac{254.016 \text{ kWh}}{0,33} * 0,0324 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 24.939 \text{ €}$$

8.4.3 Inkomende kasstromen

8.4.3.1 Besparingen energierekening

Een eerste 'inkomende' kasstroom bestaat uit de besparing op de energierekening doordat minder brandstof nodig is voor de opwekking van warmte. De WKK-installatie zal een gedeelte van de warmte produceren die vroeger door ketels werd geleverd.

De warmtekrachtinstallatie zal op jaarbasis 362.208 kWh_{th} energie produceren. Indien deze hoeveelheid opgewekt zou worden door de verwarmingsketels is hiervoor, uitgaande van een thermisch rendement van 85%, 426.127 kWh aan aardgas nodig. Ook moeten we nog een correctie doorvoeren vanwege de verbrandingswaarde. Aardgas wordt altijd gefactureerd op de bovenste verbrandingswaarde. Gebruik van de bovenste verbrandingswaarde is enkel van toepassing indien de latente warmte van de waterdamp uit de rookgassen ook wordt gerecupereerd en de rookgassen dus gecondenseerd worden. In de praktijk wordt deze warmte echter niet benut. De onderste verbrandingswaarde bedraagt gemiddeld 90% van de bovenste verbrandingswaarde (Energik, 2004). Aangezien aardgas wordt gefactureerd op de bovenste verbrandingswaarde, moeten we nog eens delen door 0.90. Er is in totaal 473.475 kWh aan aardgas (bovenste verbrandingswaarde) nodig.

De vermeden aangekochte aardgas wordt gewaardeerd aan de hand van de prijzen die het zwembad betaalde in 2010. De aardgasprijs per kWh bestaat altijd uit 3 componenten: de energieprijis, de nettarieven en de toeslagen. De energieprijis wordt door de leverancier bepaald en is in dit geval 0,030833 €/kWh. Het nettarief is de prijs die wordt aangerekend voor het gebruik van het distributienet van Inter-energa (de Lommelse netbeheerder voor aardgas) en bedraagt 0,0016064 €/kWh. De toeslagen worden tenslotte door de overheid bepaald en bedragen in dit geval 0,0009889 €/kWh. De totale aardgasprijs bestaat uit de som van bovenstaande 3 componenten en bedraagt 0,0334283 €/kWh. Deze prijzen zijn exclusief BTW, aangezien het autonoom gemeentebedrijf BTW-plichting is en deze BTW dus kan teruggevorderd kan worden.

Er wordt geen rekening gehouden met de vaste vergoeding en de vaste termen, aangezien deze zowel onder het huidige als bij het nieuwe energiesysteem aanwezig zijn, een gedeelte van de warmtevraag moet bij het nieuwe energiesysteem immers nog steeds met ketels opgewekt worden. De vaste vergoeding en vaste termen zijn dus niet differentieel en worden niet in de analyse opgenomen.

De besparing die gerealiseerd wordt doordat minder aardgas aangekocht moet worden met het nieuwe energiesysteem, bedraagt €15.827 ($473.475 \text{ kWh} * 0,0334283 \text{ €/kWh}$).

Een tweede 'inkomende' kasstroom bestaat uit de besparing op de energierekening doordat elektriciteit nu lokaal wordt opgewekt. De warmtekrachtinstallatie levert op jaarbasis 254.016 kWh_e elektrische energie. Deze elektriciteit moet niet meer uit het net aangekocht worden. De vermeden aangekochte elektriciteit wordt gewaardeerd aan de hand van de huidige elektriciteitsprijzen. Evenals de aardgasprijs, bestaat de elektriciteitsprijs uit 3 grote componenten: de energieprijis, het nettarief en de toeslagen. Voor het AGB Sport en Recreatie bedraagt de energieprijis 0,07408 €/kWh voor normale uren en 0,03676 €/kWh voor stille uren. De netwerkkosten bedragen 0,02404 €/kWh en de toeslagen 0,00157 €/kWh. Deze prijzen zijn exclusief BTW, aangezien het AGB de BTW kan terugvorderen. Uitgaande van de assumptie dat de WKK voornamelijk overdag zal draaien om aan de grootste warmtevraag te voldoen en om de aankoop van elektriciteit aan hoge prijzen te vermijden, wordt de vermeden elektriciteitskost gewaardeerd aan de prijs van de normale uren. De totaalprijs (energieprijs + nettarief + toeslagen) bedraagt dan 0,11241.

De besparing die gerealiseerd wordt doordat minder elektriciteit aangekocht moet worden van het net bedraagt €28.554 ($254.016 \text{ kWh} * 0,11241 \text{ €/kWh}$)

Tabel 20: Besparingen energierekening zwembad

Vermeden aankoop aardgas (ketel)	€ 22.298
Vermeden aankoop elektriciteit	€ 28.554

In deze rubriek "besparingen op de energierekening" is het belangrijk enkele veronderstellingen toe te lichten. In eerste instantie veronderstellen we dat de energievraag de volgende 10 jaren gelijk is aan de huidige energievraag en dat het zwembad dus hetzelfde warmte- en elektriciteitsverbruik zal kennen. Een tweede veronderstelling betreft de energieprijzen. In het basisscenario gaan we ervan uit dat de energieprijzen de volgende 10 jaar hetzelfde blijven. Het is niet makkelijk te voorspellen hoe deze prijzen zullen evolueren, hoewel we op lange termijn wel een stijging van de energieprijzen verwachten. In deze studie wordt de prijs voor aardgas en elektriciteit echter voor 10 jaar hetzelfde gehouden, waardoor ook de jaarlijkse besparingen op de energierekening voor 10 jaar hetzelfde blijven. Dit standpunt lijkt de voorzichtigste aanpak, aangezien het toekennen van een willekeurig groeicijfer van de energieprijzen en dus ook van de gerealiseerde besparingen ervoor zou zorgen dat in een later stadium de berekende NCW hoger wordt.

8.4.3.2 Verkopen elektriciteit

De opgewekte elektriciteit door de warmtekrachtkoppeling bedraagt 254.016 kWh_e, terwijl de totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit 323.152 kWh_e bedraagt. Er wordt dus minder elektriciteit opgewekt door de warmtekrachtkoppeling dan de totale jaarlijkse elektriciteitsvraag, dit wil zeggen dat er geen overschot aan elektriciteit op het net moet worden gezet. Er is dus ook geen sprake van opbrengsten uit verkopen van elektriciteit.

Doorgaans vormen de opbrengsten uit verkoop van overtollige elektriciteit bij een WKK project ook geen grote opbrengstenpost. De prijs die men ontvangt voor elektriciteit die aan het net geleverd wordt, ligt altijd veel lager dan de prijs die men als gebruiker zelf betaalt. De prijs die men als eindverbruiker betaalt bestaat namelijk uit verschillende componenten, zoals de productiekosten, de nettarieven, de heffingen, een winstmarge van de leverancier etc. Indien men elektriciteit aan het net levert, zal de leverancier meestal enkel bereid zijn de productiekost te betalen. Cogen Vlaanderen (2010) raadt zelfs aan om bij ongunstige verkoopprijzen de WKK zodanig te dimensioneren dat er geen teruglevering aan het net optreedt.

8.4.3.3 Inkomsten uit verkoop van warmtekrachtcertificaten

Voor we kunnen overgaan tot het bepalen van de inkomsten uit de warmtekrachtcertificaten, moet eerst onderzocht worden of men effectief recht heeft op deze certificaten en of de installatie dus kwalitatief is. Aangezien we te maken hebben met een installatie kleiner dan 1 MW_e, is het voldoende als de relatieve primaire energiebesparing groter is dan 0% (Vlaamse Regering, 2006a)

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \right) \geq 0 \%$$

Hierbij dienen de Europese referentierendementen gebruikt te worden. Het thermisch referentierendement kan in tabel 1 van bijlage 2 teruggevonden worden en bedraagt 89% indien de WKK draait op pyrolyse-olie. Het elektrisch referentierendement kan in tabel 2 van bijlage 2 teruggevonden worden en bedraagt 44,2% voor installaties op biobrandstoffen die geconstrueerd werden in 2006-2011. Er dient nog wel een correctie uitgevoerd te worden voor de klimaatomstandigheden. De gemiddelde jaartemperatuur bedraagt in België 11°C (Cogen Vlaanderen, 2006). Aangezien het referentierendement verhoogd moet worden met 0,1% per graad waarmee de gemiddelde jaartemperatuur beneden de 15°C blijft, bedraagt het referentierendement 44,6%. Bovendien moet ook nog een correctie doorgevoerd worden voor de aansluitspanning. De correctiefactoren hiervoor zijn terug te vinden in tabel 3 van bijlage 2. De warmtekrachtinstallatie zal aangesloten worden op het distributienet. Indien de elektriciteit getransporteerd wordt over het middenspanningsnet, bedraagt het referentierendement $0,446 * 0,945 = 0,42147$. Indien het transport van elektriciteit over het laagspanningsnet gebeurt, bedraagt het referentierendement $0,446 * 0,925 = 0,41255$. In dit onderzoek wordt 0.42147 als elektrisch referentierendement gehanteerd. In onderstaande tabel worden de referentierendementen en de rendementen van de WKK-installatie weergegeven die gebruikt worden om de relatieve primaire energiebesparing (RPEB) te berekenen.

Tabel 21: Rendementen voor berekening RPEB zwembad

Thermisch rendement WKK α_Q	47 %
Elektrisch rendement WKK α_E	33 %
Thermisch rendement referentie η_Q	89 %
Elektrisch rendement referentie η_E	42,1 %

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{0,47}{0,89} + \frac{0,33}{0,421}} \right) = 23,7 \% \geq 0 \%$$

De relatieve primaire energiebesparing ligt duidelijk hoger dan 0%, waardoor de WKK-installatie recht heeft op warmtekrachtcertificaten.

Om het aantal warmtekrachtcertificaten te bepalen waarop de installatie recht heeft, dienen we de absolute primaire energiebesparing te berekenen. Per gerealiseerde MWh absolute energiebesparing wordt 1 certificaat toegekend. We moeten dus de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (E) vermenigvuldigen met de warmtekrachtbesparingsfactor.

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E * \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right)$$

In deze formule gebruiken we voor de referentierendementen niet dezelfde cijfers als hierboven, maar worden de Vlaamse referentierendementen (Vlaamse Regering, 2006a) gehanteerd. In tabel 1 van bijlage 1 zien we dat het thermisch referentierendement 90% bedraagt. Het elektrisch referentierendement kan afgelezen worden in tabel 3 van bijlage 1 en bedraagt 42,7%, aangezien de WKK installatie gebruik maakt van een vloeibare biobrandstof. De hoeveelheid geproduceerde elektrische energie (E) bedraagt 254.016 kWh_e op jaarbasis.

Tabel 22: Gegevens berekening absolute PEB zwembad

Thermisch rendement WKK α_Q	47 %
Elektrisch rendement WKK α_E	33 %
Thermisch rendement referentie η_Q	90 %
Elektrisch rendement referentie η_E	42,7 %
Geproduceerde elektrische energie E	254.016 kWh _e

$$PEB = 254.016 \text{ kWh} * \left(\frac{1}{0,427} + \frac{0,47}{0,33 * 0,90} - \frac{1}{0,47} \right) = 456.404 \text{ kWh}$$

De absolute primaire energiebesparing bedraagt 456.404 kWh of 456,40 MWh en aangezien er per gerealiseerde MWh absolute energiebesparing 1 warmtekrachtcertificaat wordt toegekend, heeft men recht op 456,40 certificaten per jaar. Om de opbrengsten uit de verkopen van de certificaten te bepalen, hebben we twee mogelijkheden. We kunnen rekenen met de marktprijs of met de minimumprijs. De VREG adviseert bij het opmaken van financiële haalbaarheidsstudies te werken met de minimumsteun en niet met de marktprijs, omdat enkel de minimumsteun gegarandeerd is (VREG, 2011d). In deze studie wordt dan ook gerekend met de minimumprijs van €27 per certificaat. Gedurende de eerste 4 jaren brengen de certificaten jaarlijks €12.322 op.

Vanaf maand 49 (jaar 5) wordt nog slechts een fractie X van de certificaten aanvaard.

$$X = \frac{RPEB - 0,2 * (T - 48)}{RPEB}$$

Waarbij T de tijd in maanden bedraagt en RPEB de relatieve primaire energiebesparing voorstelt, berekend met referentiewaarden van de Vlaamse regering (2006a) en dus niet met de Europese referentiewaarden zoals hierboven. De relatieve primaire energiebesparing op basis van de Vlaamse referentiewaarden bedraagt 22,78%.

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{0,47}{0,90} + \frac{0,33}{0,427}} \right) = 22,78 \%$$

In bijlage 5 wordt op maandbasis het percentage aanvaarde certificaten, het aantal aanvaarde certificaten en de inkomsten uit de verkoop van de warmtekrachtcertificaten weergegeven. In onderstaande tabel worden deze gegevens gesommeerd per jaar.

Tabel 23: Bepaling jaarlijks aantal warmtekrachtcertificaten en hun opbrengsten (zwembad)

Jaar	Aantal certificaten	Inkomsten (€)
Jaar 1	456,40	12.323 €
Jaar 2	456,40	12.323 €
Jaar 3	456,40	12.323 €
Jaar 4	456,40	12.323 €
Jaar 5	430,36	11.620 €
Jaar 6	382,28	10.322 €
Jaar 7	334,21	9.024 €
Jaar 8	286,13	7.725 €
Jaar 9	238,05	6.427 €
Jaar 10	189,97	5.129 €

8.4.3.4 *Inkomsten uit verkoop van groenestroomcertificaten*

Aangezien de warmtekrachtinstallatie draait op pyrolyse-olie, kan de eigenaar naast warmtekrachtcertificaten ook aanspraak maken op groenestroomcertificaten. De groenestroomcertificaten worden maandelijks toegekend per schijf van 1.000 kWh opgewekte elektriciteit. De certificaten worden dus verkregen voor alle geproduceerde elektriciteit, ongeacht of deze plaatselijk verbruikt wordt of aan het net wordt geleverd (Vlaamse regering, 2010b).

Om het aantal groenestroomcertificaten te berekenen waarop de eigenaar recht heeft, wordt enkel gekeken naar de nettoproductie van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen. Het begrip "netto" houdt in dat een bepaalde hoeveelheid energie moet worden afgetrokken van de gemeten elektriciteitsproductie. Het betreft de energie die verbruikt wordt door de hulpvoorziening van productie-installatie, de energie die verbruikt werd bij het eventuele transport uit het buitenland van de hernieuwbare energiebron en de energie die verbruikt werd voor de voorbehandeling die nodig was om de hernieuwbare energiebron geschikt te maken voor elektriciteitsproductie. (Vreg, 2007). Vooral de voorbehandeling is in het kader van dit onderzoek een grote energiepost. Hierbij denken we onder andere aan de landbouwactiviteiten van het kortoomloophout (zaaien, bewerken van het land, oogsten, verhakselen...) en aan de pyrolyse van het kortoomloophout. Indien de eigenaar van een WKK-installatie op pyrolyse-olie aanspraak wil maken op

groenestroomcertificaten, is het zijn taak om aan de VREG alle informatie te bezorgen die nodig is om het equivalent elektriciteitsverbruik van de voorbehandeling te kunnen bepalen.

In dit onderzoek wordt verondersteld dat de "netto" elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen 75% bedraagt van de totale elektriciteitsproductie en dat dus 25% moet worden afgetrokken als voorbehandelingsenergie (Tom Kuppens, persoonlijke communicatie 20 mei 2011). In dit geval komt dus ook 75% van de elektriciteit die opgewekt werd met de WKK in aanmerking voor groenestroomcertificaten.

De warmtekrachtinstallatie produceert 254.016 kWh_e of 254 MWh_e elektrische energie op jaarbasis. Indien hiervan 75% in aanmerking komt voor groenestroomcertificaten, betekent dit 190.512 kWh_e of 191 MWh_e. Net als bij de berekening van de opbrengsten uit de warmtekrachtcertificaten, wordt ook bij de berekening van de opbrengsten uit groenestroomcertificaten gerekend met de minimumprijs in plaats van de marktprijs, aangezien enkel de minimumprijs gegarandeerd is. Uitgaande van de minimumsteun voor groenestroomcertificaten van €90 per certificaat, betekent dit zo'n €17.146 aan certificaten op jaarbasis. De groenestroomcertificaten hebben geen degressief karakter, men heeft alle jaren recht op evenveel certificaten.

8.4.3.5 Verhoogde investeringsaftrek

Een onderneming die een energiebesparende investering doet, kan onder bepaalde voorwaarden profiteren van een investeringsaftrek. Dit houdt in dat de belastbare winst van de onderneming verminderd kan worden met een gedeelte van het bedrag van de investering uitgevoerd in de belastbare periode. Om in aanmerking te komen voor een investeringsaftrek moet de WKK-installatie voldoen aan enkele voorwaarden. In eerste instantie moet het gaan om een niet eerder in gebruik genomen installatie. Vervolgens worden enkele voorwaarden gesteld betreffende het elektrisch en thermisch rendement van de installatie.

$$N_k + \frac{2}{3} N_w \geq 50\% \text{ en } \frac{N_k}{N_k + N_w} \geq 25\% \text{ en } \frac{N_w}{N_k + N_w} \geq 25\%$$

Het gemiddelde rendement van kracht (N_k) en van warmte (N_w) moet worden bepaald op basis van de onderste verbrandingswaarde van de ingezette brandstof. De aangekochte hoeveelheid brandstof nodig voor de WKK bedraagt 154.131 l en de onderste verbrandingswaarde van pyrolyse-olie bedraagt 18 MJ/l (=5 kWh/l) (Ringer, 2006). De jaarlijks toegevoegde energie op jaarbasis berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof bedraagt dus 154.131 l * 5 kWh/l = 770.655 kWh. Het elektrisch rendement bedraagt dan 254.016 kWh / 770.655 kWh = 32,96% en het thermisch rendement 362.208 kWh / 770.665 kWh = 47%. Wanneer deze waarden gesubstitueerd worden in bovenstaande formules, blijkt dat de installatie op pyrolyse-olie in aanmerking komt voor een verhoogde investeringsaftrek.

$$N_k + \frac{2}{3}N = 64,29\% > 50\% \text{ en } \frac{N_k}{N_k + N_w} = 41,22\% > 25\% \text{ en } \frac{N_w}{N_k + N_w} = 58,78\% > 25\%$$

In deze gevalstudie komen de WKK-installatie en de rookgasreiniger in aanmerking voor deze steunmaatregel, de investeringskost waarop de investeringsaftrek berekend kan worden bedraagt dan €75.423. In het jaar van aanschaf kan daarom de belastbare winst in mindering worden gebracht met een bedrag gelijk aan €10.182 (13,5% van €75.423). De vennootschapsbelasting bedraagt 33,99%, waardoor een absoluut voordeel van €3.461 bekomen wordt.

8.4.4 Berekening Netto Contante Waarde (NCW)

In deze fase van het onderzoek wordt de NCW van het investeringsproject in een WKK-installatie op pyrolyse-olie voor het stedelijk zwembad van Lommel onderzocht. De formule voor de berekening van de NCW kan als volgt worden weergegeven (Mercken, 2004):

$$NCW_t = \sum_{t=1}^n [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * \widehat{A}_t] * A_{t-i} - I_0 + b * c * I'_0$$

De verschillende parameters zullen stap voor stap ingevuld en besproken worden. In eerste instantie gaan we ervan uit dat de warmtekrachtinstallatie die draait op pyrolyse-olie een levensduur van 10 jaren zal hebben. In de literatuur vinden we terug dat interne verbrandingsmotoren een levensduur van 15 jaar hebben, maar aangezien de pyrolyse-olie versnelde slijtage kan veroorzaken, gaan we uit van een levensduur van 10 jaar.

8.4.4.1 Jaarlijkse cashflows (O_t - Q_t)

Gegeven dat we een projectduur van 10 jaar vooropstellen, worden vervolgens de jaarlijkse netto cashflows die zich gedurende deze 10 jaar voordoen opgelijst. De relevante kasstromen werden reeds besproken in bovenstaande paragrafen en worden samengevat in onderstaande overzichtstabellen.

Tabel 24: Overzicht uitgaande cashflows zwembad

Jaar	Onderhouds- en werkingskosten (€)	Aankoop pyrolyse-olie (€)	Uitgaande cashflows totaal (€)
1	16.898	24.969	41.867
2	16.898	24.969	41.867
3	16.898	24.969	41.867
4	16.898	24.969	41.867
5	16.898	24.969	41.867
6	16.898	24.969	41.867
7	16.898	24.969	41.867
8	16.898	24.969	41.867
9	16.898	24.969	41.867
10	16.898	24.969	41.867

Tabel 25: Overzicht inkomende cashflows zwembad

Jaar	Vermeden aankoop aardgas (ketel) (€)	Vermeden aankoop elektriciteit (€)	Inkomsten WK certificaten (€)	Inkomsten GS certificaten (€)	Inkomende cashflows totaal (€)
1	15.827	28.554	12.323	17.146	79.566
2	15.827	28.554	12.323	17.146	79.566
3	15.827	28.554	12.323	17.146	79.566
4	15.827	28.554	12.323	17.146	79.566
5	15.827	28.554	11.620	17.146	78.863
6	15.827	28.554	10.322	17.146	77.564
7	15.827	28.554	9.024	17.146	76.266
8	15.827	28.554	7.725	17.146	74.968
9	15.827	28.554	6.427	17.146	73.670
10	15.827	28.554	5.129	17.146	72.372

Tabel 26: Overzicht netto cashflows zwembad

Jaar	Netto cashflow (€)
1	31.983
2	31.983
3	31.983
4	31.983
5	31.280
6	29.982
7	28.684
8	27.386
9	26.087
10	24.789

8.4.4.2 Jaarlijkse afschrijvingen (\bar{A}_t)

Indien we ervan uitgaan dat het autonoom gemeentebedrijf Sport en Recreatie onderworpen is aan de vennootschapsbelasting en dat het bedrijf winst maakt, kan het beroep doen op het gunstige effect van het belastingschild van de afschrijvingen. Er wordt een gunstig belastingschild gecreëerd doordat de afschrijvingen op de WKK geboekt worden als kosten, wat leidt tot minder winst. Door deze verlaging van de winst, zal het gemeentebedrijf ook minder belastingen moeten betalen. Het gecreëerde jaarlijkse voordeel is gelijk aan het jaarlijkse afschrijvingsbedrag vermenigvuldigd met de vennootschapsbelasting.

Om de jaarlijkse afschrijvingsbedragen te kunnen bepalen, moeten we eerst de afschrijvingstermijn en afschrijvingsmethode bepalen van het warmtekrachtsysteem. Een zo kort mogelijke afschrijvingstermijn is het meest gunstig, aangezien het belastingschild van de afschrijvingen dan groter wordt, waardoor de netto contante waarde van het project toeneemt. Wij gaan uit van een afschrijvingstermijn van 10 jaar voor de WKK-installatie en de rookgasreiniger, aangezien dit de geschatte levensduur van de apparatuur is en de fiscus dit als gangbare termijn aanvaardt.

Wat betreft de afschrijvingsmethode, gaan we ervan uit dat de fiscus het gebruik van de double declining balance (DDB) methode toelaat. Bij deze degressieve afschrijvingsmethode schrijft men gedurende de eerste jaren het meeste af en geleidelijk minder, wat fiscaal interessant is omdat het belastingvoordeel van de afschrijvingen dan sneller gerealiseerd wordt (Mercken, 2004). Bij deze methode past men het dubbele van het lineaire afschrijvingspercentage toe op de boekwaarde. Doordat de boekwaarde door deze afschrijvingen steeds kleiner wordt, ontstaat inderdaad een degressieve afschrijving. Van zodra het af te schrijven bedrag kleiner is dan het lineaire

afschrijvingsbedrag, wordt ofwel overgeschakeld op het lineaire afschrijvingsbedrag ofwel naar de lineaire afschrijvingswaarde van de resterende boekwaarde over het aantal resterende jaren (Merkcen, 2004). Wij kiezen voor deze tweede optie.

Tabel 27: Jaarlijkse afschrijvingen onder DDB zwembad

Jaar	Boekwaarde (€)	Afschrijving (€)
1	75.423	15.085
2	60.338	13.408
3	46.930	11.732
4	35.197	10.056
5	25.141	8.380
6	16.761	3.352
7	13.408	3.352
8	10.056	3.352
9	6.704	3.352
10	3.352	3.352

8.4.4.3 Verdiscontering (A_{t-i})

Om de verwachte toekomstige kasstromen te kunnen vergelijken en optellen, is het nodig om deze cashflows op een gemeenschappelijke tijdsbasis te brengen. De verwachte toekomstige kasstromen worden daarom geactualiseerd tegen de kapitaalkost (ook vereist rendement of discontovoet genoemd) om ze effectief te kunnen vergelijken met kasstromen van nu en om ze te kunnen optellen. De relevante interestvoet voor een bedrijf is de marginale opbrengstvoet van investeringen of anders gezegd, de return die gerealiseerd wordt op bijkomende investeringen. We gebruiken een discontovoet van 9%, aangezien dit volgens Ochelen en Putzeijs (2008) de standaardwaarde is die als private discontovoet voor bedrijven gehanteerd wordt. In deze 9% zit de marktintrestvoet vervat plus een risicopremie.

Zoals hierboven al werd weergegeven is de formule van de NCW:

$$NCW_i = \sum_{t=1}^n [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * \widehat{A}_t] * A_{t-i} - I_0 + b * c * I'_0$$

In onderstaande tabel zullen we nu het eerste gedeelte van deze formule berekenen, het gedeelte dat verdisconteerd moet worden. In de eerste kolom staat de netto cashflow weergegeven ($O_t - Q_t$). In de tweede kolom wordt de netto cashflow na belastingen weergegeven $(1-b) * (O_t - Q_t)$. In de derde kolom kan vervolgens het belastingschild van de afschrijvingen teruggevonden worden

$b * \widehat{A}_t$. In de volgende kolom staat de discontofactor A_{t-i} weergegeven op jaarbasis. In de laatste kolom tenslotte, worden alle verdisconteerde cashflows die het project genereert weergegeven.

Tabel 28: Berekening verdisconteerde netto cashflows na belastingen zwembad

Jaar	Netto cashflow voor belastingen (Ot-Qt)	Netto cashflow na belastingen (1-b) * (Ot-Qt)	Belastingschild afschrijvingen b * At	Disconto factor A(t-i)	Verdisconteerde netto cashflow na belastingen
1	31.983	21.112	5.127	0,92	24.073
2	31.983	21.112	4.558	0,84	21.606
3	31.983	21.112	3.988	0,77	19.382
4	31.983	21.112	3.418	0,71	17.378
5	31.280	20.648	2.848	0,65	15.271
6	29.982	19.791	1.139	0,60	12.480
7	28.684	18.934	1.139	0,55	10.981
8	27.386	18.077	1.139	0,50	9.644
9	26.087	17.220	1.139	0,46	8.453
10	24.789	16.363	1.139	0,42	7.393
Totaal					146.660

8.4.4.4 Investeringsbedrag (I_0) en investeringsaftrek ($b * c * I'_0$)

In het laatste deel van de formule voor de NCW berekening wordt het investeringsbedrag in rekening gebracht. Het totale investeringsbedrag (I_0) bedraagt €90.507. Het bedrag van de verhoogde investeringsaftrek bedraagt €3.461 en mag hiervan worden afgetrokken. De netto investeringskost van het nieuwe energiesysteem bedraagt dus €87.046.

8.4.4.5 Netto Contante Waarde (NCW)

Om ten slotte de NCW van het investeringsproject te bepalen, wordt de som van de verdisconteerde kasstromen (€176.660) verminderd met de netto investeringskost (€87.046). We bekomen dan een netto contante waarde van €59.614. Deze NCW is positief, het zwembad van Lommel kan uitgaande van deze gegevens dus op een economisch verantwoorde manier investeren in een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie. In onderstaande tabel worden de jaarlijkse verdisconteerde kasstromen van heel het investeringsproject samengevat.

Tabel 29: Samenvatting verdisconteerde netto cashflows en NCW zwembad

Jaar	Verdisconteerde netto cashflows (€)
jaar 0	-87.046
jaar 1	24.073
jaar 2	21.606
jaar 3	19.382
jaar 4	17.378
jaar 5	15.271
jaar 6	12.480
jaar 7	10.981
jaar 8	9.644
jaar 9	8.453
jaar 10	7.393
NCW	59.614

8.4.5 Internal Rate of Return (IRR)

De interne opbrengstvoet geeft de discontovoet weer die overeenstemt met een NCW gelijk aan nul (Mercken, 2004). Op deze manier wordt dus aangegeven hoe hoog de discontovoet mag oplopen vooraleer het niet langer economisch verantwoord is om het investeringsproject uit te voeren. Men kan de interne opbrengstvoet dan ook interpreteren als de hoogste interestvoet die de investeerder kan betalen zonder geld te verliezen, indien het project volledig gefinancierd zou worden met behulp van een lening en de inkomende cashflows van het project instaan voor de aflossing van de lening (Mercken, 2004).

De IRR van het investeringsproject werd bepaald met de formule IR in Excel en bedraagt 23,59%. Deze interne opbrengstvoet is ruim groter dan de discontovoet van 9% en ook op deze manier kunnen we dus besluiten dat het project economisch verantwoord is.

8.4.6 Verdisconteerde terugverdientijd (DPB)

De verdisconteerde terugverdientijd is de tijd die nodig is om de initiële investeringskost terug te verdienen door de netto cashflows die het project genereert, waarbij rekening gehouden wordt met de tijdswaarde van geld. Er wordt met andere woorden berekend hoeveel tijd er nodig is om de contante waarde van de kasstromen van negatief naar positief te brengen (Mercken, 2004). In onderstaande tabel worden de gecumuleerde verdisconteerde netto cashflows na belastingen weergegeven. We kunnen zien dat na 5 jaar de initiële netto investeringsuitgave van €87.046 reeds volledig is terugverdiend. Interpolatie leert ons dat na 4 jaar en 110 dagen de investering is terugverdiend.

Tabel 30: Bepaling verdisconteerde terugverdientijd zwembad

Jaar	Verdisconteerde netto cashflow na belastingen (€)	Gecumuleerde cashflows (€)
jaar 0	-87.046	-87.046
jaar 1	24.073	-62.974
jaar 2	21.606	-41.368
jaar 3	19.382	-21.987
jaar 4	17.378	-4.609
jaar 5	15.271	10.662
jaar 6	12.480	23.142
jaar 7	10.981	34.123
jaar 8	9.644	43.767
jaar 9	8.453	52.221
jaar 10	7.393	59.614

8.5 FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID

Tot hiertoe hebben we nog geen rekening gehouden met onzekerheid. We hebben de berekeningen uitgevoerd alsof de resultaten en gevolgen van het investeringsproject met zekerheid gekend waren. In werkelijkheid is er echter helemaal geen zekerheid omtrent verschillende kasstromen en zijn de waarden die we hebben toegekend enkel "intelligent guesses" van de onzekere parameterwaarden. Denken we bijvoorbeeld maar aan de investeringskosten, de brandstofprijzen, de elektriciteitsprijzen, de waarde van de groenestroom- en warmtekrachtcertificaten, de levensduur van de machine... In deze vierde fase van het haalbaarheidsonderzoek proberen we rekening te houden met onzekerheid. Dit houdt in dat er moet worden nagedacht over de verschillende resultaten en hun bijhorende waarschijnlijkheden. Rekening houden met onzekerheid kan het best op een systematische manier gebeuren.

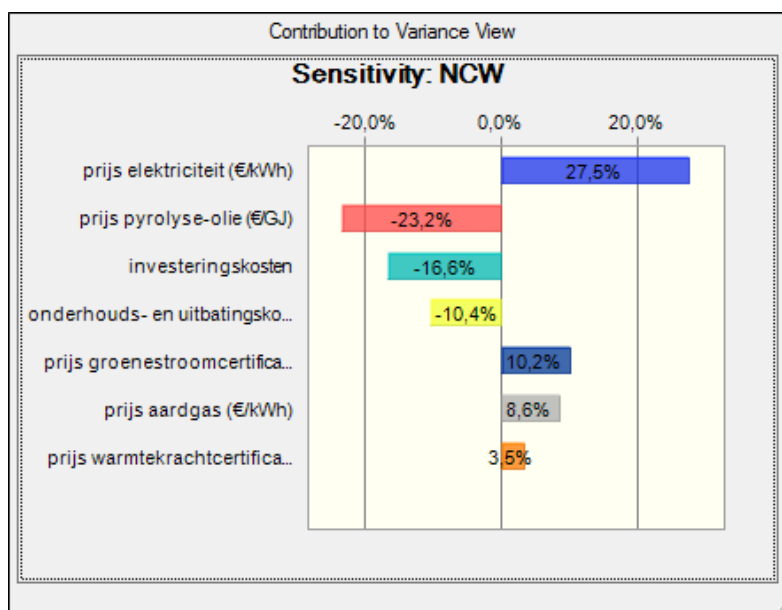
8.5.1 Identificatie onzekere variabelen

We starten met de identificatie van de onzekere variabelen. Enerzijds zijn er heel wat variabelen die per definitie een fluctuerende waarde hebben, denken we bijvoorbeeld maar aan de prijs van de groenestroom- en warmtekrachtcertificaten, die door vraag en aanbod op de certificatenmarkt tot stand komt. Anderzijds zijn er bepaalde variabelen die men tamelijk zeker kan bepalen, maar die een erg grote bijdrage hebben in de totale uitgaven of inkomsten. Een kleine verandering in de parameterwaarde zou in dit geval een grote impact hebben op de netto contante waarde. Op basis van deze criteria (fluctuerend karakter en belang) werden 7 parameters uit het economisch model weerhouden:

- de investeringskost van de warmtekrachtkoppeling;
- de elektriciteitsprijs;
- de aardgasprijs;
- de aankoopprijs van pyrolyse-olie;
- de onderhoudskosten;
- de prijs van de warmtekrachtcertificaten;
- de prijs van de groenestroomcertificaten.

8.5.2 Sensitiviteitsanalyse

Nu we de onzekere parameters geïdentificeerd hebben, starten we met een sensitiviteitsanalyse. De hoofdvraag die we ons hierbij stellen is: wat is het effect op de netto contante waarde door de verandering van één bepaalde parameter? (Mercken, 2004). We kunnen de relatieve sensitiviteit van de NCW voor elke parameter weergeven aan de hand van een Tornado diagram, dat opgesteld kan worden met het software programma Crystal Ball. Om zulk Tornado diagram op te stellen, laten we de onzekere variabelen variëren binnen een bepaald bereik, waarbij de minimum- en maximumwaarde respectievelijk 10% minder en 10% meer bedragen dan de meest waarschijnlijke waarde die in het vorige hoofdstuk werd gehanteerd. Door elke parameter 10% te laten variëren, hebben we geen last van schaalverschillen tussen de parameters. In het Tornado diagram wordt dan weergegeven hoeveel invloed de wijziging van één parameter heeft op de NCW (al het overige gelijkblijvend) en dat kan dan vergeleken worden met het effect op de NCW met een vergelijkbare verandering in een andere parameter.



Figuur 40: Resultaten sensitiviteitsanalyse Tornado diagram (zwembad)

Met behulp van bovenstaand Tornado diagram krijgen we inzicht in de gevoeligheid van de netto contante waarde voor de verschillende parameters. Aangezien de relatieve afwijking voor elke parameter hetzelfde is (10%), geeft de breedte van de balkjes de mate van invloed aan op de gevoeligheid van de netto contante waarde. De variabelen worden gerangschikt op het effect dat ze teweegbrengen. Het diagram heeft haar naam te danken aan het feit dat de balkjes van boven naar beneden steeds kleiner worden, waardoor de grafiek het uitzicht krijgt van een wervelstorm.

De diagramstaven die rechts van de y-as uitwijken, zijn variabelen met een positief effect op de netto contante waarde. De diagramstaven die aan de linkerkant van de y-as uitwijken hebben een negatief effect op de netto contante waarde.

Uit bovenstaand Tornado diagram kunnen we afleiden dat de elektriciteitsprijs de meest invloedrijke parameter is, die 27,5% van de variatie in NCW bepaalt. Het teken is positief. Wanneer de elektriciteitsprijs stijgt, wordt het immers economisch interessanter om te investeren in een warmtekrachtkoppeling, zodat er minder (dure) elektriciteit van het net moet worden aangekocht. Ook de prijs van de pyrolyse-olie heeft een grote invloed op de variatie in de NCW, maar deze invloed is negatief. Hoe hoger de prijs die betaald moet worden voor de pyrolyse-olie om de warmtekrachtkoppeling te doen werken, hoe lager de netto contante waarde van het investeringsproject. Ook de kostprijs van de warmtekrachtinstallatie heeft een belangrijke negatieve bijdrage van 16,6%: hoe hoger de kostprijs, hoe lager de netto contante waarde. Ook de onderhoudskosten hebben een negatieve invloed op het resultaat: hoe hoger de onderhoudskosten, hoe lager de netto contante waarde. De prijzen van de groenestroomcertificaten en van de warmtekrachtcertificaten hebben een positieve invloed op de NCW. Hoe hoger de prijs is die men ontvangt, hoe interessanter het is om in een WKK te investeren. Ook de aardgasprijs heeft een positieve invloed op de variatie in NCW en wel om dezelfde reden als de elektriciteitsprijs. Als de aardgasprijs stijgt, wordt het immers economisch interessanter om te investeren in een WKK, zodat er minder aardgas (aan dure prijzen) moet worden aangekocht.

Het doel van dit Tornado diagram is om de relatieve sensitiviteit van de NCW voor elke parameter in het project weer te geven. Op zulke manier kunnen we onze aandacht toespitsen op de kritische onzekerheden van het project en verliezen we geen tijd met het analyseren van variabelen die maar een relatief kleine impact hebben. In een volgende stap wordt voor de belangrijkste variabelen een Monte Carlo analyse uitgevoerd.

8.5.3 Monte Carlo analyse

Naast de sensitiviteitsanalyse, waarbij de invloed van individuele parameters wordt nagegaan, is het ook van belang om oog te hebben voor simultane veranderingen van de parameterwaarden.

We trachten in deze fase te begrijpen wat het effect is van gelijktijdige verandering van een reeks parameters op de NCW.

Om de onzekerheid in afzonderlijke parameters te vertalen naar de onzekerheid in het projectresultaat, zou men bijvoorbeeld elke parameter haar meest negatieve waarde kunnen toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt en daarna elke parameter haar meest positieve waarde toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt. Deze methode geeft echter een veel te groot en onrealistisch onzekerheidsgebied voor de NCW, aangezien het wel heel onwaarschijnlijk is dat alle parameters gelijktijdig hun meest extreme waarde aannemen. Een algemeen erkende werkwijze om de onzekerheden van de parameters op een realistische manier te vertalen naar de onzekerheid in projectuitkomst, is de zogenaamde Monte Carlo methode.

Een Monte Carlo simulatie kan worden toegepast indien een systeem elementen bevat die beïnvloed worden door het toeval. Voor het investeringsproject in de warmtekrachtkoppeling geldt dat quasi alle parameters probabilistisch zijn van aard. Het uiteindelijk resultaat wordt bepaald door een voorlopig onbekende combinatie van de parameterwaarden (Mercken, 2004).

Bij een Monte Carlo simulatie worden verschillende experimenten uitgevoerd, waarbij telkens een scenario wordt samengesteld op basis van toevallig gekozen waarden voor de verschillende parameters. Voor elk scenario wordt dan de NCW berekend. Door dit experiment veelvuldig uit te voeren, verkrijgt men uiteindelijk een kansverdeling van de NCW.

Een Monte Carlo simulatie bestaat uit 5 grote stappen (Mercken, 2004):

- Identificatie van de sleutelparameters waarvan de waarde onzeker is en die een door het toeval bepaalde waarde zullen aannemen;
- Bepaling van de kansverdeling voor deze parameters;
- Toevallige keuze van een parameterwaarde voor elke parameter aan de hand van een toevalsgetallengenerator;
- Berekening van de NCW van het toevallig samengestelde scenario;
- Verzameling van experimentele gegevens en verwerking ervan tot kansverdeling van de NCW.

8.5.3.1 *Identificatie sleutelvariabelen*

Wat betreft de identificatie van de sleutelparameters, wordt ervoor gekozen om alle parameters die werden gebruikt in de sensitiviteitsanalyse ook in de monte Carlo simulatie te weerhouden. Het betreft dus:

- de investeringskost van de warmtekrachtkoppeling;

- de elektriciteitsprijs;
- de aardgasprijs;
- de aankoopprijs van pyrolyse-olie;
- de onderhoudskosten;
- de prijs van de warmtekrachtcertificaten;
- de prijs van de groenestroomcertificaten.

8.5.3.2 Bepaling kansverdeling parameters

De kansverdeling voor bovenstaande parameters zijn niet exact gekend. Een eenvoudige, pragmatische oplossing is dan om te werken met drie ramingen (meest waarschijnlijke waarde, minimumwaarde en maximumwaarde) en hier een driehoeksverdeling op toe te passen. De meest waarschijnlijke waarde heeft hierbij een hogere kans om voor te komen dan de meest extreme waarden. In dit onderzoek wordt voor elke onzekere parameter gewerkt met een driehoeksverdeling.

In de hierboven besproken sensitiviteitsanalyse werden alle factoren verondersteld te veranderen binnen -10% en +10% van de meest verwachte waarde, om op die manier de bijdragen aan de sensitiviteit van de NCW van alle variabelen te kunnen evalueren op gemeenschappelijke basis. In de Monte Carlo analyse nemen we als minimumwaarde en maximumwaarde niet gewoon 10% meer en 10% minder dan de meest verwachte waarde, aangezien we verwachten dat deze parameters anders variëren. In onderstaande tabel wordt voor elk van de onzekere parameters de meest verwachte waarde, de minimumwaarde en de maximumwaarde aangegeven.

Tabel 31: Onzekere parameters en hun verdeling

Parameter	Minimumwaarde	Meest verwachte waarde	Maximumwaarde
Investeringskost (€)	63.355	90.507	117.659
Electriciteitsprijs (€/kWh)	0,101169	0,11241	0,123651
Aardgasprijs (€/kWh)	0,030085	0,033428	0,036771
Aankoopprijs pyrolyse-olie (€/GJ)	7,2	9	10,8
Onderhoudskosten	15.208	16.898	18.588
Prijs WKC	27	27	41,48
Prijs GSC	90	90	107,77

In de kolom "Meest verwachte waarde" zijn telkens de waarden terug te vinden die ook in het basisscenario gehanteerd werden (zie ook fase 3 economische analyse). Wat betreft de investeringskosten, hanteren we een marge van 30% voor de minimumwaarde en

maximumwaarde, aangezien Peters, Timmerhaus en West (2004) ervan uitgaan dat de verwachte nauwkeurigheid van de geschatte investeringskosten voor chemische procesinstallaties 20 à 30% bedraagt. De elektriciteitsprijs en aardgasprijs en onderhoudskosten laten we variëren met zo'n 10%. De prijs van de pyrolyse-olie laten we variëren met plus en min 20%, omdat het gebruik van pyrolyse-olie als brandstof nog in zijn kinderschoenen staat en de prijs veel minder zeker is. Wat betreft de prijs van warmtekracht- en groenestroomcertificaten, hanteren we als minimumwaarde en meest verwachte waarde de minimumsteun en als maximumwaarde de hoogste waarde die al betaald is voor de certificaten op de markt. Het lijkt misschien vreemd om als meest verwachte waarde de minimumsteun te hanteren, maar dit wordt door de VREG aanbevolen, aangezien enkel deze minimumsteun gegarandeerd is.

8.5.3.4 Toevallige keuze parameterwaarden

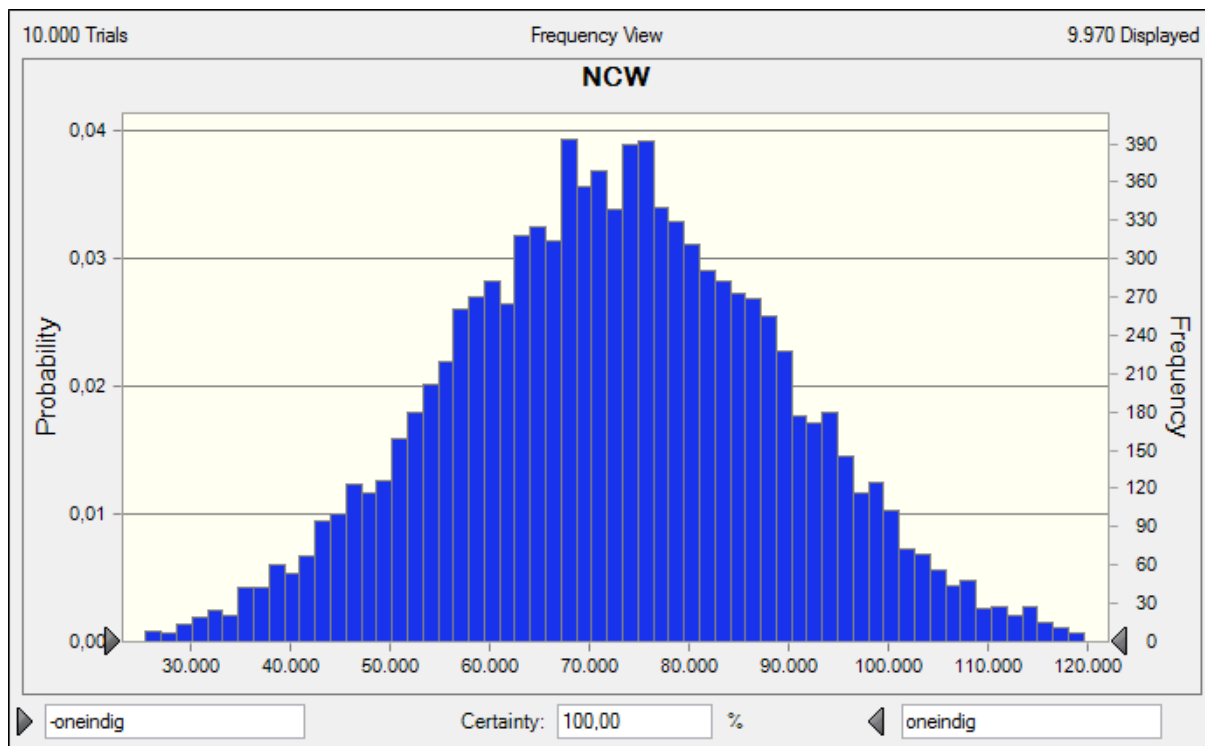
In de Monte Carlo analyse werd ingesteld dat 10.000 trials gedaan moeten worden. Bij elke trial trekt het model een willekeurige waarde uit elke verdeling van de onzekere parameters, waarbij de driehoeksverdeling de kans bepaalt dat een bepaalde waarde getrokken wordt.

8.5.3.5 Berekenen NCW van het toevallig samengesteld scenario

In deze stap wordt de NCW berekend van het toevallig samengesteld scenario (willekeurige parametercombinatie).

8.5.3.6 Opstellen kansverdeling NCW

Nadat 10.000 trials zijn gedaan en dus 10.000 keer de NCW waarde is berekend van een willekeurig samengestelde parametercombinatie, kunnen deze netto contante waarden grafisch voorgesteld worden. In onderstaande figuur wordt de kansverdeling van de NCW die bekomen werd na 10.000 trials weergegeven.



Figuur 41: Kansverdeling NCW

De NCW ligt tussen een minimum van €18.893 en een maximum van €136.398. Het gemiddelde bedraagt €72.504 en de mediaan €72.409. De gevonden waarde uit het basisscenario van €59.615 ligt dus eerder aan de lage kant.

Ongeveer 95% van de waarden ligt binnen 2 standaarddeviaties van het gemiddelde ($\mu - 2\sigma$; $\mu + 2\sigma$). De standaarddeviatie bedraagt in dit geval €16.808. In 95% van de gevallen zal de NCW dus liggen tussen €38.888 en €106.120.

8.5.4 Belang van certificaten voor de NCW

Een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie kan in Vlaanderen genieten van twee soorten uitbatingssubsidies, namelijk van groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten. Deze certificaten vormen extra inkomsten voor de investeerder en hebben een aanzienlijke bijdrage aan de NCW van het investeringsproject. In deze fase van het onderzoek wordt nagegaan hoe de NCW zou veranderen indien de certificaten zouden wegvallen.

In onderstaande tabel worden de 2 uitbatingssubsidies weergegeven. Indien de groenestroomcertificaten wegvallen, wordt de netto contante waarde van het investeringsproject meteen negatief en is de investering dus ook niet meer rendabel. Indien de kleinere subsidie van de warmtekrachtcertificaten wegvalt, maar het systeem van groenestroomcertificaten blijft bestaan, is de investering nog wel rendabel. Hieruit kunnen we afleiden dat de certificaten

belangrijk zijn voor de rendabiliteit van het investeringsproject in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie.

Tabel 32: Belang groenestroom- en warmtekrachtcertificaten (zwembad)

Warmtekrachtcertificaat (€/MWh)	Groenestroomcertificaat (€/MWh)	NCW (€)
27	90	59.614
27	0	-13.022
0	90	15.012
0	0	-57.624

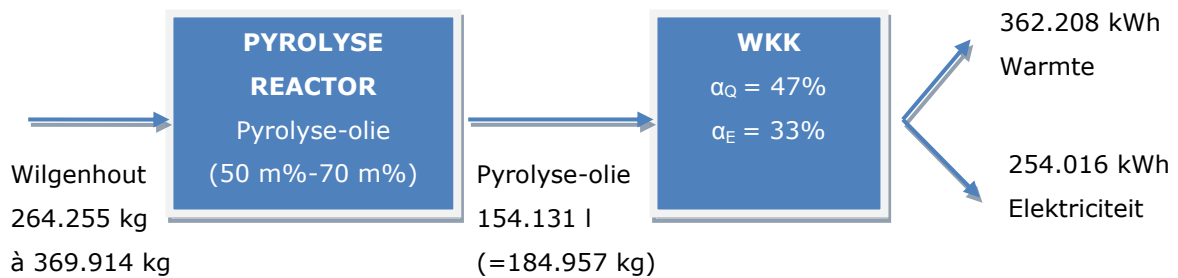
8.5.5 Maximumprijs pyrolyse-olie

De prijs van de pyrolyse-olie werd in de economische analyse vastgelegd op €9 per GJ. Het gebruik van pyrolyse-olie als brandstof staat echter nog in zijn kinderschoenen, waardoor we niet zeker zijn hoeveel de marktprijs precies zal bedragen. In deze paragraaf gaan we daarom na wat de maximumprijs is die de eigenaar van de WKK maximaal kan betalen. Hiervoor beantwoorden we de vraag: hoe hoog mag de maximumprijs van de pyrolyse-olie bedragen opdat de NCW positief blijft? We kunnen het antwoord op deze vraag vinden door de ingebouwde functionaliteit "doelzoeken" te gebruiken in het Excel bestand. Deze functionaliteit laat toe om voor een specifiek berekende cel (in dit geval de berekende NCW van het investeringsproject) uit te rekenen wat de waarde moet zijn van een andere cel (in dit geval de prijs van de pyrolyse-olie) om de specifiek berekende cel (NCW) een gegeven doelwaarde te laten aannemen (in dit geval 0). De maximale prijs die betaald kan worden voor de pyrolyse-olie bedraagt in deze gevalstudie €14.07 per GJ. Dit komt overeen met €0,0507 per kWh, aangezien 1 kWh overeenkomt met 0,0036GJ. Uitgaande van een onderste verbrandingswaarde van 18MJ/l (Ringer, 2006), kan de prijs van pyrolyse-olie ook in euro per liter uitgedrukt worden. De maximumprijs bedraagt dan €0,2533 per liter.

8.6 TERUGKOPPELING NAAR FYTOREMEDIATIEPROJECT

Nadat we voor deze gevalstudie de optimale warmtekrachtinstallatie hebben geïdentificeerd en tot de conclusie zijn gekomen dat een investeringsproject in zulke installatie onder bepaalde voorwaarden haalbaar blijkt, keren we nu even terug naar het begin van het verhaal. In deze laatste paragraaf wordt nagegaan hoeveel hout uit het fytoremediatieproject nodig is opdat het zwembad haar warmtekrachtinstallatie heel het jaar door kan doen draaien op pyrolyse-olie uit het kortoomloophout.

De warmtekrachtinstallatie verbruikt jaarlijks zo'n 154.131 liter pyrolyse-olie. Hoeveel korteomloophout uit het fyto-remediatieproject is hiervoor nodig? In eerste instantie wordt de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie omgezet van liter in kg, uitgaande van een dichtheid van 1,2 kg/l (T. Bridgwater, 2007). De WKK-installatie verbruikt op jaarbasis dan zo'n 184.957 kg pyrolyse-olie (154.131 l * 1,2 kg/l). Nu het gewicht van de pyrolyse-olie gekend is, kan ook bepaald worden hoeveel hout nodig is om dit gewicht aan pyrolyse-olie te bekomen. Volgens Bridgwater (2003) levert snelle pyrolyse van wilgen zo'n 70% pyrolyse-olie op, vertrekkende van droge biomassa. Uit onderzoek (Stals, Carleer, Reggers, Schreurs, & Yperman, 2010) blijkt dat de opbrengst aan pyrolyse-olie van korteomloophout uit de Kempen, gecontamineerd met zware metalen geen 70 m% bedraagt maar eerder 50 m%. In dit onderzoek wordt daarom een opbrengstenrange van 50 m% tot 70 m% gehanteerd. Gegeven deze range zal de benodigde hoeveelheid korteomloophout ook liggen tussen de 264.225 kg (184.957 kg / 0,70) en de 369.914 kg (184.957 kg / 0,50). Om een duidelijker inzicht te krijgen in bovenstaande cijfergegevens, worden ze in onderstaande figuur schematisch weergegeven.



Figuur 42: Overzicht inputgegevens voor pyrolyse en WKK (zwembad)

Nu bepaald is hoeveel ton korteomloophout vereist is, kan ook berekend worden hoeveel hectare grond in het fyto-remediatieproject nodig is om deze hoeveelheid hout te produceren. Garcia (2003) geeft aan dat wilg doorgaans een opbrengst oplevert van 10,8 ton droge stof per hectare per jaar. Uit experimenten op het proefterrein in Lommel blijkt echter dat de biomassaopbrengst voor korteomloophout op zanderige, met zware metalen gecontamineerde bodems slechts 8 ton droge stof per hectare bedraagt (Vangronsveld et al., 2009). Uitgaande van een opbrengst van 8 ton droge stof per hectare, is een oppervlakte van 33 hectare (264.225 kg / 8000 kg/ha) tot 46 hectare (369.914 kg / 8000 kg/ha) grond in het fyto-remediatieproject vereist.

HOOFDSTUK 9: GEVALSTUDIE ZIEKENHUIS

9.1 BESCHRIJVING GEVALSTUDIE

Het Mariaziekenhuis in Overpelt ontstond als een fusie van de Heilig Hart kliniek in Neerpelt en het Maria Middelaars Ziekenhuis te Lommel. In 2005 werd de meer dan tien jaar oude fusie tussen de twee vestigingen ook fysiek een feit en opende het Mariaziekenhuis haar deuren in een nieuwbouw langs de Ringlaan in Overpelt.

Het ziekenhuiscomplex is gebouwd in de vorm van drie geclusterde kruisen, wat ook in het logo terug te vinden is. Het complex heeft ruim 65.5 miljoen euro gekost. Het ziekenhuis telt 345 bedden, wat jaarlijks goed is voor 14.500 klassiek verblijvende patiënten, 16.500 patiënten in daghospitalisatie en 165.00 consultaties. Wat betreft het medisch aanbod, zijn quasi alle specialismen terug te vinden en ook tal van subspecialismen. Er worden zo'n 100 artsen tewerkgesteld en zo'n 900 andere medewerkers (Mariaziekenhuis, 2011).



Figuur 43: Luchtfoto Mariaziekenhuis



Figuur 44: Logo Mariaziekenhuis

Warmtekrachtkoppeling is geen onbekende binnen de sector van verzorgingsinstellingen. Er is al zo'n 10 MW_e gerealiseerd in een 36-tal projecten in Vlaanderen. Het gemiddeld geïnstalleerd vermogen bedraagt ongeveer 340 kW_e en 450 kW_{th}, waarbij de vermogens variëren in een range van 80 kW_e tot 1000 kW_e, al naargelang de grootte van het ziekenhuis. Volgens Stroobandt (2007) is echter nog een potentieel van 250 MW_e aanwezig binnen de tertiaire sector, waarbij een groot gedeelte door verzorgingsinstellingen ingevuld kan worden.

9.2 FASE 1: ANALYSE VAN DE ENERGIEVRAAG

Ook in deze gevalstudie is het uitgangspunt van de haalbaarheidsstudie de analyse van de energievraag. Het verloop van de energievraag kan worden gevonden met behulp van metingen, factuuranalyse, ervaringscijfers of kengetallen. Metingen zijn de meest nauwkeurige manier om de energievraag te bepalen, maar ze vergen veel tijd en brengen aanmerkelijke kosten met zich mee. In deze haalbaarheidsstudie wordt gebruik gemaakt van de gegevens die terug te vinden zijn op facturen.

9.2.1 Warmtevraag

Momenteel maakt het Mariaziekenhuis onder andere gebruik van gasgestookte ketels om hun warmte op te wekken. In 2007 verbruikte het ziekenhuis zo'n 527.954,73 m³ aardgas. De brandstof is nodig voor zowel verwarming als voor sanitair warm water. In onderstaande tabel worden voor de periode 2007 de gefactureerde verbruiksgegevens weergegeven. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de 12 periodes niet exact overeenstemmen met de 12 maanden in een jaar.

Tabel 33: Bepaling warmtebehoefte ziekenhuis

Periode	Gefactureerd gasverbruik (m ³)	Gefactureerd gasverbruik (KWh)	Warmtebehoefte (kWh)
1/01/2007 29/01/2007	67.759,20	757.200,00	579.258,00
30/01/2007 26/02/2007	63.661,90	710.455,00	543.498,08
27/02/2007 26/03/2007	57.743,90	642.951,00	491.857,52
27/03/2007 23/04/2007	35.547,40	398.090,00	304.538,85
24/04/2007 24/05/2007	25.355,70	283.611,00	216.962,42
25/05/2007 25/06/2007	21.317,60	236.671,00	181.053,32
26/06/2007 26/07/2007	21.606,80	240.156,00	183.719,34
27/07/2007 27/08/2007	21.667,80	240.442,00	183.938,13
28/08/2007 24/09/2007	24.626,70	273.988,00	209.600,82
25/09/2007 29/10/2007	49.742,60	552.681,00	422.800,97
30/10/2007 26/11/2007	57.950,00	638.471,00	488.430,32
27/11/2007 31/12/2007	80.975,13	957.590,00	732.556,35
Totaal	527.954,73	5.932.306,00	4.538.214,09

Het gefactureerde gasverbruik (kWh) stemt echter niet overeen met de effectieve warmtebehoefte van het ziekenhuis. De laatste kolom uit bovenstaande tabel, de warmtebehoefte (kWh), werd bekomen door twee correcties uit te voeren op het gefactureerd gasverbruik (kWh).

Energik (2004) geeft aan dat aardgas gefactureerd wordt op de bovenste verbrandingswaarde. Deze bovenste verbrandingswaarde is enkel van toepassing indien de latente warmte van de waterdamp uit de rookgassen wordt gerecupereerd, wanneer dus de rookgassen gecondenseerd worden. Meestal wordt deze warmte echter niet benut en moet men gebruik maken van de onderste verbrandingswaarde, die gemiddeld 90% bedraagt van de bovenste verbrandingswaarde. Het gefactureerde verbruik in kWh moet dus vermenigvuldigd worden met 0.90 indien we te maken hebben met een niet-condenserende ketel.

Bovendien moeten we ook rekening houden met het rendement van de ketel om vanuit het verbruik de echte warmtevraag te berekenen. Indien wordt uitgegaan van een gasgestookte ketel met een rendement van 85%, dienen we opnieuw het gefactureerde verbruik te vermenigvuldigen met 0.85.

Na de correcties van het gefactureerde gasverbruik voor het gebruik van de onderste in plaats van de bovenste verbrandingswaarde en voor het rendement van de ketel, bekomen we een totale warmtevraag van 4.538.214,09 kWh voor het jaar 2007.

Het ziekenhuis heeft een klassiek patroon wat betreft de warmtevraag, in de wintermaanden is de warmtevraag erg groot, vanwege de grote behoefte aan ruimteverwarming. In de zomer is de totale warmtevraag veel lager, omdat dan de behoefte voor ruimteverwarming veel lager is en quasi enkel sanitair warm water nodig is.

De warmtevraag is over alle afdelingen van het ziekenhuis ongeveer gelijkwaardig gespreid. De grootste warmteverbruikers zijn de operatiekwartieren, waar omwille van hygiënische richtlijnen heel veel luchtwisseling nodig is. In deze ruimtes wordt verse lucht ingeblazen en deze moet zeker in de winter verwarmd worden en op luchtvochtigheid geconditioneerd worden. Voor één operatiezaal is bijvoorbeeld ongeveer 12.000 m³ verse lucht nodig per uur, die dus ook opgewarmd moet worden en gelukkig gedeeltelijk hergebruikt kan worden (werkstuk Sven Cryns, persoonlijke communicatie Theo Thewys, 19 maart 2010).

9.2.2 Elektriciteitsvraag

Ook voor de bepaling van de elektriciteitsvraag zijn metingen de beste methode om deze vraag zo nauwkeurig mogelijk te bepalen. Wij beschikken echter niet over de nodige metingen en maken daarom gebruik van maandelijkse facturen uit 2007. In onderstaande tabel kan per maand de benodigde hoeveelheid elektriciteit worden afgelezen. Tijdens de piek- en daluren werd in totaal respectievelijk 3.005.445 kWh en 2.377.296 kWh elektriciteit verbruikt. Het totale elektriciteitsverbruik in 2007 bedroeg 5.382.741 kWh.

Tabel 34: Overzicht maandelijkse elektriciteitsbehoefte ziekenhuis

Periode	Normale uren (kWh)	Stille uren (kWh)	Totaal (kWh)
Januari	273.449	207.322	480.771
Februari	247.395	183.359	430.754
Maart	279.755	210.380	490.135
April	257.194	217.902	475.096
Mei	235.138	212.413	447.551
Juni	233.277	179.667	412.944
Juli	239.366	182.317	421.683
Augustus	248.301	195.212	443.513
September	226.831	195.677	422.508
Oktober	271.371	192.411	463.782
November	249.079	186.669	435.748
December	244.289	213.967	458.256
Totaal	3.005.445	2.377.296	5.382.741

Een grote verbruikspost in het ziekenhuis is de apparatuur die gebruikt wordt bij bijvoorbeeld radiologie en nucleaire diagnostiek. Ook de keuken is een aanzienlijke verbruikspost, met grote afwastoeestellen en kooktoestellen. In de zomer worden de patiëntkamers gekoeld, zodat de patiënten in kamers met een aangename temperatuur kunnen verblijven. Deze koeling verbruikt ook veel elektriciteit.

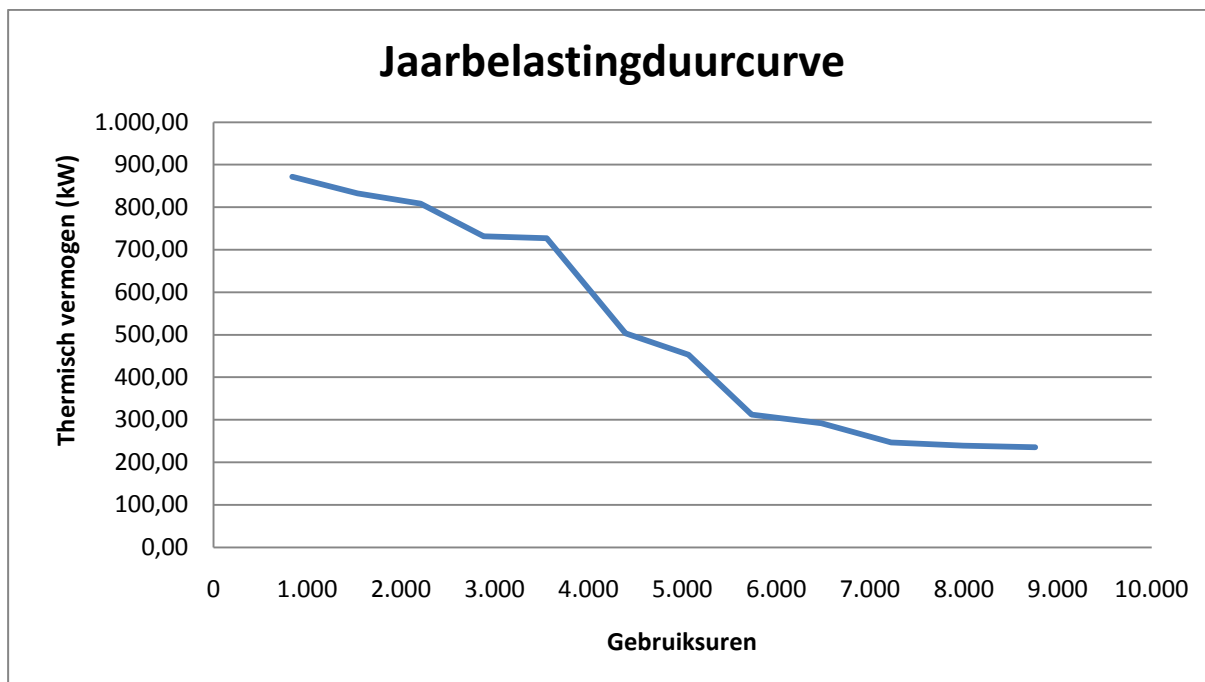
9.3 FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES

Na het in kaart brengen van de energievraag, kunnen we in de volgende fase overgaan tot de technische dimensionering. Aan de hand van de verzamelde gegevens over de energievraag kunnen we nu een jaarbelastingduurcurve opstellen, waar de 8760 uurlijkse waarden van de energievraag gerangschikt worden volgens grootte.

Om van bovenstaande verbruiksgegevens over te gaan naar een jaarbelastingduurcurve, dienen twee grote stappen te ondernomen te worden. Een jaarbelastingduurcurve wordt ook wel 'geordend vermogensdiagram' genoemd, we moeten dus enerzijds van het energieverbruik in kWh overgaan naar vermogen in kW en anderzijds de benodigde vermogens ordenen. We verkrijgen het vermogen in kW door het verbruik in kWh te delen door het aantal uren waarover dit gebruik gerealiseerd werd.

9.3.1 Jaarbelastingduurcurve warmte

De warmtebehoefte (in kWh) van het ziekenhuis werd in de vorige fase berekend per periode. Om over te gaan naar het benodigd vermogen (in kW) per periode, worden de verbruiksgegevens gedeeld door het aantal uren dat die periode telt. Om vervolgens de jaarbelastingduurcurve op te stellen, moeten de benodigde vermogens nog gerangschikt worden in de tijd, te beginnen met de grootste waarde. In bijlage 6 zijn de cijfergegevens en berekeningen van de jaarbelastingduurcurve terug te vinden. De jaarbelastingduurcurve zelf wordt in onderstaande figuur weergegeven.



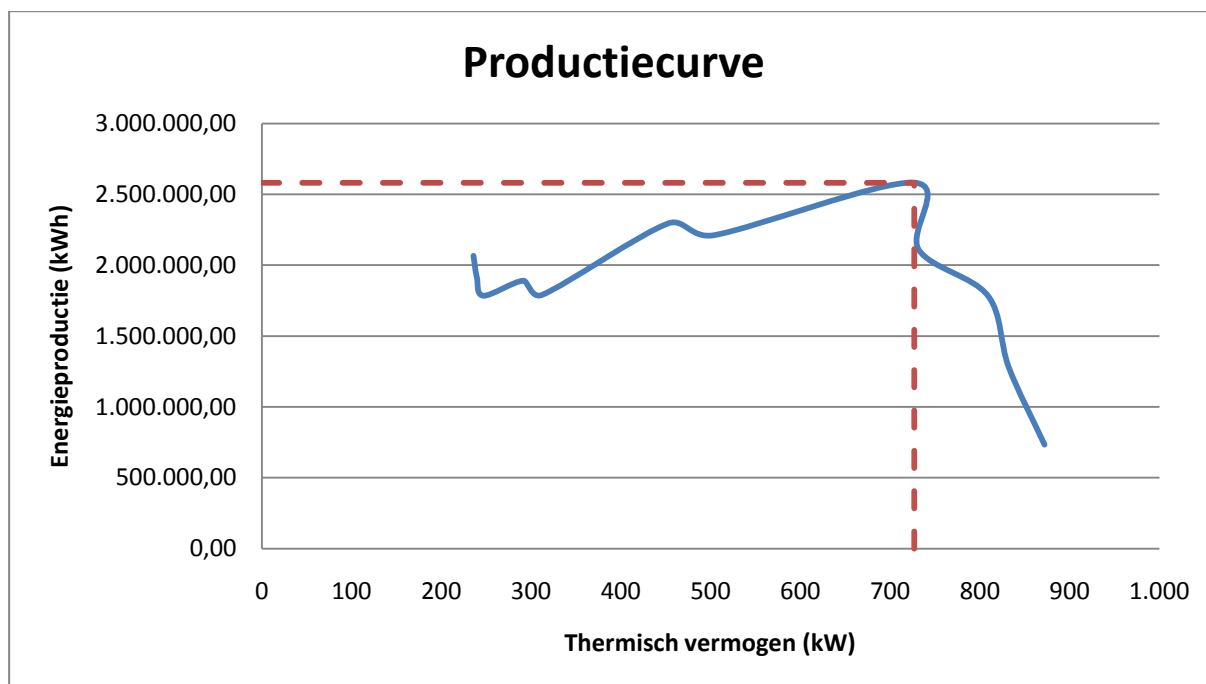
Figuur 45: Thermische jaarbelastingduurcurve ziekenhuis

Op de grafiek staat op de horizontale as het aantal uren (gaande tot 8760 uren, wat overeenkomt met een jaar), met per uur het benodigde vermogen in kW op de verticale as. De uren staan gesorteerd van een hoog benodigd vermogen naar een laag benodigd vermogen. Het oppervlak dat door de grafiek en de assen wordt ingesloten, geeft de totale jaarlijkse warmtevraag weer in kWh, in dit geval dus 4.538.214 kWh. Van de jaarbelastingduurcurve kan ook afgelezen worden hoeveel uur een bepaald thermisch vermogen nodig is. Er is bijvoorbeeld gedurende ongeveer 5000 uur op een jaar een thermisch vermogen groter dan 450 kW nodig. We zien ook dat er gedurende heel het jaar een minimaal thermisch vermogen benodigd is van zo'n 235 kW.

Uitgaande van bovenstaande jaarbelastingduurcurve kunnen we een inschatting maken van het vermogen en het aantal draaiuren van de optimale warmtekrachtinstallatie, door te zoeken naar de installatie die het meeste warmte produceert (energie, gemeten in kWh). Dit komt overeen met het zoeken naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve.

Om te bepalen wat de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve is, kan gebruik worden gemaakt van de productiecurve. Deze curve wordt bekomen door voor elk punt op de Y-as van de jaarbelastingduurcurve, de oppervlakte van de rechthoek onder de curve te berekenen (vermogen vermenigvuldigd met aantal gebruiksuren) en uit te zetten. In de productiecurve wordt dan de geproduceerde hoeveelheid energie (in kWh) op de Y-as in functie van het vermogen van het systeem (in kW) op de X-as uitgezet. We gaan hierbij wel uit van de veronderstelling dat het systeem slechts één mogelijk werkingpunt heeft, namelijk vollast. Het maximum van de

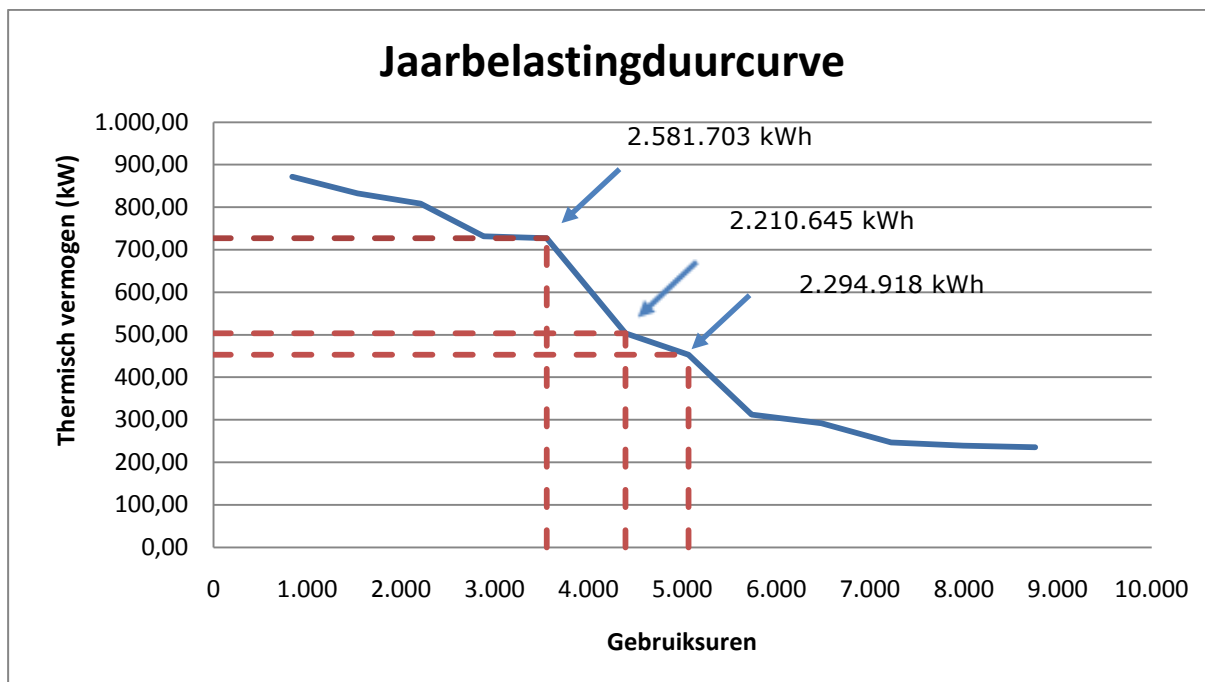
productiecurve correspondeert dan met de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve (Cogen Vlaanderen, 2006).



Figuur 46: Thermische productiecurve ziekenhuis

De productiecurve geeft weer hoeveel warmte een warmtekrachtinstallatie met een bepaald vermogen jaarlijks op vollast kan produceren. Uit de figuur blijkt dat een installatie met een thermisch vermogen van 727 kW optimaal is, aangezien hierbij de grootste hoeveelheid warmte geproduceerd kan worden (2.581.703 kWh per jaar). We merken bij deze grafiek op dat bij lagere thermische vermogens nog steeds een grote hoeveelheid warmte geproduceerd kan worden op jaarbasis. De hoeveelheid geproduceerde warmte daalt op de grafiek initieel slechts lichtjes indien we vanuit het maximum naar kleinere thermische vermogens (links) bewegen. Een installatie van 453 kW zal bijvoorbeeld nog steeds 2.294.918 kWh warmte per jaar produceren. Dit is een belangrijke bevinding, aangezien het voor de technische en ook financiële haalbaarheid van belang is dat de warmtekrachtinstallatie zoveel mogelijk draaiuren maakt. Indien we het thermisch vermogen van de installatie verminderen, zal het aantal uren dat de machine in vollast kan werken vermeederen.

Na het bepalen van het optimale vermogen (727 kW) met behulp van de productiecurve, kunnen we deze optimale hoeveelheid ook aanduiden in de jaarbelastingduurcurve. We zijn er nu zeker van dat bij 727 kW een maximale hoeveelheid warmte geproduceerd wordt van 2.581.703 kWh per jaar.



Figuur 47: Thermische jaarbelastingduurcurve ziekenhuis met aanduiding optimale installatie

De intersectie van de 'optimale rechthoek' met de verticale as geeft de optimale waarde qua thermisch vermogen van de warmtekrachtfaciliteit, in dit geval $727 \text{ kW}_{\text{th}}$. Als de installatie op vollast werkt, zal gedurende 3.552 uren per jaar een vermogen van $727 \text{ kW}_{\text{th}}$ geleverd worden. Voor de bepaling van de 'optimale rechthoek' werd enkel rekening gehouden met het behalen van een zo groot mogelijke warmteproductie (kWh), er werd geen rekening gehouden met het aantal draaiuren dat hierbij gerealiseerd kan worden. Stroobandt (2007) gaat ervan uit dat 4000 draaiuren op een jaar minimum realiseerbaar moeten zijn. Aangezien we met de huidige berekeningen niet aan deze 4.000 draaiuren komen, gaan we na wat de tweede meest optimale rechthoek is op basis van de grootste hoeveelheid geproduceerde energie in de productiecurve.

In bovenstaande jaarbelastingduurcurve worden daarom het tweede en derde gunstigste punt uit de productiefunctie overgebracht, waarbij dus de tweede en derde grootste hoeveelheid warmte geproduceerd wordt. Het punt met een vermogen van 453 kW en 5.064 gebruiksuren is duidelijk het tweede meest optimale punt. De hoeveelheid geproduceerde warmte bedraagt hier 2.294.918 kWh, dit is ten opzichte van het punt bij de 'grootste rechthoek' een achteruitgang in geproduceerde energie met zo'n 11% (van 2.581.703 kWh naar 2.294.918 kWh), terwijl het aantal draaiuren wel toeneemt met circa 43% (van 3.552 uur naar 5.064 uur).

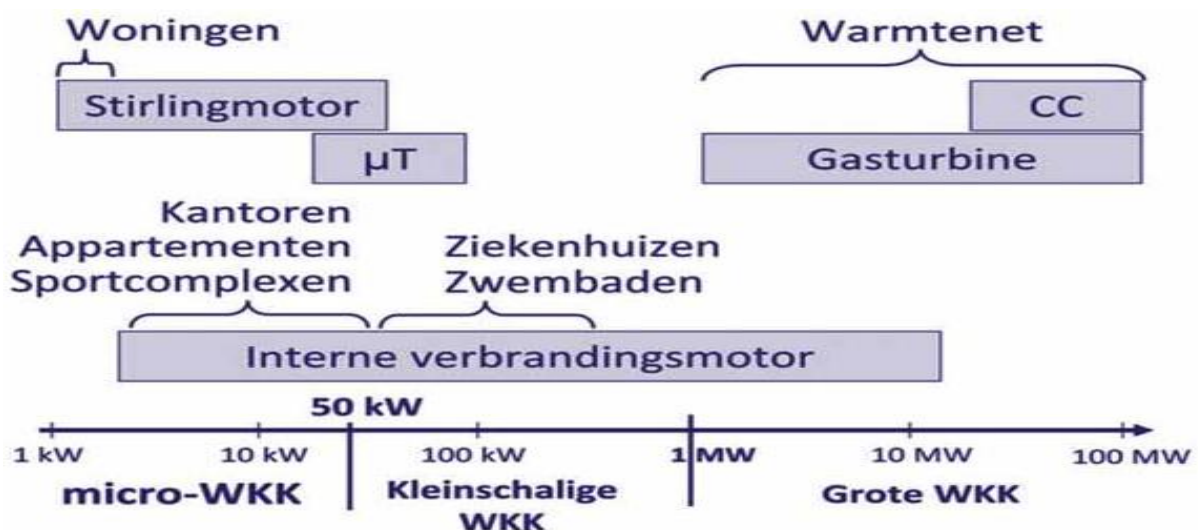
Aangezien warmtegedimensioneerde WKK's de voorkeur genieten (Cogen Vlaanderen, 2006), stellen we voor deze gevalstudie geen elektrische jaarbelastingduurcurve op en werken we in het

vervolg van het onderzoek verder met de thermische jaarbelastingduurcurve. De geïnteresseerde lezer die graag wil weten hoe elektrische dimensionering in zijn werk gaat, wordt doorverwezen naar de vorige gevalstudie van het zwembad, waar ook een elektrische dimensionering wordt uitgewerkt.

9.3.2 Evaluatie JBDC en keuze meest geschikte technologie

In deze stap wordt een keuze gemaakt tussen verschillende technologieën op basis van de verzamelde gegevens. Wij vertrekken hier zoals eerder gezegd van de thermische jaarbelastingduurcurve (JBDC). In theorie volstaat het om te zoeken naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve. In praktijk moet bij de dimensionering ook rekening gehouden worden met een reeks andere factoren, zoals de beschikbare installaties op de markt (niet alle vermogens zijn beschikbaar), de verkoopprijs van elektriciteit per kWh, de warmtekrachtverhouding, de betrouwbaarheid van de WKK-installatie (meerdere kleine WKK's in plaats van één grote zijn betrouwbaarder), de mogelijkheid van werking op deellast, het aantal start-stops, etc. (Cogen Vlaanderen, 2010). Rekening houdende met het feit dat Stroobandt (2007) vooropstelt dat een installatie in de verzorgingsinstellingen minstens 4000 draaiuren moet kunnen maken, kiezen we voor het punt op de jaarbelastingduurcurve met een thermisch vermogen van 453 kW_{th} en 5.064 draaiuren. De jaarlijkse warmteproductie bedraagt hierbij 2.294.918 kWh.

Het ziekenhuis heeft behoefte aan warmte met een temperatuurniveau lager dan 120°C en er is geen behoefte aan stoom. Dit is al een eerste indicatie om te kiezen voor een motor en niet voor een technologie met een turbine (Energik, 2004). Bovendien blijkt ook uit figuur 23 (hoofdstuk 7), die hieronder voor het gemak herhaald wordt, dat een interne verbrandingsmotor aangewezen is bij kleinschalige WKK's (Cogen Vlaanderen, 2010).



Figuur 48: Verschillende WKK-technologieën met hun toepassingsgebieden (Cogen Vlaanderen, 2010)

Het thermisch vermogen van de installatie werd vastgelegd op 453 kW_{th}. Het te installeren elektrisch vermogen kan dan bepaald worden aan de hand van het Excel bestand van Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010). Bij een installatie op bio-olie met een elektrisch vermogen van 404 kW_e hoort een elektrisch rendement van 38%, een thermisch rendement van 42% en een thermisch vermogen van 453 kW_{th}. In onderstaande tabel worden deze waarden samengevat.

Tabel 35: Kenmerken warmtekrachtinstallatie ziekenhuis

Kenmerk WKK-installatie	Waarde
Elektrisch vermogen	404 kW _e
Elektrisch rendement	38 %
Thermisch rendement	42 %
Totale rendement	80 %
Thermisch vermogen	453 kW _{th}

Om te verifiëren dat een installatie met een elektrisch vermogen van 404 kW_e effectief een thermisch vermogen heeft van 453 kW_{th} (wat voor deze gevalstudie optimaal is), kunnen we volgende calculaties maken. Een warmtekrachtinstallatie op bio-olie met een elektrisch vermogen van 404 kW_e heeft een elektrisch rendement van 38% en een thermisch rendement van 42%. Via deze rendementen kan de warmtekrachtverhouding en uiteindelijk ook het thermisch vermogen bepaald worden. De warmtekrachtverhouding is de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid warmte en de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit en kan berekend worden aan de hand van de rendementen (Cogen Vlaanderen, 2006). De warmtekrachtratio bedraagt in dit geval 1,11 kW_{th}/kW_e (0,42 / 0,38). Het thermisch vermogen kunnen we nu berekenen door het elektrisch vermogen te vermenigvuldigen met de gevonden warmtekrachtverhouding. Het thermisch vermogen bedraagt dan 1,11 kW_{th}/kW_e * 404 kW_e ≈ 453 kW_{th}.

Een dergelijke installatie zal volgens de hierboven bepaalde jaarbelastingduurcurve 5.064 uren per jaar in werking zijn. Bij 5.064 werkingsuren zal met een geïnstalleerd elektrisch vermogen van 404 kW_e 2.045.856 kWh elektrische energie per jaar geproduceerd worden en met een geïnstalleerd thermisch vermogen van 453 kW_{th} 2.293.992 kWh thermische energie per jaar. Deze thermische energie kan ook afgelezen worden uit bijlage 6 (kolom 'bepaling rechthoek'), maar vanwege afrondingsfouten is de waarde lichtjes afwijkend.

De totale warmtevraag in het ziekenhuis over een volledig jaar bedraagt 4.538.214 kWh (zie paragraaf 9.2.1 warmtevraag), zodat nog 2.244.222 kWh warmte nodig is, geleverd door een verwarmingsketel. Aangezien er jaarlijks een elektriciteitsbehoefte is van 5.382.741 kWh (zie paragraaf 9.2.2 elektriciteitsvraag) en er 2.045.856 kWh elektriciteit geproduceerd kan worden

met behulp van de WKK-installatie, moet er nog zo'n 3.336.885 kWh aangekocht worden uit het net. Bovenstaande cijfergegevens staan samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 36: Warmte- en elektriciteitsproductie WKK-installatie ziekenhuis

Totale warmtebehoefte	4.538.214	kWh _{th}
Totale elektriciteitsvraag	5.382.741	kWh _e
Warmte geleverd door WKK	2.293.992	kWh _{th}
Elektriciteit geleverd door WKK	2.045.856	kWh _e
Warmte geleverd door ketel	2.244.222	kWh _{th}
Elektriciteit uit het net	3.336.885	kWh _e

9.4 FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE

Tijdens de economische analyse wordt onderzocht of een investering in de vooropgestelde WKK economisch gezien haalbaar is. Er wordt hierbij verondersteld dat het ziekenhuis het investeringsproject in eigen beheer zal uitvoeren. Dit houdt in dat de opbrengsten en jaarlijkse inkomende cashflows die het project oplevert enkel bestemd zijn voor het ziekenhuis. Hiertegenover staat dat er geen derde partij of energiebedrijf wordt betrokken bij de financiering van het investeringsproject en dat men dus de initiële investeringsuitgave van de WKK-installatie voor honderd procent zelf zal dragen. Ook de jaarlijkse uitbatings- en onderhoudskosten vallen ten laste van het ziekenhuis. In de economische analyse zullen ook de subsidies en financiële voordelen opgenomen worden waarop men recht heeft bij de investering in warmtekrachtkoppeling.

De economische evaluatie wordt uitgevoerd aan de hand van verwachte kasstromen en niet op basis van kosten en opbrengsten (boekhoudkundige resultaten). Een kasstroom is immers objectiever te bepalen dan een boekhoudkundige opbrengst of kost, die bijvoorbeeld beïnvloed wordt door afschrijvingsmethodes en waarderingsgrondslagen.

Enkel differentiële kasstromen worden beschouwd in de investeringsanalyse. We houden dus enkel rekening met inkomsten en uitgaven die ontstaan ten gevolge van het nieuwe energiesysteem, die zich niet zouden voordoen in de huidige situatie zonder WKK-installatie. Cashflows die voorkomen onder de huidige situatie en die nog steeds ondervonden zullen worden bij het nieuwe energiesysteem, zullen niet opgenomen worden.

9.4.1 Investeringskosten

We gaan uit van een investering in een WKK-installatie op bio-olie die hierboven aangeduid werd als meest geschikte technologie, met een elektrisch vermogen van 404 kW_e en een thermisch vermogen van 453 kW_{th}.

De investeringskosten in een warmtekrachtinstallatie op bio-olie wordt volgens Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) berekend aan de hand van een logaritmische functie in functie van de grootte van de motor, waarbij schaalvoordelen optreden vanaf een elektrische capaciteit van 1600 kW_e. De formule voor de berekening van de investeringskosten per kW_e is dan ook verschillend al naargelang we werken met een installatie met een elektrisch vermogen kleiner of groter dan 1600 kW_e.

$$I = (-93,709 \times \ln(P_e) + 991,53) \times 2 \quad \text{Indien } P_e < 1600 \text{ kW}_e$$
$$I = 600 \quad \text{Indien } P_e > 1600 \text{ kW}_e$$

De investeringskosten per kW_e van de vooropgestelde warmtekrachtinstallatie (elektrisch vermogen van 404 kW_e) bedragen 858 €/kW_e. De totale investering voor de warmtekrachtkoppeling bedraagt dan €346.748.

Verder is ook een investering in een rookgasreiniger van belang om de uitstoot van schadelijke stoffen te beperken. Voor de gekozen installatie bedragen de investeringskosten hiervoor €32.589 (Stroobandt 2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010).

Het Excel bestand van Stroobandt dateert van 2007, bovenstaande kostprijzen dienen daarom nog geconverteerd te worden naar huidige prijzen. Deze conversie gebeurt aan de hand van de Marshall & Swift Equipment Cost Index, die in dimensieloze cijfers aangeeft hoe de kosten van industriële installaties veranderen doorheen de tijd. In 2007 bedroeg de Marshall & Swift Equipment Cost Index 1.373,3 en in 2010 bedroeg deze 1.457,4 (Chemical Engineering, 2011). De prijzen van industriële installaties zijn dus met zo'n 6,12% gestegen gedurende deze periode. Indien we deze prijsstijging in rekening brengen in de prijzen berekend met het Excel bestand van Stroobandt, dan bedraagt de investering in de warmtekrachtinstallatie €367.982 en in de rookgasreiniger €34.585.

Het ziekenhuis wordt ook uitgebaat als VZW. VZW's moeten op alle materialen en toestellen die aangekocht worden 21% BTW betalen en kunnen deze, in tegenstelling tot 'gewone' bedrijven, niet recupereren. Bij het investeringsbedrag van de warmtekrachtinstallatie en de rookgasreiniger moet dus nog 21% BTW bijgeteld worden. Deze BTW bedraagt €84.539.

Het is aangewezen om bij de start van een project rekening te houden met onvoorziene omstandigheden en daarom in de budgetraming een toeslag voor onvoorziene kosten in rekening

te brengen. De risicopremie kan best geschat worden op 15 à 20% van de totale investeringskosten (Cogen Vlaanderen, 2006). Aangezien we in deze masterproef te maken hebben met een nieuwe technologie, warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie, rekenen we met een risicopremie van 20% van de totale investeringskost.

In onderstaande tabel worden alle investeringskosten weergegeven, inclusief BTW en risicopremie. De totale kosten bedragen dan €584.528.

Tabel 37: Investeringskosten WKK-installatie ziekenhuis

Warmtekrachtinstallatie	€ 367.982
Rookgasreiniger	€ 34.585
BTW	€ 84.539
Risicopremie	€ 97.421
Totaal	€ 584.528

9.4.2 Uitgaande kasstromen

9.4.2.1 Onderhouds- en uitbatingskosten

Een onderhoudsformule waarbij alles inbegrepen is, kost voor kleine, conventionele motoren op aardgas ongeveer 12 à 15 €/MWh. Doordat de motor in deze masterproef verondersteld wordt te draaien op pyrolyse-olie, ligt de onderhoudsprijs een stuk hoger dan voor conventionele WKK-installaties op aardgas. Bij motoren die werken op alternatieve brandstoffen, zoals bio-oliën, zijn de onderhoudskosten veel hoger doordat meer servicebeurten en kleine revisies vereist zijn (Stroobandt, 2007).

Aan de hand van het Excel bestand van Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) kunnen de onderhouds- en uitbatingskosten van de gekozen installatie bepaald worden. De warmtekrachtkoppeling kent een onderhoudskost van 33,6 €/MWh_e en de rookgasreiniger kost 13,4 €/MWh_e in onderhoud. Aangezien de installatie 2.045.856 kWh of 2.046 MWh elektrische energie produceert, komt dit neer op €68.805 voor de WKK en €27.510 voor de rookgasreiniger.

Ook hier moet rekening gehouden worden met een verandering van het prijspeil. Om de cijfers van 2007 naar 2010 te converteren, wordt gebruik gemaakt van de consumptieprijsindex. In december 2007 bedroeg deze index 108,40 en in december 2010 bedroeg deze 115,00 (FOD Economie, 2011a). De consumptieprijsindex steeg dus met 6,09%. Na aanpassing van bovenvermelde

onderhoudskosten naar het prijspeil van 2010, bedragen de onderhoudskosten voor de WKK €72.994 en voor de rookgasreiniger €29.185.

Ook voor de onderhouds- en uitbatingskosten dienen we 21% BTW in rekening te brengen, aangezien het ziekenhuis deze niet kan terugvorderen. De totale BTW hiervoor bedraagt €21.458.

De totale jaarlijkse onderhouds- en uitbatingskosten voor een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie zouden voor het ziekenhuis €123.637 bedragen.

Tabel 38: Jaarlijkse onderhouds- en uitbatingskosten ziekenhuis

Onderhouds- en uitbatingskosten WKK	€ 72.994
Ureum rookgasreiniger	€ 29.185
BTW	€ 21.458
Totaal	€ 123.637

9.4.2.2 Aankoopkosten pyrolyse-olie

Een tweede grote exploitatiekost is de aankoop van de pyrolyse-olie die nodig is om de installatie te doen draaien. Uitgaande van een jaarlijkse warmteproductie van 2.293.992 kWh_{th} en een elektriciteitsproductie van 2.045.856 kWh_e kunnen we de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie berekenen.

In eerste instantie moeten we hiervoor de thermische en elektrische efficiëntie kennen. De thermische efficiëntie van de WKK-installatie bedraagt 42% en de elektrische efficiëntie 38% (zie tabel kenmerken warmtekrachtinstallatie ziekenhuis).

Verder moeten we ook de onderste verbrandingswaarde (LHV) van de pyrolyse-olie kennen. We gaan er vanuit dat 42% van de onderste verbrandingswaarde van de olie wordt omgezet in warmte en 38% van de onderste verbrandingswaarde van de olie wordt omgezet in elektriciteit. We gaan niet uit van de bovenste verbrandingswaarde (HHV), aangezien dit tot een overschatting zou leiden van de geproduceerde warmte en elektriciteit. Bij gebruik van de bovenste verbrandingswaarde wordt immers verondersteld dat de latente energie (warmte) van de waterdamp in de rookgassen gerecupereerd kan worden. In de praktijk wordt deze latente energie echter niet gebruikt en dienen de berekeningen uitgevoerd te worden met de onderste verbrandingswaarde. In de literatuur (Lu, et al., 2009) vinden we een onderste verbrandingswaarde van pyrolyse-olie terug van 14-18 MJ/kg. Uitgaande van een dichtheid van 1,2 kg/l (T. Bridgwater, 2007) krijgen we zo een onderste verbrandingswaarde van 16,8 - 21,6 MJ/l. Ringer (2006) neemt als onderste verbrandingswaarde 18 MJ/l en deze waarde wordt ook in deze studie gehanteerd voor de

berekening van de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie. 18 MJ/l komt overeen met 5 kWh/l, aangezien 1 kWh overeenstemt met 3,6 MJ.

$$2.293.992 \text{ kWh} = V_{\text{olie}} * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} * 0,42$$

$$2.045.856 \text{ kWh} = V_{\text{olie}} * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} * 0,38$$

Het volume pyrolyse-olie dat benodigd is, zou in beide vergelijkingen hetzelfde moeten uitkomen. Door afrondingsfouten zit hier een kleine speling op. We nemen het grootste getal, namelijk 1.092.377 liter. Gegeven de thermische en elektrische rendementen en gegeven de onderste verbrandingswaarde van pyrolyse-olie is er dus 1.092.377 liter pyrolyse-olie nodig voor de warmte- en elektriciteitsproductie.

Coenen en Schlatmann (2007) schatten dat de verkoopprijs van pyrolyse-olie circa 6 € per GJ bedraagt. Volgens Van Stijn (persoonlijke communicatie, 19 november 2010) bedraagt de verkoopprijs van pyrolyse-olie €9 per GJ of €0,0324 per kWh. De hoogste prijs van €9 per GJ wordt ook in deze masterproef gehanteerd. Uitgaande van een LHV van 18 MJ/l (of 5 kWh/l) betekent dit een prijs van €0,162 per liter. Bij een jaarlijks verbruik van 1.092.377 liter bekomt men zo een kostprijs van €176.965. Wanneer hier BTW wordt bijgeteld, bekomt men een jaarlijkse kostprijs voor de pyrolyse-olie van €214.128.

9.4.3 Inkomende kasstromen

9.4.3.1 Besparingen energierekening

Een eerste 'inkomende' kasstroom bestaat uit de besparing op de energierekening doordat minder brandstof nodig is voor de opwekking van warmte. De WKK-installatie zal een gedeelte van de warmte produceren die vroeger door ketels werd geleverd. Deze hoeveelheid wordt gewaardeerd aan de brandstofprijs per MWh die het ziekenhuis betaalt. Aangezien de meest recente gegevens dateren van 2007, worden deze met behulp van cijfers van de FOD Economie omgezet naar prijscijfers voor 2010. Op haar website publiceert de FOD Economie de gemiddelde prijzen van verschillende goederen en diensten doorheen de tijd, om zo de prijsevolutie ervan te kunnen volgen. De gepubliceerde gemiddelde prijs voor aardgas voor een groot verbruik (D3b) steeg over de periode van 3 jaar met zo'n 7,83% (FOD Economie, 2010). De aardgasprijs bestaat uit 3 grote componenten: de eenheidsprijs, de nettarieven en de toeslagen. De eenheidsprijs die het ziekenhuis in 2007 betaalde, bedroeg 0,03202 €/kWh, het nettarief bedroeg 0,001741 €/kWh en de bijdragen en taxes bedroegen 0,000563 €/kWh. De totale prijs per kWh bedroeg dus €0,034324. Om de prijs te converteren naar 2010, gaan we ervan uit dat deze 7,83% gestegen is en dus 0,037012 bedraagt.

De warmtekrachtinstallatie zal op jaarbasis 2.293.992 kWh thermische energie produceren. Indien deze hoeveelheid opgewekt zou worden door de verwarmingsketels is hiervoor, uitgaande van een thermisch rendement van 85%, 2.698.814 kWh aan brandstof nodig. Ook moeten we nog een correctie doorvoeren vanwege de verbrandingswaarde. Aardgas wordt altijd gefactureerd op de bovenste verbrandingswaarde. Gebruik van de bovenste verbrandingswaarde is enkel van toepassing indien de latente warmte van de waterdamp uit de rookgassen ook wordt gerecupereerd en de rookgassen dus gecondenseerd worden. In de praktijk wordt deze warmte echter niet benut. De onderste verbrandingswaarde bedraagt gemiddeld 90% van de bovenste verbrandingswaarde (Energik, 2004). Aangezien de aardgas wordt gefactureerd op de bovenste verbrandingswaarde, moeten we nog eens delen door 0.90. Er is in totaal 2.998.682 kWh aan aardgas (bovenste verbrandingswaarde) nodig.

De besparing die gerealiseerd wordt doordat minder aardgas aangekocht moet worden met het nieuwe energiesysteem, bedraagt €110.986 ($2.998.682 \text{ kWh} * 0,037012 \text{ €/kWh}$).

Een tweede 'inkomende' kasstroom bestaat uit de besparing op de energierekening doordat elektriciteit nu lokaal wordt opgewekt. De warmtekrachtinstallatie levert op jaarbasis 2.045.856 kWh elektrische energie, die niet meer aangekocht moet worden van het net. We gaan ervan uit dat de WKK voornamelijk overdag zal draaien om aan de grootste warmtevraag te voldoen en om de aankoop van elektriciteit aan hoge prijzen te vermijden. We waarderen daarom ook de elektriciteit aan het tarief van de normale uren. Dit tarief bedroeg in 2007 0,080503 €/kWh. Uit de gegevens van de FOD economie (FOD Economie, 2010) kunnen we ook hier berekenen met hoeveel procent de elektriciteitsprijzen gestegen van 2007 naar 2010. De gepubliceerde gemiddelde prijs voor elektriciteit voor een groot verbruik steeg over de periode van 3 jaar met zo'n 13,98% (FOD Economie, 2010). De gehanteerde elektriciteitsprijs voor 2010 bedraagt dan ook 0,0917573 €/kWh. De jaarlijkse besparing gerealiseerd door verminderde aankoop van elektriciteit komt in dat geval uit op €187.722 ($2.045.856 \text{ kWh} * 0.0917573 \text{ €/kWh}$).

Tabel 39: Besparingen energierekening ziekenhuis

Vermeden aankoop aardgas (ketel)	€ 101.239
Vermeden aankoop elektriciteit	€ 133.994

In deze rubriek "besparingen op de energierekening" is het belangrijk enkele veronderstellingen toe te lichten. Een eerste assumptie die gemaakt wordt, is dat de energievraag de komende 10 jaren gelijk is aan de huidige energievraag en dat het ziekenhuis dus hetzelfde warmte- en elektriciteitsverbruik zal kennen. Een tweede assumptie die gemaakt wordt, betreft de energieprijzen. Het is moeilijk te voorspellen hoe de prijzen precies zullen evolueren, hoewel we op lange termijn wel verwachten dat de energieprijzen zullen stijgen. In deze studie wordt de prijs

voor aardgas en elektriciteit echter voor 10 jaar hetzelfde gehouden, waardoor ook de jaarlijkse besparingen op de energierekening voor 10 jaar hetzelfde blijven. Dit standpunt lijkt de voorzichtigste aanpak, aangezien het toekennen van een willekeurig groeicijfer van de energieprijzen en dus ook van de gerealiseerde besparingen ervoor zou zorgen dat in een later stadium de berekende NCW hoger wordt.

9.4.3.2 Verkopen elektriciteit

De opgewekte elektriciteit door de warmtekrachtkoppeling bedraagt 2.045.856 kWh_e, terwijl de totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit 5.382.741 kWh_e bedraagt. Er wordt dus minder elektriciteit opgewekt dan gevraagd, dit wil zeggen dat er geen overschot aan elektriciteit op het net moet worden gezet. Er is dus ook geen sprake van opbrengsten uit verkopen van elektriciteit.

9.4.3.3 Inkomsten uit verkoop van warmtekrachtcertificaten

Vooraleer de inkomsten uit de warmtekrachtcertificaten berekend worden, moet eerst onderzocht worden of men effectief recht heeft op deze certificaten en of de installatie dus kwalitatief is. Aangezien we te maken hebben met een installatie kleiner dan 1 MW_e, is het voldoende als de relatieve primaire energiebesparing groter is dan 0% (Vlaamse Regering, 2006a).

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \right) \geq 0 \%$$

In deze formule dienen de Europese referentierendementen gebruikt te worden. Het thermisch referentierendement kan in tabel 1 van bijlage 2 teruggevonden worden en bedraagt 89% indien de WKK draait op pyrolyse-olie. Het elektrisch referentierendement kan in tabel 2 van bijlage 2 teruggevonden worden en bedraagt 44,2% voor installaties op biobrandstoffen die geconstrueerd werden in 2006-2011. Er dient nog wel een correctie uitgevoerd te worden voor de klimaatomstandigheden. De gemiddelde jaartemperatuur bedraagt in België 11°C (Cogen Vlaanderen, 2006). Aangezien het referentierendement verhoogd moet worden met 0,1% per graad waarmee de gemiddelde jaartemperatuur beneden de 15°C blijft, bedraagt het referentierendement 44,6%. Bovendien moet ook nog een correctie doorgevoerd worden voor de aansluitspanning. De correctiefactoren hiervoor zijn terug te vinden in tabel 3 van bijlage 2. De warmtekrachtinstallatie zal aangesloten worden op het distributienet. Indien de elektriciteit getransporteerd wordt over het middenspanningsnet, bedraagt het referentierendement 0,446 * 0,945 = 0,42147. Indien het transport van elektriciteit over het laagspanningsnet gebeurt, bedraagt het referentierendement 0,446 * 0,925 = 0,41255. In dit onderzoek wordt 0,42147 als elektrisch referentierendement gehanteerd. In onderstaande tabel worden de referentierendementen en de rendementen van de WKK-installatie weergegeven die gebruikt worden om de relatieve primaire energiebesparing te berekenen.

Tabel 40: Rendementen voor berekening RPEB ziekenhuis

Thermisch rendement WKK α_Q	42 %
Elektrisch rendement WKK α_E	38 %
Thermisch rendement referentie η_Q	89 %
Elektrisch rendement referentie η_E	42,1 %

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{0,45}{0,89} + \frac{0,35}{0,421}} \right) = 27.2 \% \geq 0 \%$$

De relatieve primaire energiebesparing ligt duidelijk hoger dan 0%, waardoor de WKK-installatie recht heeft op warmtekrachtcertificaten.

Om het aantal warmtekrachtcertificaten te bepalen waarop de installatie recht heeft, dienen we niet de relatieve, maar de absolute primaire energiebesparing te berekenen. Per gerealiseerde MWh absolute energiebesparing wordt 1 certificaat toegekend. We moeten dus de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (E) vermenigvuldigen met de warmtekrachtbesparingsfactor.

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E * \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right)$$

In deze formule gebruiken we voor de referentierendementen niet dezelfde cijfers als hierboven, maar worden de Vlaamse referentierendementen (Vlaamse Regering, 2006a) gehanteerd. In tabel 1 van bijlage 1 zien we dat het thermisch referentierendement 90% bedraagt. Het elektrisch referentierendement kan afgelezen worden in tabel 3 van bijlage 1 en bedraagt 42,7%, aangezien de WKK installatie gebruik maakt van een vloeibare biobrandstof. De hoeveelheid geproduceerde elektrische energie (E) bedraagt 2.045.856 kWh_e op jaarbasis.

Tabel 41: Gegevens berekening absolute PEB ziekenhuis

Thermisch rendement WKK α_Q	42 %
Elektrisch rendement WKK α_E	38 %
Thermisch rendement referentie η_Q	90 %
Elektrisch rendement referentie η_E	42,7 %
Geproduceerde elektrische energie E	2.045.856 kWh _e

$$PEB = 2.045.856 \text{ kWh} * \left(\frac{1}{0,427} + \frac{0,42}{0,38 * 0,90} - \frac{1}{0,42} \right) = 2.432.601 \text{ kWh}$$

De absolute primaire energiebesparing bedraagt 2.432.601 kWh of 2.432,60 MWh en aangezien er per gerealiseerde MWh absolute energiebesparing 1 warmtekrachtcertificaat wordt toegekend, heeft men recht op 2.432,60 certificaten per jaar.

Om de opbrengsten uit de verkopen van de certificaten te bepalen, hebben we twee mogelijkheden. We kunnen rekenen met de marktprijs of met de minimumprijs. De VREG adviseert bij het opmaken van financiële haalbaarheidsstudies te werken met de minimumsteun en niet met de marktprijs, omdat enkel de minimumsteun gegarandeerd is (VREG, 2011d). In deze studie wordt dan ook gerekend met de minimumprijs van €27 per certificaat. Gedurende de eerste 4 jaren brengen de certificaten jaarlijks €65.680 op. Vanaf maand 49 (jaar 5) wordt nog slechts een fractie X van de certificaten aanvaard.

$$X = \frac{RPEB - 0,2 * (T - 48)}{RPEB}$$

Waarbij T de tijd in maanden bedraagt en RPEB de relatieve primaire energiebesparing voorstelt, berekend met referentiewaarden van de Vlaamse regering (2006a) en dus niet met de Europese referentiewaarden zoals hierboven. De relatieve primaire energiebesparing op basis van de Vlaamse referentiewaarden bedraagt 26.29%.

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{0,42}{0,90} + \frac{0,38}{0,427}} \right) = 26.29\%$$

In bijlage 7 wordt op maandbasis het percentage aanvaarde certificaten, het aantal aanvaarde certificaten en de inkomsten uit de verkoop van de warmtekrachtcertificaten weergegeven. In onderstaande tabel worden deze gegevens gesommeerd per jaar.

Tabel 42: Bepaling jaarlijks aantal warmtekrachtcertificaten en hun opbrengsten (ziekenhuis)

Jaar	Aantal certificaten	Inkomsten (€)
1	2432,60	65.680 €
2	2432,60	65.680 €
3	2432,60	65.680 €
4	2432,60	65.680 €
5	2312,29	62.432 €
6	2090,19	56.435 €
7	1868,09	50.438 €
8	1645,98	44.442 €
9	1423,88	38.445 €
10	1201,78	32.448 €

9.4.3.4 *Inkomsten uit verkoop van groenestroomcertificaten*

Aangezien de warmtekrachtinstallatie draait op pyrolyse-olie, kan de eigenaar naast warmtekrachtcertificaten ook aanspraak maken op groenestroomcertificaten. De groenestroomcertificaten worden maandelijks toegekend per schijf van 1.000 kWh opgewekte elektriciteit. De certificaten worden dus verkregen voor alle geproduceerde elektriciteit, ongeacht of deze plaatselijk verbruikt wordt of aan het net wordt geleverd (Vlaamse regering, 2010b).

Om het aantal groenestroomcertificaten te berekenen waarop de eigenaar recht heeft, wordt enkel gekeken naar de nettoproductie van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen. Het begrip "netto" houdt in dat een bepaalde hoeveelheid energie moet worden afgetrokken van de gemeten elektriciteitsproductie. Het betreft de energie die verbruikt wordt door de hulpvoorziening van productie-installatie, de energie die verbruikt werd bij het eventuele transport uit het buitenland van de hernieuwbare energiebron en de energie die verbruikt werd voor de voorbehandeling die nodig was om de hernieuwbare energiebron geschikt te maken voor elektriciteitsproductie. (Vreg, 2007). Vooral de voorbehandeling is in het kader van dit onderzoek een grote energiepost. Hierbij denken we onder andere aan de landbouwactiviteiten van het kortoomloophout (zaaien, bewerken van het land, oogsten, verhakselen...) en aan de pyrolyse van het kortoomloophout. Indien de eigenaar van een WKK-installatie op pyrolyse-olie aanspraak wil maken op groenestroomcertificaten, is het zijn taak om aan de VREG alle informatie te bezorgen die nodig is om het equivalent elektriciteitsverbruik van de voorbehandeling te kunnen bepalen.

In dit onderzoek wordt verondersteld dat de "netto" elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen 75% bedraagt van de totale elektriciteitsproductie en dat dus 25% moet worden afgetrokken als voorbehandelingsenergie (Tom Kuppens, persoonlijke communicatie 20 mei 2011). In dit geval komt dus ook 75% van de elektriciteit die opgewekt werd met de WKK in aanmerking voor groenestroomcertificaten.

De warmtekrachtinstallatie produceert 2.045.856 kWh_e of 2.045,86 MWh_e elektrische energie op jaarbasis. Als we ervan uitgaan dat 75% van deze opgewekte elektriciteit in aanmerking komt voor groenestroomcertificaten, betekent dit in deze gevalstudie dat het ziekenhuis voor 1.534.392 kWh_e of 1.534,39 MWh_e elektrische energie beroep kan doen op groenestroomcertificaten. Net zoals bij de warmtekrachtcertificaten hanteren we voor de berekening van de opbrengsten uit de groenestroomcertificaten de minimumprijs in plaats van de marktprijs, aangezien enkel de minimumprijs gegarandeerd is. Uitgaande van de minimumsteun voor groenestroomcertificaten van €90 per certificaat en gegeven het feit dat elke MWh_e elektrische energie een certificaat oplevert, betekent dit zo'n €138.095 aan certificaten op jaarbasis. De groenestroomcertificaten hebben geen degressief karakter, men heeft alle jaren recht op evenveel certificaten.

9.4.3.5 Verhoogde investeringsaftrek

Een onderneming die een energiebesparende investering doet, kan onder bepaalde voorwaarden profiteren van een investeringsaftrek. Dit houdt in dat de belastbare winst van de onderneming verminderd kan worden met een gedeelte van het bedrag van de investering uitgevoerd in de belastbare periode. Om in aanmerking te komen voor een investeringsaftrek moet de WKK-installatie aan enkele voorwaarden voldoen. In de eerste plaats moet het gaan om een installatie die nog niet eerder in gebruik werd genomen. Ook worden bepaalde voorwaarden gesteld betreffende het elektrisch en thermisch rendement van de installatie.

$$N_k + \frac{2}{3} N_w \geq 50\% \text{ en } \frac{N_k}{N_k + N_w} \geq 25\% \text{ en } \frac{N_w}{N_k + N_w} \geq 25\%$$

Het gemiddelde rendement van kracht (N_k) en van warmte (N_w) moet worden bepaald op basis van de onderste verbrandingswaarde van de ingezette brandstof. De aangekochte hoeveelheid brandstof nodig voor de WKK bedraagt 1.092.377 liter en de onderste verbrandingswaarde van pyrolyse-olie bedraagt 18 MJ/l (=5 kWh/l) (Ringer, 2006). De jaarlijks toegevoegde energie op jaarbasis berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof bedraagt dus 5.461.886 kWh (1.092.377 l * 5 kWh/l). Het elektrisch rendement bedraagt dan 2.045.856 kWh / 5.461.886 kWh = 37,46% en het thermisch rendement 2.293.992 kWh / 5.461.886 kWh = 42,00%. Wanneer deze waarden gesubstitueerd worden in bovenstaande formules, blijkt dat de installatie op pyrolyse-olie in aanmerking komt voor een verhoogde investeringsaftrek, aangezien aan alle vergelijkingen voldaan wordt.

$$N_k + \frac{2}{3} N_w = 65\% \text{ en } \frac{N_k}{N_k + N_w} = 47\% \text{ en } \frac{N_w}{N_k + N_w} = 53\%$$

De verhoogde investeringsaftrek geldt voor de investeringskost van de WKK-installatie en van de rookgasreiniger. De investeringskost waarop de investeringsaftrek berekend wordt, bedraagt dan €402.568. In het jaar van aanschaf kan daarom de belastbare winst in mindering worden gebracht met een bedrag gelijk aan €54.347 (13,5% van €402.568). De vennootschapsbelasting bedraagt 33,99%, waardoor een absoluut voordeel van €18.472 bekomen wordt.

9.4.4 Berekening Netto Contante Waarde (NCW)

In deze fase van het onderzoek wordt de NCW van het investeringsproject in een WKK-installatie op pyrolyse-olie voor Mariaziekenhuis berekend. De formule voor de berekening van de NCW kan als volgt worden weergegeven (Mercken, 2004):

$$NCW_t = \sum_{t=1}^n [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * \widehat{A}_t] * A_{t-i} - I_0 + b * c * I'_0$$

De verschillende parameters zullen stap voor stap ingevuld en besproken worden. In eerste instantie gaan we ervan uit dat de warmtekrachtinstallatie die draait op pyrolyse-olie een levensduur van 10 jaren zal hebben. In de literatuur vinden we terug dat interne verbrandingsmotoren een levensduur van 15 jaar hebben, maar aangezien de pyrolyse-olie versnelde slijtage kan veroorzaken, gaan we uit van een levensduur van 10 jaar.

9.4.4.1 Jaarlijkse cashflows (Ot – Qt)

Gegeven dat we een projectduur van 10 jaar vooropstellen, worden vervolgens de jaarlijkse netto cashflows die zich gedurende deze 10 jaar voordoen opgesteld. De relevante kasstromen werden reeds besproken in bovenstaande paragrafen en worden samengevat in onderstaande overzichtstabellen.

Tabel 43: Overzicht jaarlijkse uitgaande cashflows ziekenhuis

Jaar	Onderhouds- en werkkingskosten (€)	Aankoop pyrolyse-olie (€)	Uitgaande cashflows totaal (€)
1	123.637	176.965	273.280
2	123.637	176.965	273.280
3	123.637	176.965	273.280
4	123.637	176.965	273.280
5	123.637	176.965	273.280
6	123.637	176.965	273.280
7	123.637	176.965	273.280
8	123.637	176.965	273.280
9	123.637	176.965	273.280
10	123.637	176.965	273.280

Tabel 44: Overzicht jaarlijkse inkomende cashflows ziekenhuis

Jaar	Vermeden aankoop aardgas (€)	Vermeden aankoop elektriciteit (€)	Inkomsten WK certificaten (€)	Inkomsten GS certificaten (€)	Inkomende cashflows totaal (€)
1	110.986	187.722	65.680	138.095	502.484
2	110.986	187.722	65.680	138.095	502.484
3	110.986	187.722	65.680	138.095	502.484
4	110.986	187.722	65.680	138.095	502.484
5	110.986	187.722	62.432	138.095	499.235
6	110.986	187.722	56.435	138.095	493.239
7	110.986	187.722	50.438	138.095	487.242
8	110.986	187.722	44.442	138.095	481.245
9	110.986	187.722	38.445	138.095	475.248
10	110.986	187.722	32.448	138.095	469.251

Tabel 45: Overzicht jaarlijkse netto cashflows ziekenhuis

Jaar	Netto cashflows (€)
1	201.882
2	201.882
3	201.882
4	201.882
5	198.633
6	192.637
7	186.640
8	180.643
9	174.646
10	168.649

9.4.4.2 Jaarlijkse afschrijvingen (\widehat{A}_t)

Indien we ervan uitgaan dat het ziekenhuis onderworpen is aan de vennootschapsbelasting en dat het winst maakt, zorgen de afschrijvingen ervoor dat een gunstig belastingschild gecreëerd wordt. Doordat de afschrijvingen op de warmtekrachtinstallatie geboekt worden als kosten, leidt dit tot minder winst. Het jaarlijkse gecreëerde voordeel is gelijk aan het jaarlijkse afschrijvingbedrag vermenigvuldigd met de vennootschapsbelasting.

Om de jaarlijkse afschrijvingsbedragen te kunnen bepalen, moeten we eerst de afschrijvingstermijn en afschrijvingsmethode bepalen van de installaties van het nieuwe energiesysteem. Een zo kort mogelijke afschrijvingstermijn is het meest gunstig, aangezien het belastingschild van de afschrijvingen dan groter wordt, waardoor de netto contante waarde van het project toeneemt. Wij gaan uit van een afschrijvingstermijn van 10 jaar voor de WKK-installatie en de rookgasreiniger, aangezien dit de geschatte levensduur van de apparatuur is en de fiscus dit als gangbare termijn aanvaardt.

Wat betreft de afschrijvingsmethode, gaan we ervan uit dat de fiscus het gebruik van de double declining balance (DDB) methode toelaat. Bij deze degressieve afschrijvingsmethode schrijft men gedurende de eerste jaren het meeste af en geleidelijk minder, wat fiscaal interessant is omdat het belastingvoordeel van de afschrijvingen dan sneller gerealiseerd wordt (Mercken, 2004). Bij deze methode past men het dubbele van het lineaire afschrijvingspercentage toe op de boekwaarde. Doordat de boekwaarde door deze afschrijvingen steeds kleiner wordt, ontstaat inderdaad een degressieve afschrijving. Van zodra het af te schrijven bedrag kleiner is dan het lineaire afschrijvingsbedrag, wordt ofwel overgeschakeld op het lineaire afschrijvingsbedrag ofwel naar de lineaire afschrijvingswaarde van de resterende boekwaarde over het aantal resterende jaren (Mercken, 2004). In deze studie wordt gekozen voor de tweede optie. In onderstaande tabel worden de jaarlijkse afschrijvingen onder de DDB methode weergegeven.

Tabel 46: Overzicht jaarlijkse afschrijvingen onder DDB ziekenhuis

Jaar	Boekwaarde (€)	Afschrijving (€)
1	402.568	80.514
2	322.054	71.568
3	250.486	62.622
4	187.865	53.676
5	134.189	44.730
6	89.459	17.892
7	71.568	17.892
8	53.676	17.892
9	35.784	17.892
10	17.892	17.892

9.4.4.3 Verdiscontering (A_{t-i})

Om de verwachte toekomstige kasstromen te kunnen vergelijken en optellen, is het nodig om deze cashflows op een gemeenschappelijke tijdsbasis te brengen. De verwachte toekomstige kasstromen worden daarom geactualiseerd tegen de kapitaalkost (ook vereist rendement of

discontovoet genoemd) om ze effectief te kunnen vergelijken met kasstromen van nu en om ze te kunnen optellen. De gehanteerde discontovoet wordt in dit geval vastgelegd op 9%, aangezien dit volgens Ochelen en Putzeijs (2008) de standaardwaarde is die als private discontovoet voor bedrijven gehanteerd wordt. In deze 9% zit de marktintrestvoet vervat plus een risicopremie.

Zoals hierboven al werd weergegeven is de formule van de NCW:

$$NCW_t = \sum_{t=1}^n [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * \widehat{A}_t] * A_{t-i} - I_0 + b * c * I'_0$$

In onderstaande tabel zullen we nu het eerste gedeelte van deze formule berekenen, het gedeelte dat verdisconteerd moet worden. In de eerste kolom staat de netto cashflow weergegeven ($O_t - Q_t$). In de tweede kolom wordt de netto cashflow na belastingen weergegeven $(1-b) * (O_t - Q_t)$. In de derde kolom kan vervolgens het belastingschild van de afschrijvingen teruggevonden worden $b * \widehat{A}_t$. In de volgende kolom staat de discontofactor A_{t-i} weergegeven op jaarbasis. In de laatste kolom tenslotte, worden alle verdisconteerde cashflows die het project genereert weergegeven.

Tabel 47: Berekening verdisconteerde netto cashflows na belastingen (ziekenhuis)

Jaar	Netto cashflow voor belastingen ($O_t - Q_t$)	Netto cashflow na belastingen ($(1-b) * (O_t - Q_t)$)	Belastingschild afschrijvingen $b * A_t$	Disconto factor $A(t-i)$	Verdisconteerde netto cashflow na belastingen
1	201.882	133.262	27.367	0,92	147.366
2	201.882	133.262	24.326	0,84	132.639
3	201.882	133.262	21.285	0,77	119.339
4	201.882	133.262	18.244	0,71	107.331
5	198.633	131.118	15.204	0,65	95.099
6	192.637	127.159	6.081	0,60	79.447
7	186.640	123.201	6.081	0,55	70.722
8	180.643	119.242	6.081	0,50	62.896
9	174.646	115.284	6.081	0,46	55.880
10	168.649	111.325	6.081	0,42	49.594
Totaal					920.312

9.4.4.4 **Investeringsbedrag (I_0) en investeringsaftrek ($b * c * I'_0$)**

In het laatste deel van de formule voor de NCW berekening wordt het investeringsbedrag in rekening gebracht. Het totale investeringsbedrag (I_0) bedraagt €584.528. Het bedrag van de

verhoogde investeringsaftrek bedraagt €18.472 en mag hiervan worden afgetrokken. De netto investeringskost van de warmtekrachtinstallatie bedraagt dus €566.056.

9.4.4.5 Netto Contante Waarde (NCW)

Om ten slotte de NCW van het investeringsproject te bepalen, wordt de som van de verdisconteerde kasstromen (€920.312) verminderd met de investeringskost (€566.056). We bekomen dan een netto contante waarde van €354.256. Deze NCW is positief. Het ziekenhuis kan uitgaande van deze gegevens dus op een economisch verantwoorde manier investeren in een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie. In onderstaande tabel worden de jaarlijkse verdisconteerde kasstromen van het investeringsproject opgelijst.

Tabel 48: Samenvatting verdisconteerde netto cashflows en NCW ziekenhuis

Jaar	Verdisconteerde netto cashflow na belastingen (€)
jaar 0	-566.056
jaar 1	147.366
jaar 2	132.639
jaar 3	119.339
jaar 4	107.331
jaar 5	95.099
jaar 6	79.447
jaar 7	70.722
jaar 8	62.896
jaar 9	55.880
jaar 10	49.594
NCW	354.256

9.4.5 Internal Rate of Return (IRR)

De interne opbrengstvoet geeft de discontovoet weer die overeenstemt met een NCW gelijk aan nul (Mercken, 2004). Op deze manier wordt dus aangegeven hoe hoog de discontovoet mag oplopen vooraleer het niet langer economisch verantwoord is om het investeringsproject uit te voeren. Men kan de interne opbrengstvoet dan ook interpreteren als de hoogste interestvoet die de investeerder kan betalen zonder geld te verliezen, indien het project volledig gefinancierd zou worden met behulp van een lening en de inkomende cashflows van het project instaan voor de aflossing van de lening (Mercken, 2004).

De IRR van het investeringsproject werd bepaald met de formule IR in Excel en bedraagt 22,78%. Deze interne opbrengstvoet is ruim groter dan de discontovoet van 9% en ook op deze manier kunnen we dus besluiten dat het project economisch verantwoord is.

9.4.6 Verdisconteerde terugverdientijd (DPB)

De verdisconteerde terugverdientijd is de tijd die nodig is om de initiële investeringskost terug te verdienen door de netto cashflows die het project genereert, waarbij rekening gehouden wordt met de tijds waarde van geld. Er wordt met andere woorden berekend hoeveel tijd er nodig is om de contante waarde van de kasstromen van negatief naar positief te brengen (Mercken, 2004). In onderstaande tabel worden de gecumuleerde verdisconteerde netto cashflows na belastingen weergegeven. We kunnen zien dat na 5 jaar de initiële netto investeringsuitgave van €566.056 reeds volledig is terugverdiend. Interpolatie leert ons dat na 5 jaar en 228 dagen de investering is terugverdiend.

Tabel 49: Verdisconteerde terugverdientijd ziekenhuis

Jaar	Verdisconteerde netto cashflow na belastingen (€)	Gecumuleerde cashflows (€)
jaar 0	-566.056	-566.056
jaar 1	147.366	-418.690
jaar 2	132.639	-286.051
jaar 3	119.339	-166.713
jaar 4	107.331	-59.382
jaar 5	95.099	35.717
jaar 6	79.447	115.164
jaar 7	70.722	185.886
jaar 8	62.896	248.782
jaar 9	55.880	304.662
jaar 10	49.594	354.256

9.5 FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID

Tot hiertoe hebben we nog geen rekening gehouden met onzekerheid. We hebben de berekeningen uitgevoerd alsof de resultaten en gevolgen van het investeringsproject met zekerheid gekend waren. In werkelijkheid is er echter helemaal geen zekerheid omtrent verschillende kasstromen en zijn de waarden die we hebben toegekend enkel "intelligent guesses" van de onzekere parameterwaarden. Denken we bijvoorbeeld maar aan de investeringskosten, de brandstofprijzen, de elektriciteitsprijzen, de waarde van de groenestroom- en warmtekrachtcertificaten, de

levensduur van de machine... In deze vierde fase van het haalbaarheidsonderzoek proberen we rekening te houden met onzekerheid. Dit houdt in dat er moet worden nagedacht over de verschillende resultaten en hun bijhorende waarschijnlijkheden. Rekening houden met onzekerheid kan het best op een systematische manier gebeuren.

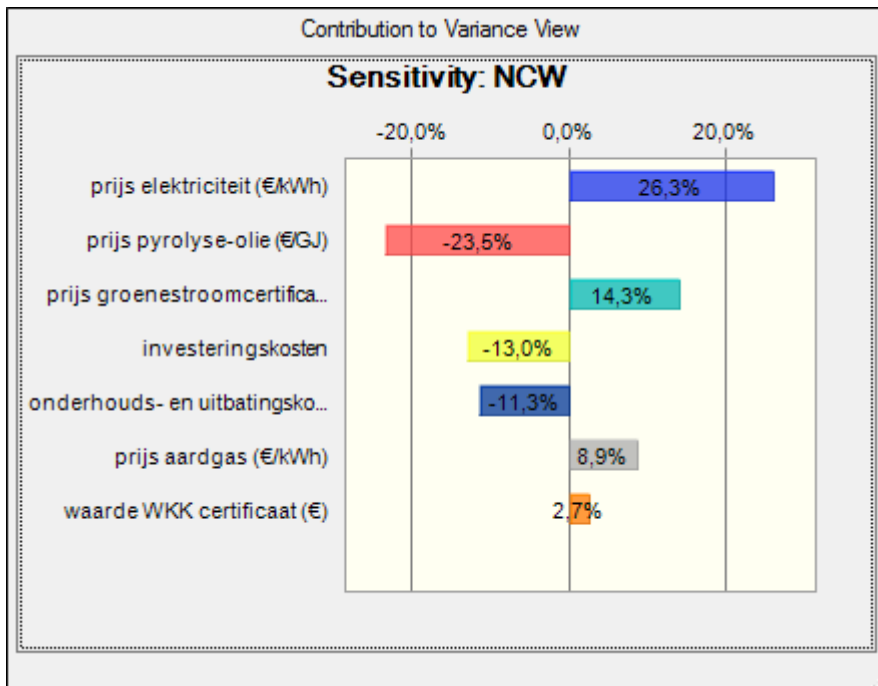
9.5.1 Identificatie onzekere variabelen

We starten met de identificatie van de onzekere variabelen. Enerzijds zijn er heel wat variabelen die per definitie een fluctuerende waarde hebben, denken we bijvoorbeeld maar aan de prijs van de groenestroom- en warmtekrachtcertificaten, die door vraag en aanbod op de certificatenmarkt tot stand komt. Anderzijds zijn er bepaalde variabelen die men tamelijk zeker kan bepalen, maar die een erg grote bijdrage hebben in de totale uitgaven of inkomsten. Een kleine verandering in de parameterwaarde zou in dit geval een grote impact hebben op de netto contante waarde. Op basis van deze criteria (fluctuerend karakter en belang) werden 7 parameters uit het economisch model weerhouden:

- de investeringskost van de warmtekrachtkoppeling;
- de elektriciteitsprijs;
- de aardgasprijs;
- de aankoopprijs van pyrolyse-olie;
- de onderhoudskosten;
- de prijs van de warmtekrachtcertificaten;
- de prijs van de groenestroomcertificaten.

9.5.2 Sensitiviteitsanalyse

Nu we de onzekere parameters geïdentificeerd hebben, starten we met een sensitiviteitsanalyse. De hoofdvraag die we ons hierbij stellen is: wat is het effect op de netto contante waarde door de verandering van één bepaalde parameter? (Mercken, 2004). We kunnen de relatieve sensitiviteit van de NCW voor elke parameter weergeven aan de hand van een Tornado diagram, dat opgesteld kan worden met het software programma Crystal Ball. Om zulk Tornado diagram op te stellen, laten we de onzekere variabelen variëren binnen een bepaald bereik, waarbij de minimum- en maximumwaarde respectievelijk 10% minder en 10% meer bedragen dan de meest waarschijnlijke waarde die in de economische analyse werd gehanteerd. Door elke parameter 10% te laten variëren, hebben we geen last van schaalverschillen tussen de parameters. In het Tornado diagram wordt dan weergegeven hoeveel invloed de wijziging van één parameter heeft op de NCW (al het overige gelijkblijvend) en dat kan dan vergeleken worden met het effect op de NCW met een vergelijkbare verandering in een andere parameter.



Figuur 49: Resultaten sensitiviteitsanalyse Tornado diagram (ziekenhuis)

Met behulp van bovenstaand Tornado diagram krijgen we inzicht in de gevoeligheid van de netto contante waarde voor de verschillende parameters. Aangezien de relatieve afwijking voor elke parameter hetzelfde is (plus en min 10%), geeft de breedte van de balkjes de mate van invloed aan op de gevoeligheid van de netto contante waarde. De variabelen worden gerangschikt op het effect dat ze teweegbrengen.

De diagramstaven die rechts van de y-as uitwijken, zijn variabelen met een positief effect op de netto contante waarde. De diagramstaven die aan de linkerkant van de y-as uitwijken hebben een negatief effect op de netto contante waarde.

Uit bovenstaand Tornado diagram kunnen we afleiden dat de elektriciteitsprijs de meest invloedrijke parameter is, die 26,3% van de variatie in NCW bepaalt. Het teken is positief. Wanneer de elektriciteitsprijs stijgt, wordt het immers economisch interessanter om te investeren in een warmtekrachtkoppeling, zodat er minder (dure) elektriciteit van het net moet worden aangekocht. Ook de prijs van de pyrolyse-olie heeft een grote invloed op de variatie in de NCW, maar deze invloed is negatief. Hoe hoger de prijs die betaald moet worden voor de pyrolyse-olie om de warmtekrachtkoppeling te doen werken, hoe lager de netto contante waarde van het investeringsproject. De prijs van de groenestroomcertificaten blijkt in deze gevalstudie de derde belangrijkste bijdrage te leveren aan de gevoeligheid van de NCW. Hoe hoger de prijs die men krijgt voor een groenestroomcertificaat, hoe hoger de NCW. De kostprijs van de

warmtekrachtinstallatie heeft een belangrijke negatieve bijdrage van 13,0%: hoe hoger de kostprijs, hoe lager de netto contante waarde. Ook de onderhoudskosten hebben een negatieve invloed op het resultaat: hoe hoger de onderhoudskosten, hoe lager de netto contante waarde. De aardgasprijs heeft een positieve invloed op de variatie in NCW en wel om dezelfde reden als de elektriciteitsprijs. Als de aardgasprijs stijgt, wordt het immers economisch interessanter om te investeren in een WKK, zodat er minder aardgas (aan dure prijzen) moet worden aangekocht. De prijs van de warmtekrachtcertificaten heeft een kleine, positieve invloed op de NCW. Hoe hoger de prijs is die men ontvangt, hoe interessanter het is om in een WKK te investeren.

Het doel van dit Tornado diagram is om de relatieve sensitiviteit van de NCW voor elke parameter in het project weer te geven. Op zulke manier kunnen we onze aandacht toespitsen op de kritische onzekerheden van het project en verliezen we geen tijd met het analyseren van variabelen die maar een relatief kleine impact hebben. In een volgende stap wordt voor de belangrijkste variabelen een Monte Carlo analyse uitgevoerd.

9.5.3 Monte Carlo analyse

Naast de sensitiviteitsanalyse, waarbij de invloed van individuele parameters wordt nagegaan, is het ook van belang om oog te hebben voor simultane veranderingen van de parameterwaarden. We trachten in deze fase te begrijpen wat het effect is van gelijktijdige verandering van een reeks parameters op de NCW.

Om de onzekerheid in afzonderlijke parameters te vertalen naar de onzekerheid in het projectresultaat, zou men bijvoorbeeld elke parameter haar meest negatieve waarde kunnen toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt en daarna elke parameter haar meest positieve waarde toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt. Deze methode geeft echter een veel te groot en onrealistisch onzekerheidsgebied voor de NCW, aangezien het wel heel onwaarschijnlijk is dat alle parameters gelijktijdig hun meest extreme waarde aannemen. Een algemeen erkende werkwijze om de onzekerheden van de parameters op een realistische manier te vertalen naar de onzekerheid in projectuitkomst, is de zogenaamde Monte Carlo methode.

Een Monte Carlo simulatie kan worden toegepast indien een systeem elementen bevat die beïnvloed worden door het toeval. Voor het investeringsproject in de warmtekrachtkoppeling geldt dat quasi alle parameters probabilistisch zijn van aard. Het uiteindelijk resultaat wordt bepaald door een voorlopig onbekende combinatie van de parameterwaarden (Mercken, 2004).

Bij een Monte Carlo simulatie worden verschillende experimenten uitgevoerd, waarbij telkens een scenario wordt samengesteld op basis van toevallig gekozen waarden voor de verschillende parameters. Voor elk scenario wordt dan de NCW berekend. Door dit experiment veelvuldig uit te voeren, verkrijgt men uiteindelijk een kansverdeling van de NCW.

Een Monte Carlo simulatie bestaat uit 5 grote stappen (Mercken, 2004):

- Identificatie van de sleutelparameters waarvan de waarde onzeker is en die een door het toeval bepaalde waarde zullen aannemen;
- Bepaling van de kansverdeling voor deze parameters;
- Toevallige keuze van een parameterwaarde voor elke parameter aan de hand van een toevalsgetallengenerator;
- Berekening van de NCW van het toevallig samengestelde scenario;
- Verzameling van experimentele gegevens en verwerking ervan tot kansverdeling van de NCW.

9.5.3.1 *Identificatie sleutelvariabelen*

Wat betreft de identificatie van de sleutelparameters, wordt ervoor gekozen om alle parameters die werden gebruikt in de sensitiviteitsanalyse ook in de monte Carlo simulatie te weerhouden. Het betreft dus:

- de investeringskost van de warmtekrachtkoppeling;
- de elektriciteitsprijs;
- de aardgasprijs;
- de aankoopprijs van pyrolyse-olie;
- de onderhoudskosten;
- de prijs van de warmtekrachtcertificaten;
- de prijs van de groenestroomcertificaten.

9.5.3.2 *Bepaling kansverdeling parameters*

De kansverdelingen voor bovenstaande parameters zijn niet exact gekend. Een eenvoudige, pragmatische oplossing is dan om te werken met drie ramingen (meest waarschijnlijke waarde, minimumwaarde en maximumwaarde) en hier een driehoeksverdeling op toe te passen. De meest waarschijnlijke waarde heeft hierbij een hogere kans om voor te komen dan de meest extreme waarden. In dit onderzoek wordt voor elke onzekere parameter gewerkt met een driehoeksverdeling.

In de hierboven besproken sensitiviteitsanalyse werden alle factoren verondersteld te veranderen binnen -10% en +10% van de meest verwachte waarde, om op die manier de bijdragen aan de sensitiviteit van de NCW van alle variabelen te kunnen evalueren op gemeenschappelijke basis. In de Monte Carlo analyse nemen we als minimumwaarde en maximumwaarde niet gewoon 10% meer en 10% minder dan de meest verwachte waarde, aangezien we verwachten dat deze parameters anders variëren. In onderstaande tabel wordt voor elk van de onzekere parameters de meest verwachte waarde, de minimumwaarde en de maximumwaarde aangegeven.

Tabel 50: Onzekere parameters en hun verdeling

Parameter	Minimumwaarde	Meest verwachte waarde	Maximumwaarde
Investeringskost (€)	409.170	584.528	759.886
Elektriciteitsprijs (€/kWh)	0,0825816	0,0917573	0,1009330
Aardgasprijs (€/kWh)	0,0333104	0,0370116	0,0407128
Aankoopprijs pyrolyse-olie (€/GJ)	7,2	9	10,8
Onderhoudskosten (€)	111.276	123.637	136.001
Prijs WKC (€/MWh)	27	27	41,48
Prijs GSC (€/MWh)	90	90	107,77

In de kolom "Meest verwachte waarde" zijn telkens de waarden terug te vinden die ook in het basisscenario gehanteerd werden (zie ook fase 3 economische analyse). Wat betreft de investeringskosten, hanteren we een marge van 30% voor de minimumwaarde en maximumwaarde, aangezien Peters, Timmerhaus en West (2004) ervan uitgaan dat de verwachte nauwkeurigheid van de geschatte investeringskosten voor chemische procesinstallaties 20 à 30% bedraagt. De elektriciteitsprijs en aardgasprijs en onderhoudskosten laten we variëren met plus en min 10%. De prijs van de pyrolyse-olie laten we variëren met plus en min 20%, omdat het gebruik van pyrolyse-olie als brandstof nog in zijn kinderschoenen staat en de prijs veel minder zeker is. Wat betreft de prijs van warmtekracht- en groenestroomcertificaten, hanteren we als minimumwaarde en meest verwachte waarde de minimumsteun en als maximumwaarde de hoogste waarde die al betaald is voor de certificaten op de markt. Het lijkt misschien vreemd om als meest verwachte waarde de minimumsteun te hanteren, maar dit wordt door de VREG aanbevolen, aangezien enkel deze minimumsteun gegarandeerd is.

9.5.3.3 Toevallige keuze parameterwaarden

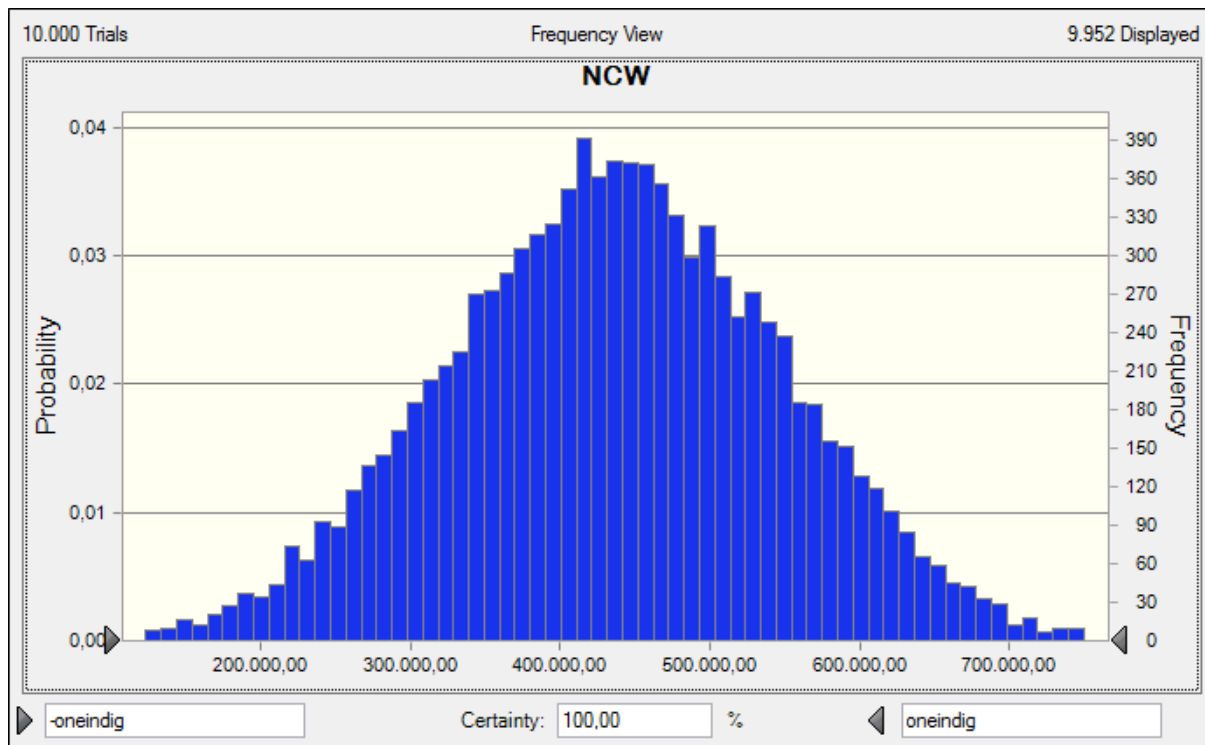
In de Monte Carlo analyse werd ingesteld dat 10.000 trials gedaan moeten worden. Bij elke trial trekt het model een willekeurige waarde uit elke verdeling van de onzekere parameters, waarbij de driehoeksverdeling de kans bepaalt dat een bepaalde waarde getrokken wordt.

9.5.3.4 Berekenen NCW van het toevallig samengesteld scenario

In deze stap wordt de NCW berekend van het toevallig samengesteld scenario (willekeurige parametercombinatie).

9.5.3.5 Opstellen kansverdeling NCW

Nadat 10.000 trials zijn gedaan en dus 10.000 keer de NCW waarde is berekend van een willekeurig samengestelde parametercombinatie, kunnen deze netto contante waarden grafisch voorgesteld worden. In onderstaande figuur wordt de kansverdeling van de NCW die bekomen werd na 10.000 trials weergegeven.



Figuur 50: Kansverdeling NCW

De NCW ligt tussen een minimum van €73.097 en een maximum van €818.108. Het gemiddelde bedraagt €436.284 en de mediaan €436.690. De gevonden waarde uit het basisscenario van €354.256 ligt dus eerder aan de lage kant.

Ongeveer 95% van de waarden ligt binnen 2 standaarddeviaties van het gemiddelde ($\mu - 2\sigma$; $\mu + 2\sigma$). De standaarddeviatie bedraagt in dit geval €111.945. In 95% van de gevallen zal de NCW dus liggen tussen €212.394 en €660.174.

9.5.4 Belang van certificaten voor de NCW

Een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie kan in Vlaanderen genieten van twee soorten uitbatingssubsidies, namelijk van groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten. Deze certificaten vormen extra inkomsten voor de investeerder en hebben een aanzienlijke bijdrage aan de NCW van het investeringsproject. In deze fase van het onderzoek wordt nagegaan hoe de NCW zou veranderen indien de certificaten zouden wegvallen.

In onderstaande tabel worden de 2 uitbatingssubsidies weergegeven. Indien de groenestroomcertificaten wegvallen, wordt de netto contante waarde van het investeringsproject meteen negatief en is de investering dus ook niet meer rendabel. Indien de kleinere subsidie van de warmtekrachtcertificaten wegvalt, maar het systeem van groenestroomcertificaten blijft bestaan, is de investering nog wel rendabel. Hieruit kunnen we afleiden dat de certificaten belangrijk zijn voor de rendabiliteit van het investeringsproject in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie.

Tabel 51: Belang groenestroom- en warmtekrachtcertificaten (ziekenhuis)

Warmtekrachtcertificaat (€/MWh)	Groenestroomcertificaat (€/MWh)	NCW (€)
27	90	354.256
27	0	-230.757
0	90	111.131
0	0	-473.881

9.5.5 Maximumprijs pyrolyse-olie

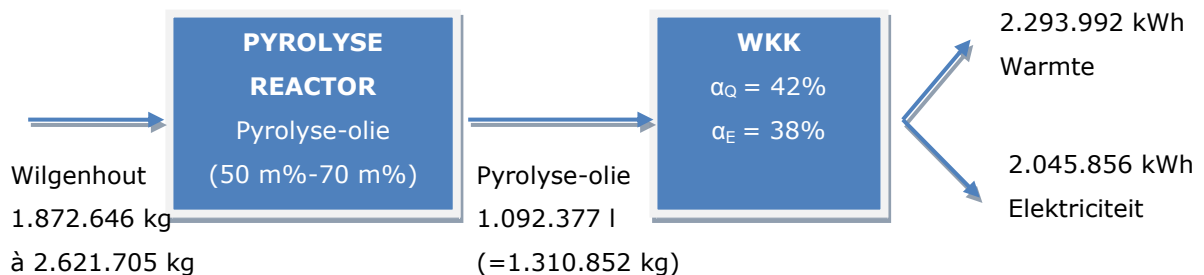
De prijs van de pyrolyse-olie werd in de economische analyse vastgelegd op €9 per GJ. Het gebruik van pyrolyse-olie als brandstof staat echter nog in zijn kinderschoenen, waardoor we niet zeker zijn hoeveel de marktprijs precies zal bedragen. In deze paragraaf gaan we daarom na wat de maximumprijs is die de eigenaar van de WKK maximaal kan betalen. Hiervoor beantwoorden we de vraag: hoe hoog mag de maximumprijs van de pyrolyse-olie bedragen opdat de NCW positief blijft? We kunnen het antwoord op deze vraag vinden door de ingebouwde functionaliteit "doelzoeken" te gebruiken in het Excel bestand. Deze functionaliteit laat toe om voor een specifiek berekende cel (in dit geval de berekende NCW van het investeringsproject) uit te rekenen wat de waarde moet zijn van een andere cel (in dit geval de prijs van de pyrolyse-olie) om de specifiek berekende cel (NCW) een gegeven doelwaarde te laten aannemen (in dit geval 0). De maximale prijs die betaald kan worden voor de pyrolyse-olie bedraagt in deze gevalstudie €13,25 per GJ. Dit komt overeen met €0,0477 per kWh, aangezien 1 kWh overeenkomt met 0,0036GJ. Uitgaande van een onderste verbrandingswaarde van 18MJ/l (Ringer, 2006), kan de prijs van pyrolyse-olie ook in euro per liter uitgedrukt worden. De maximumprijs bedraagt dan €0,2386 per liter.

9.6 TERUGKOPPELING NAAR FYTOREMEDIATIEPROJECT

Nadat we voor deze gevalstudie de optimale warmtekrachtinstallatie hebben geïdentificeerd en tot de conclusie zijn gekomen dat een investeringsproject in zulke installatie onder bepaalde voorwaarden haalbaar blijkt, keren we nu even terug naar het begin van het verhaal. In deze

laatste paragraaf wordt nagegaan hoeveel hout uit het fyto-remediatieproject nodig is opdat het ziekenhuis de warmtekrachtinstallatie heel het jaar door kan doen draaien op pyrolyse-olie uit het korteomloophout.

De warmtekrachtinstallatie verbruikt jaarlijks zo'n 1.092.377 liter pyrolyse-olie. Hoeveel korteomloophout uit het fyto-remediatieproject is hiervoor nodig? In eerste instantie wordt de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie omgezet van liter in kg, uitgaande van een dichtheid van 1,2 kg/l (T. Bridgwater, 2007). De WKK-installatie verbruikt op jaarbasis dan zo'n 1.310.852 kg pyrolyse-olie (1.092.377 l * 1,2 kg/l). Nu het gewicht van de pyrolyse-olie gekend is, kan ook bepaald worden hoeveel hout nodig is om dit gewicht aan pyrolyse-olie te bekomen. Volgens Bridgwater (2003) levert snelle pyrolyse van wilgen zo'n 70% pyrolyse-olie op, vertrekkende van droge biomassa. Uit onderzoek (Stals, Carleer, et al., 2010) blijkt dat de opbrengst aan pyrolyse-olie van korteomloophout uit de Kempen, gecontamineerd met zware metalen geen 70 m% bedraagt maar eerder 50 m%. In dit onderzoek wordt daarom een opbrengstenrange van 50 m% - 70 m% gehanteerd. Gegeven deze range zal de benodigde hoeveelheid korteomloophout ook liggen tussen de 1.872.646 kg (1.310.852 kg / 0,70) en de 2.621.705 kg (1.310.852 kg / 0,50). Om een duidelijker inzicht te krijgen in bovenstaande cijfergegevens, worden ze in onderstaande figuur schematisch weergegeven.



Figuur 51: Overzicht inputgegevens voor pyrolyse en WKK (ziekenhuis)

Nu bepaald is hoeveel ton korteomloophout vereist is, kan ook berekend worden hoeveel hectare grond in het fyto-remediatieproject nodig is om deze hoeveelheid hout te produceren. Garcia (2003) geeft aan dat wilg doorgaans een opbrengst oplevert van 10,8 ton droge stof per hectare per jaar. Uit experimenten op het proefterrein in Lommel blijkt echter dat de biomassaopbrengst voor korteomloophout op zanderige, met zware metalen gecontamineerde bodems slechts 8 ton droge stof per hectare bedraagt (Vangronsveld, et al., 2009). Uitgaande van een opbrengst van 8 ton droge stof per hectare, is een oppervlakte van 234 hectare (1.872.646 kg / 8000 kg/ha) tot 328 hectare (2.621.705 kg / 8000 kg/ha) grond in het fyto-remediatieproject vereist.

HOOFDSTUK 10: GEVALSTUDIE WOON- EN ZORGCENTRUM

10.1 BESCHRIJVING GEVALSTUDIE

Het woon- en zorgcentrum Hoevezavel is gelegen aan de rand van de stadskern van Lommel in de groene wijk Heeserbergen, meerbepaald aan de Jan Davidlaan 11. Vlakbij ligt het winkelcentrum "De teuten", de kerk en de lagere school van Heeserbergen en de serviceflats "residentie Kopshoeven". Het bejaardencentrum opende haar deuren op 25 oktober 1984.

Het woon- en zorgcentrum beschikt over 170 woonegelegenheden. Hiervan zijn 97 woonegelegenheden erkend als rust- en verzorgingstehuis (RVT), bedoeld voor het opvangen van zwaar zorgbehoevende ouderen die hier van een intensieve verzorging kunnen genieten. 70 Woonegelegenheden zijn erkend als rustoord voor bejaarden (ROB), waar licht tot matig zorgbehoevende ouderen verblijven. 3 woonegelegenheden zijn bestemd voor kortverblijf. Hier kunnen ouderen die normaal gezien opgevangen worden door familie, voor enkele dagen tot enkele weken verblijven, bijvoorbeeld omwille van ziekte van een thuisverzorger of om de familie toe te laten op vakantie te gaan.

Het woon- en zorgcentrum is onderverdeeld in 5 blokken, verbonden met overdekte straten/gangen. In blok A bevinden zich grotendeels ROB-woonegelegenheden en in mindere mate RVT-woonegelegenheden. In blok B lag vroeger het administratief centrum, maar tegenwoordig zijn er leslokalen gehuisvest. In blok C bevinden zich RVT-woonegelegenheden en op het gelijkvloers wordt de administratie gedaan. Blok D is de dienstenblok met onder andere de keuken, de wasserij, de stookplaats, het atelier en de kleedkamers. In blok E is een cafetaria/feestzaal/dienstencentrum gevestigd, het betreft één lokaal met een multifunctionele invulling.

10.2 FASE 1: ANALYSE VAN DE ENERGIEVRAAG

Ook in deze laatste gevalstudie is het uitgangspunt van de haalbaarheidsstudie de analyse van de energievraag, om op deze manier te komen tot een goede dimensionering. Van de verschillende methoden die bruikbaar zijn om de energievraag te bepalen (metingen, factuuranalyse, kengetallen of ervaringscijfers), zijn sommige methoden nauwkeuriger als anderen. In deze laatste gevalstudie is wat betreft de warmtevraag het minst nauwkeurige informatie beschikbaar van de drie gevalstudies.

10.2.1 Warmtevraag

Momenteel maakt het woon- en zorgcentrum gebruik van twee gasoil gestookte ketels om hun warmte op te wekken. De primaire centrale verwarming bestaat uit twee gasoil gestookte ketels die zorgt voor distributie van warm water naar 4 onderstations in een 110/90 stookregime. In deze onderstations wordt de distributie van het CV-water via collectoren naar de diverse afdelingen voorzien in een 90/70 stookregime. De verdeling van het CV-water na de collectoren wordt het secundaire CV-water genoemd. Quasi alle lokalen en kamers hebben als hoofd- of basisverwarming radiatoren, uitgerust met thermostatische radiotorkranen. Er zijn enkele uitzonderingen, zoals de keuken, de wasserij, het cafetaria en de kiné, waar ook warme lucht verwarming wordt toegepast.

Wat betreft het sanitair warm water, staan er in de onderstations (blok A, C en D) warmtewisselaars die volgens het tegenstroomprincipe het sanitaire warmwater produceren. Deze warmtewisselaars worden primair gevoed met CV-water.

Het gasoilverbruik bedraagt op jaarbasis zo'n 271.503 liter. Het volstaat echter niet om de grootte van de warmtevraag te kennen. De warmtevraag is immers afhankelijk van de tijd en van de buitentemperatuur. Het verloop van de energievraag moet dan liefst ook zo nauwkeurig mogelijk per tijdseenheid in kaart worden gebracht. Helaas zijn er geen meetgegevens of facturen beschikbaar die het verloop van de energievraag in de tijd weergeven. Enkel het jaarlijkse verbruiksgegeven (257.503 liter gasoil) is beschikbaar.

Gasoil, ook gasolie of mazout of stookolie genoemd, wordt in België courant toegepast in verwarmingsinstallaties. Om vanuit het verbruik van mazout de warmtevraag te berekenen, moeten we het verwarmingsvermogen van de brandstof kennen. Net zoals bij aardgas sprake is van een bovenste en een onderste verbrandingswaarde, is er bij stookolie sprake van een bovenwaarde, ook wel bruto verbrandingswaarde genoemd en van een onderwaarde, ook wel netto stookwaarde genoemd. Mazout bevat immers net zoals aardgas een bepaalde hoeveelheid waterstof, die bij verbranding reageert met zuurstof uit de lucht en waterdamp vormt. Deze vorming van waterdamp vergt echter energie, ook wel latente verdampingswarmte genoemd. De energie wordt gehaald uit de verbranding van de brandstof en gaat verloren met de verbrandingsgassen die langs de schoorsteen afgevoerd worden, tenzij men de waterdamp laat condenseren en de aanwezige warmte probeert terug te winnen (bijvoorbeeld in een condensatieketel) (Informazout, 2011). De netto stookwaarde van stookolie bedraagt 9,9 kWh per liter (Daoud & Lebbe, 2009). Het jaarlijks verbruik aan stookolie bedraagt dus 257.503 liter of 2.549.280 kWh ($257.503 \text{ l} * 9,9 \text{ kWh/l}$).

Om tot slot over te gaan van het verbruik van stookolie naar de effectieve warmtebehoefte van het woon- en zorgcentrum Hoevezavel, dient het rendement van de ketels nog in rekening te worden gebracht. Uitgaande van een rendement van 80%, bekomen we een jaarlijkse warmtebehoefte van

2.039.424 kWh (2.549.280 kWh * 0,80). In onderstaande tabel worden alle gegevens weergegeven om de jaarlijkse warmtebehoefte van het woon- en zorgcentrum te berekenen.

Tabel 52: Berekening jaarlijkse warmtebehoefte woon- en zorgcentrum

Jaarlijks verbruik stookolie (l)	257.503
Netto stookwaarde (kWh/l)	9,9
Jaarlijks verbruik stookolie (kWh)	2.549.280
Rendement ketels (%)	80
Jaarlijkse warmtebehoefte (kWh)	2.039.424

10.2.2 Elektriciteitsvraag

Wat betreft de elektriciteitsvraag van het woon- en zorgcentrum Hoevezavel, beschikken we wel over maandelijkse facturen van het jaar 2010. In onderstaande tabel kan per maand de benodigde hoeveelheid elektriciteit worden afgelezen. Tijdens de piek- en daluren werd in totaal respectievelijk 425.988 kWh en 287.994 kWh elektriciteit verbruikt. Het totale elektriciteitsverbruik in 2010 bedroeg 713.982 kWh.

Tabel 53: Overzicht maandelijkse elektriciteitsbehoefte woon- en zorgcentrum

Periode	Normale uren (kWh)	Stille uren (kWh)	Totaal (kWh)
Januari	33.718	26.555	60.273
Februari	33.885	22.051	55.936
Maart	38.625	22.454	61.079
April	34.554	22.799	57.353
Mei	31.246	27.424	58.670
Juni	38.022	23.403	61.425
Juli	37.519	28.964	66.483
Augustus	35.426	23.725	59.151
September	36.097	21.238	57.335
Oktober	34.228	23.630	57.858
November	33.000	23.716	56.716
December	39.668	22.035	61.703
Totaal	425.988	287.994	713.982

Enkele grote verbruiksposten van elektrische energie zijn de toestellen in de keuken (afwastoestellen en kooktoestellen), de machines in de wasserij, de koeling, de verlichting en de pompen van de centrale verwarming en sanitaire installatie.

10.3 FASE 2: BEPALEN VAN DE TECHNISCH MOGELIJKE INSTALLATIES

Na het in kaart brengen van de energievraag, kan in de volgende fase overgegaan worden tot de technische dimensionering. Aan de hand van de verzamelde gegevens over de energievraag wordt nu getracht een jaarbelastingduurcurve op te stellen, waar de 8760 uurlijkse waarden van de energievraag gerangschikt worden volgens grootte. Met behulp van zulke jaarbelastingduurcurve kan dan het vermogen en het aantal draaiuren bepaald worden van een optimale installatie, die een maximale hoeveelheid aan warmte of elektriciteit produceert.

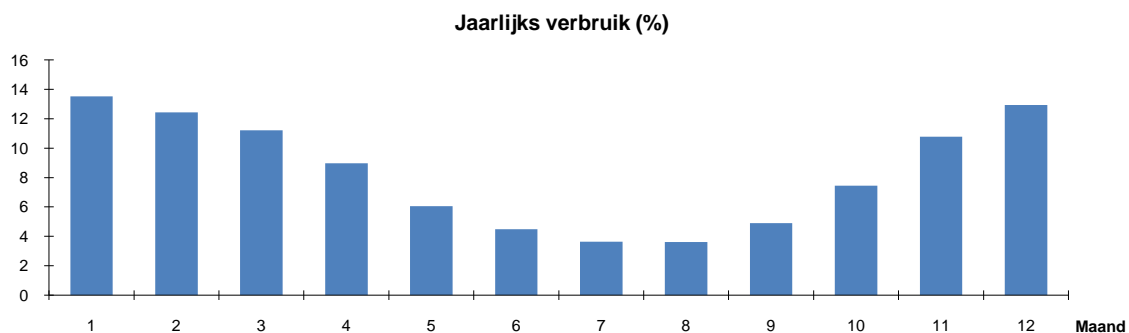
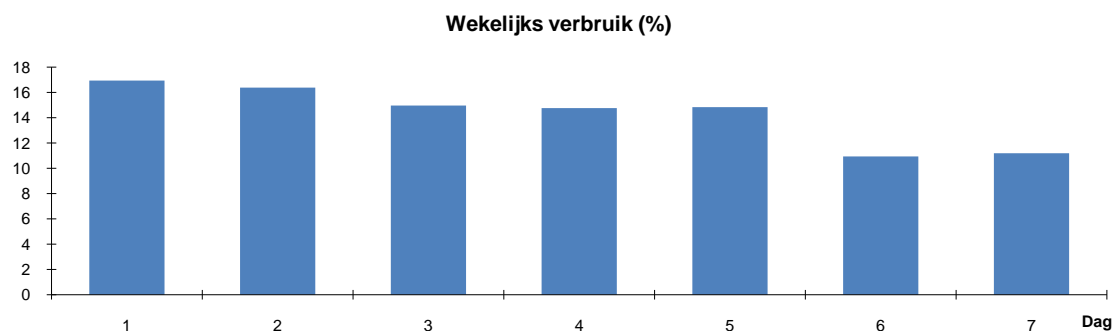
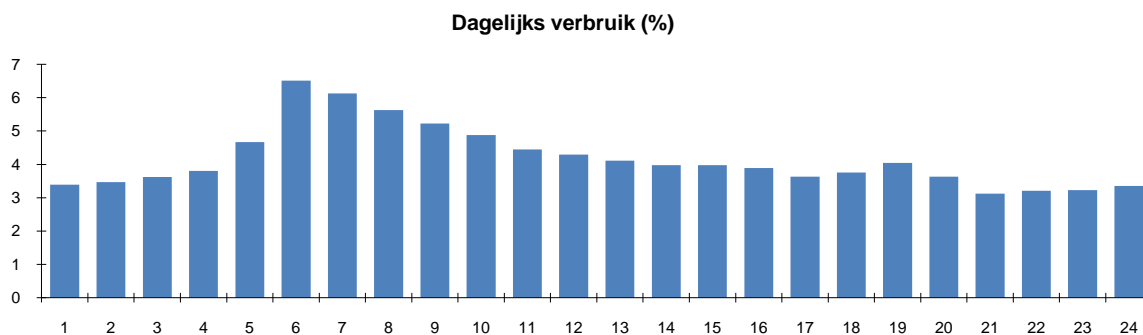
10.3.1 Jaarbelastingduurcurve warmte

Een warmtekrachtinstallatie wordt bij voorkeur gedimensioneerd op de warmtevraag (Cogen Vlaanderen, 2006), aangezien de warmte moeilijk te stockeren of te transporteren is. De WKK kan dus best gedimensioneerd worden op de warmtebehoefte van de gebruiker, waarbij alle warmte nuttig kan worden aangewend.

In deze gevalstudie beschikken we niet over maandelijks facturen, enkel over een jaarlijkse warmtebehoefte van het woon- en zorgcentrum. Er is dus geen indicatie van de spreiding van de energievraag in de tijd. Om toch een analyse te kunnen maken, zullen we noodgedwongen uitgegaan van verschillende assumpties, zodat we toch een idee kunnen krijgen van de situatie. Door uit te gaan van assumpties, is het resultaat natuurlijk een stuk minder nauwkeurig. Indien een definitieve concrete haalbaarheidsstudie vereist is, zijn gedetailleerdere gegevens van de energievraag noodzakelijk.

Bij de andere gevalstudies vertrokken we van de warmtebehoefte (in kWh) per periode. Het verloop van de warmtebehoefte in de tijd is immers essentieel voor de dimensionering van een warmtekrachtinstallatie. Om het verloop van de warmtebehoefte te bepalen, wordt in dit geval gebruik gemaakt van gegevens uit het programma COGENcalc, een softwareprogramma van Leefmilieu Brussel – Brussels Instituut voor Milieubeheer (BIM), bedoeld om prehaalbaarheidstesten voor WKK-installaties uit te voeren (Leefmilieu Brussel, 2007).

In dit programma kan een standaard verbruiksprofiel teruggevonden worden voor een verzorgingsinstelling met een continu warmteverbruik (7 dagen op 7). Er worden drie verbruiksprofielen weergegeven: de eerste grafiek toont hoe het warmteverbruik gespreid is per dag, de tweede per week en de derde per jaar. Op de horizontale as staat telkens de tijdseenheid uitgezet en op de verticale as wordt de warmtebehoefte per tijdseenheid weergegeven, uitgedrukt in procenten.



Figuur 52: Verbruiksprofielen zorgsector (COGENcalc)

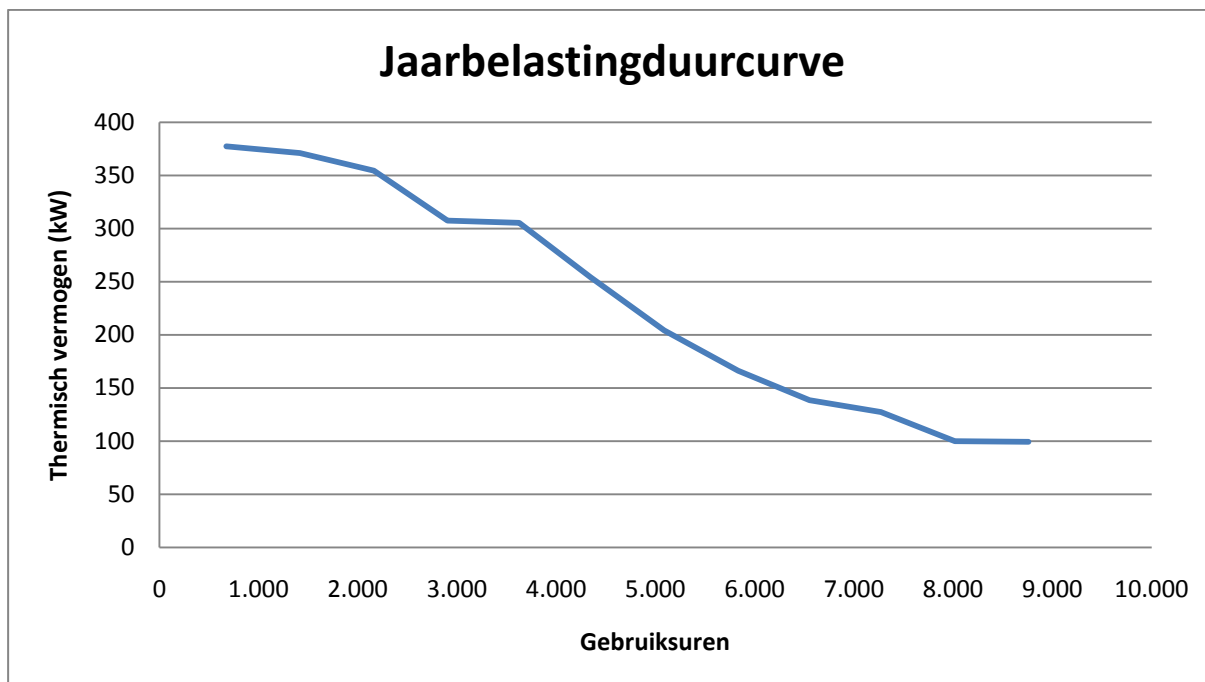
Hoewel we geen werkelijke, maandelijkse factuurgegevens ter beschikking hebben, kunnen we nu toch de spreidingsgegevens simuleren aan de hand van het programma COGENcalc. Vooral de laatste grafiek in bovenstaande figuur is van belang. Een inschatting van de maandelijkse warmtebehoefte kan bekomen worden door de maandelijkse percentages te vermenigvuldigen met de totale warmtebehoefte (2.039.424 kWh). In onderstaande tabel wordt de verwachte maandelijkse warmtebehoefte weergegeven.

Tabel 54: Spreiding warmtebehoefte in de tijd

Periode	Spreidingsgegevens COGENcalc (%)	Warmtebehoefte (kWh)
Januari	13,53%	275.934
Februari	12,43%	253.500
Maart	11,21%	228.619
April	8,97%	182.936
Mei	6,06%	123.589
Juni	4,49%	91.570
Juli	3,64%	74.235
Augustus	3,62%	73.827
September	4,89%	99.728
Oktober	7,45%	151.937
November	10,78%	219.850
December	12,93%	263.697
Totaal	100,00%	2.039.424

Uit bovenstaande tabel kunnen we afleiden dat er in de zomermaanden juli en augustus een warmtevraag is van circa 74.000 kWh. Aangezien ruimteverwarming in de zomermaanden niet nodig is, wordt verondersteld dat deze warmtebehoefte enkel de vraag naar sanitair warm water omvat.

Nu de warmtebehoefte (in kWh) van het woon- en zorgcentrum per periode berekend is, kan verder worden gegaan met het opstellen van de jaarbelastingduurcurve. Om over te gaan naar het benodigd vermogen (in kW) per periode, worden de verbruiksgegevens gedeeld door het aantal uren dat die periode telt. Om vervolgens de jaarbelastingduurcurve op te stellen, moeten de benodigde vermogens nog gerangschikt worden in de tijd, te beginnen met de grootste waarde. In bijlage 8 zijn de cijfergegevens en berekeningen van de jaarbelastingduurcurve terug te vinden. De jaarbelastingduurcurve zelf wordt in onderstaande figuur weergegeven.



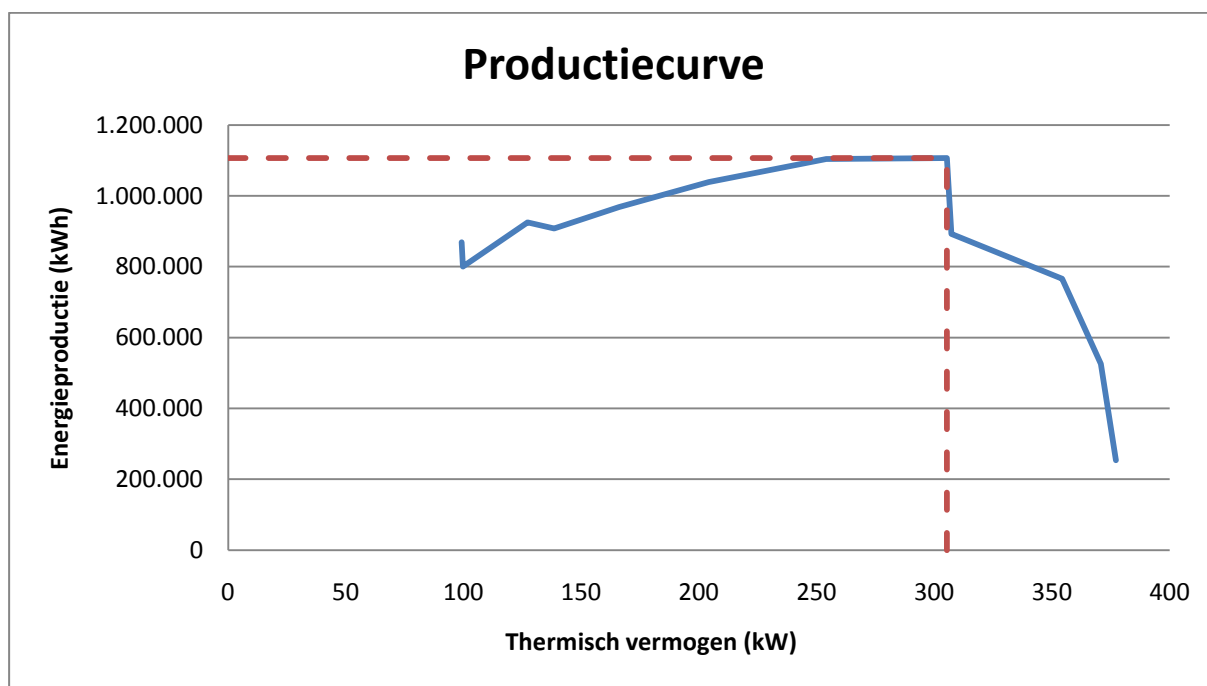
Figuur 53: Thermische jaarbelastingduurcurve woon- en zorgcentrum

Op de grafiek staat op de horizontale as het aantal uren (gaande tot 8760 uren, wat overeenkomt met een jaar), met per uur het benodigde vermogen in kW op de verticale as. De uren staan gesorteerd van een hoog benodigd vermogen naar een laag benodigd vermogen. Het oppervlak dat door de grafiek en de assen wordt ingesloten, geeft de totale jaarlijkse warmtevraag van het woon- en zorgcentrum weer, in dit geval dus 2.039.424 kWh. Van de jaarbelastingduurcurve kan ook afgelezen worden hoeveel uur een bepaald thermisch vermogen nodig is. Er is bijvoorbeeld gedurende ongeveer 5000 uur op een jaar een thermisch vermogen groter dan 200 kW nodig. Uit de grafiek kan ook afgelezen worden wat het minimale thermische vermogen is dat nodig is in het woon- en zorgcentrum. Gedurende heel het jaar (8760 uur) is een thermisch vermogen van circa 100 kW nodig. Aangezien deze minimum warmtebehoefte gedurende heel het jaar bestaat en aangezien ruimteverwarming in de zomermaanden niet nodig is, kunnen we veronderstellen dat voor de verwarming van sanitair tapwater heel het jaar minimaal 100 kW thermisch vermogen nodig is.

Uitgaande van bovenstaande jaarbelastingduurcurve kunnen we een inschatting maken van het vermogen en het aantal draaiuren van de optimale warmtekrachtinstallatie, door te zoeken naar de installatie die het meeste warmte produceert (energie, gemeten in kWh). Dit komt overeen met het zoeken naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve.

Om te bepalen wat de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve is, kan gebruik worden gemaakt van een productiecurve. Deze curve wordt bekomen door voor elk vermogen op de Y-as

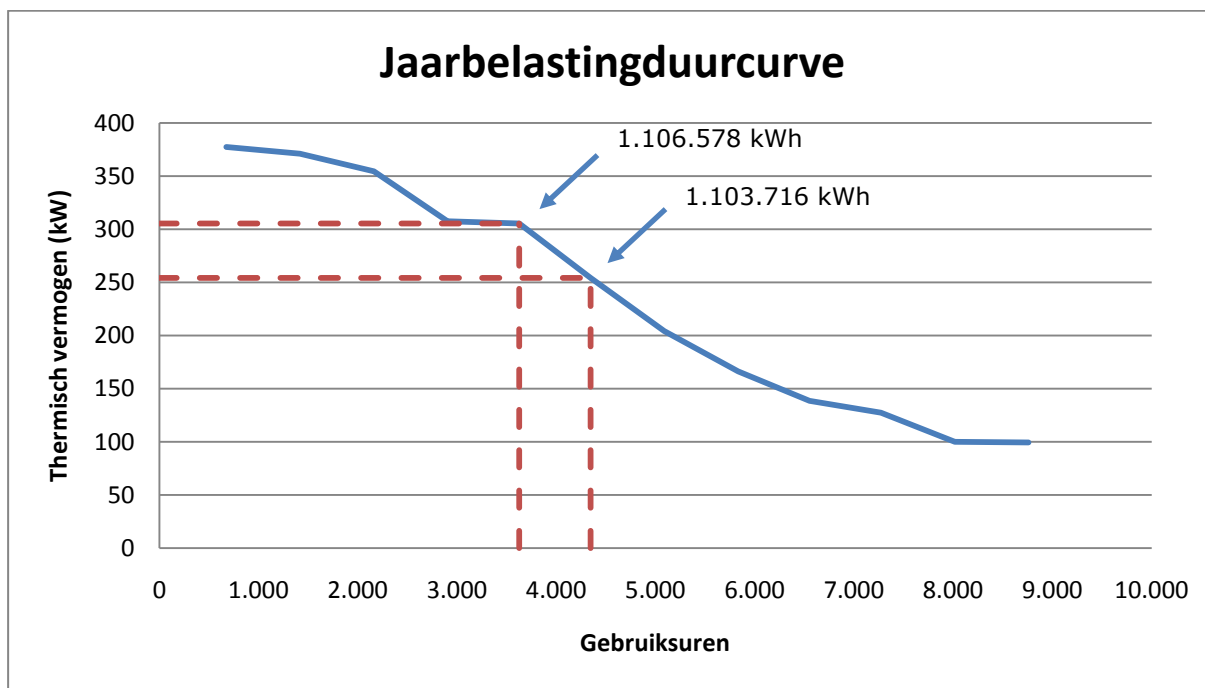
van de jaarbelastingduurcurve, de oppervlakte van de rechthoek onder de curve te berekenen. Deze oppervlakte geeft de geproduceerde hoeveelheid energie (kWh) weer, aangezien het vermogen (kW) vermenigvuldigd wordt met het aantal gebruiksuren (uur). In de productiecurve wordt dan de geproduceerde hoeveelheid energie (in kWh) op de Y-as in functie van het vermogen van het systeem (in kW) op de X-as uitgezet. We gaan hierbij wel uit van de veronderstelling dat het systeem slechts één mogelijk werkingpunt heeft, namelijk vollast. Het maximum van de productiecurve correspondeert dan met de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve (Cogen Vlaanderen, 2006).



Figuur 54: Thermische productiecurve woon- en zorgcentrum

De productiecurve geeft weer hoeveel warmte een warmtekrachtinstallatie met een bepaald vermogen jaarlijks op vollast kan produceren. Uit de figuur blijkt dat een installatie met een thermisch vermogen van 305 kW optimaal is, aangezien hierbij de grootste hoeveelheid warmte geproduceerd kan worden (1.106.578 kWh per jaar). We merken bij deze grafiek op dat bij lagere thermische vermogens nog steeds een grote hoeveelheid warmte geproduceerd kan worden op jaarbasis. De hoeveelheid geproduceerde warmte daalt op de grafiek initieel slechts lichtjes indien we vanuit het maximum naar kleinere thermische vermogens (links) bewegen. Een installatie van 254 kW zal bijvoorbeeld nog steeds 1.103.716 kWh warmte per jaar produceren. Dit is een belangrijke bevinding, aangezien het voor de technische en ook financiële haalbaarheid van belang is dat de warmtekrachtinstallatie zoveel mogelijk draaiuren maakt. Indien we het thermisch vermogen van de installatie verminderen, zal het aantal uren dat de machine in vollast kan werken vermeerderen.

Na het bepalen van het optimale vermogen (305 kW) met behulp van de productiecurve, kunnen we deze optimale hoeveelheid ook aanduiden in de jaarbelastingduurcurve. We zijn er nu zeker van dat bij 305 kW een maximale hoeveelheid warmte geproduceerd wordt van 1.106.587 kWh per jaar.



Figuur 55: Thermische jaarbelastingduurcurve woon- en zorgcentrum met aanduiding optimale installatie

De intersectie van de 'optimale rechthoek' met de verticale as geeft de optimale waarde qua thermisch vermogen van de warmtekrachtfaciliteit, in dit geval 305 kW_{th}. Als de installatie op vollast werkt, zal gedurende 3.624 uren per jaar een thermisch vermogen van 305 kW geleverd worden. Voor de bepaling van de 'optimale rechthoek' werd enkel rekening gehouden met het behalen van een zo groot mogelijke warmteproductie (kWh), er werd geen rekening gehouden met het aantal draaiuren dat hierbij gerealiseerd kan worden. Stroobandt (2007) gaat ervan uit dat 4000 draaiuren op een jaar minimum realiseerbaar moeten zijn. Aangezien we met de huidige berekeningen niet aan deze 4000 draaiuren komen, gaan we na wat de tweede meest optimale rechthoek is op basis van de grootste hoeveelheid geproduceerde energie in de productiecurve.

In bovenstaande jaarbelastingduurcurve wordt daarom het tweede gunstigste punt uit de productiefunctie overgebracht, waarbij dus de tweede grootste hoeveelheid warmte geproduceerd wordt. Het punt met een vermogen van 254 kW en 4.344 gebruiksuren is duidelijk het tweede meest optimale punt. De hoeveelheid geproduceerde warmte bedraagt hier 1.103.716 kWh, dit is ten opzichte van het punt bij de 'grootste rechthoek' een achteruitgang in geproduceerde energie

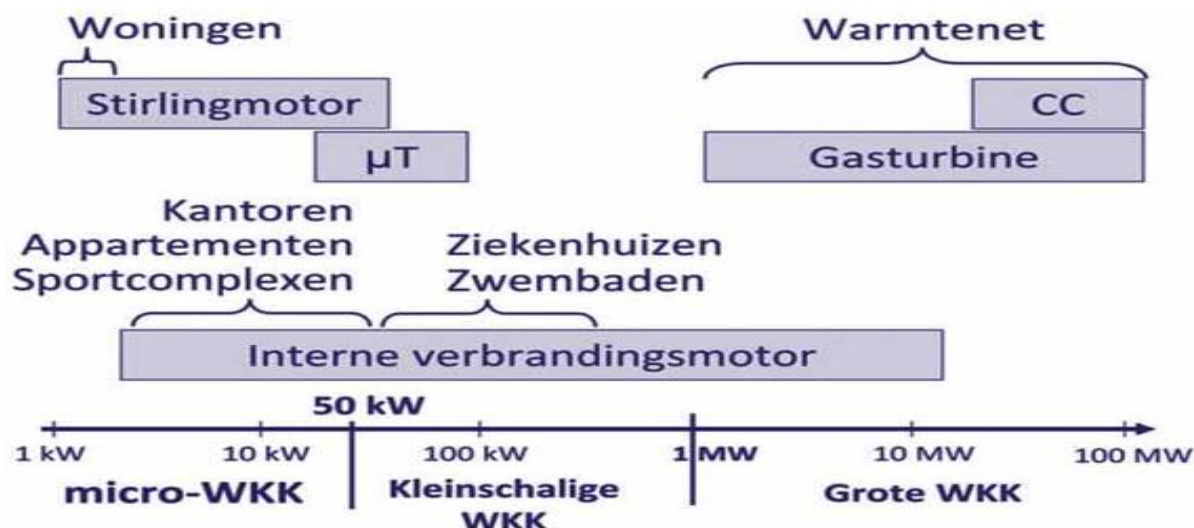
met slechts 0.25% (van 1.106.578 kWh naar 1.103.716 kWh), terwijl het aantal draaiuren wel toeneemt met circa 20% (van 3.624 uur naar 4.344 uur).

Aangezien warmtekrachtinstallaties bij voorkeur gedimensioneerd worden op de warmtevraag (Cogen Vlaanderen, 2006), stellen we voor deze gevalstudie geen elektrische jaarbelastingduurcurve op en werken we in het vervolg van het onderzoek verder met de thermische jaarbelastingduurcurve. De geïnteresseerde lezer die graag wil weten hoe elektrische dimensionering in zijn werk gaat, wordt doorverwezen naar de vorige gevalstudie van het zwembad, waar ook een elektrische dimensionering wordt uitgewerkt.

10.3.2 Evaluatie JBDC en keuze meest geschikte technologie

In deze stap wordt een keuze gemaakt tussen verschillende technologieën op basis van de verzamelde gegevens. Wij vertrekken hier zoals eerder gezegd van de thermische jaarbelastingduurcurve (JBDC). In theorie volstaat het om te zoeken naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve. In praktijk moet bij de dimensionering ook rekening gehouden worden met een reeks andere factoren, zoals de beschikbare installaties op de markt (niet alle vermogens zijn beschikbaar), de verkoopprijs van elektriciteit per kWh, warmtekrachtverhouding, de betrouwbaarheid van de WKK-installatie (meerdere kleine WKK's in plaats van één grote zijn betrouwbaarder), de mogelijkheid van werking op deellast, het aantal start-stops, etc. (Cogen Vlaanderen, 2010). Rekening houdende met het feit dat Stroobandt (2007) vooropstelt dat een installatie in de verzorgingsinstellingen minstens 4000 draaiuren moet kunnen maken, kiezen we voor het punt op de jaarbelastingduurcurve met een thermisch vermogen van 254 kW en 4.344 draaiuren. De jaarlijkse warmteproductie bedraagt hierbij 1.103.716 kWh.

Het woon- en zorgcentrum heeft behoefte aan warmte met een temperatuurniveau lager dan 120°C en er is geen behoefte aan stoom. Dit is al een eerste indicatie om te kiezen voor een motor en niet voor een technologie met een turbine (Energik, 2004). Bovendien blijkt ook uit figuur 23 (hoofdstuk 7), die hieronder voor het gemak herhaald wordt, dat een interne verbrandingsmotor aangewezen is bij kleinschalige WKK's (Cogen Vlaanderen, 2010).



Figuur 56: Verschillende WKK technologieën met hun toepassingsgebieden (Cogen Vlaanderen, 2010)

Het thermisch vermogen van de installatie werd vastgelegd op 254 kW. Het te installeren elektrisch vermogen kan dan bepaald worden aan de hand van het Excel bestand van Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010). Bij een installatie op bio-olie met een elektrisch vermogen van 210 kW_e hoort een elektrisch rendement van 36%, een thermisch rendement van 44% en een thermisch vermogen van 254 kW_{th}. In onderstaande tabel worden deze waarden samengevat.

Tabel 55: Kenmerken warmtekrachtinstallatie woon- en zorgcentrum

Kenmerk WKK-installatie	Waarde
Elektrisch vermogen	210 kW _e
Elektrisch rendement	36 %
Thermisch rendement	44 %
Totale rendement	80 %
Thermisch vermogen	254 kW _{th}

Om te verifiëren of een installatie met een elektrisch vermogen van 210 kW_e effectief een thermisch vermogen heeft van 254 kW_{th} (zoals voor onze gevalstudie optimaal is), kunnen we volgende berekeningen doen. Een WKK-installatie op bio-olie met een elektrisch vermogen van 210 kW_e zal volgens Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) een elektrisch rendement hebben van 36% en een thermisch rendement van 44%. Via deze rendementen kan de warmtekrachtverhouding en finaal ook het thermisch vermogen bepaald worden. De warmtekrachtverhouding wordt door Cogen Vlaanderen (2006) gedefinieerd als de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid warmte en de geproduceerde hoeveelheid

elektriciteit en kan berekend worden aan de hand van de rendementen. De warmtekrachtratio bedraagt $0,44/0,36 = 1,21 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{KW}_{\text{e}}$. Het thermisch vermogen wordt nu bekomen door het elektrisch vermogen te vermenigvuldigen met deze warmtekrachtverhouding. Het thermisch vermogen bedraagt dan $210 \text{ kW}_{\text{e}} * 1,21 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{KW}_{\text{e}} \approx 254 \text{ kW}_{\text{th}}$.

In bijlage 8, waar de cijfergegevens van jaarbelastingduurcurve zijn weergegeven, is te zien dat een installatie met een thermisch vermogen van $254 \text{ kW}_{\text{th}}$ gedurende 4.344 uren in werking zal zijn. Bij 4.344 werkingsuren zal met een geïnstalleerd elektrisch vermogen van $210 \text{ kW}_{\text{e}}$ 912.240 kWh elektrische energie per jaar geproduceerd worden en met een geïnstalleerd thermisch vermogen van $254 \text{ kW}_{\text{th}}$ 1.103.376 kWh thermische energie per jaar. Deze thermische energie kan ook afgelezen worden uit bijlage 8 (kolom 'bepaling rechthoek'), maar vanwege afrondingsfouten is de waarde lichtjes afwijkend.

De totale warmtevraag over een volledig jaar bedraagt 2.039.424 kWh, zodat nog 936.048 kWh warmte nodig is die geleverd wordt door een verwarmingsketel. Aangezien er jaarlijks een elektriciteitsbehoefte is van 713.982 kWh en er 912.240 kWh elektriciteit geproduceerd kan worden met behulp van de WKK-installatie, kan er zo'n 198.258 kWh elektriciteit aan het net worden geleverd. Bovenstaande cijfergegevens staan samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 56: Warmte- en elektriciteitsproductie WKK-installatie woon- en zorgcentrum

Totale warmtebehoefte	2.039.424	kWh _{th}
Totale elektriciteitsvraag	713.982	kWh _e
Warmte geleverd door WKK	1.103.376	kWh _{th}
Elektriciteit geleverd door WKK	912.240	kWh _e
Warmte geleverd door ketel	936.048	kWh _{th}
Elektriciteit aan het net geleverd	198.258	kWh _e

10.4 FASE 3: ECONOMISCHE ANALYSE

In deze fase van het onderzoek wordt nagegaan of een investering in de vooropgestelde warmtekrachtinstallatie economisch gezien levensvatbaar is. We gaan er hierbij van uit dat het woon- en zorgcentrum het project in eigen beheer zal uitvoeren. Dit wil zeggen dat de opbrengsten en jaarlijkse inkomende cashflows die het project oplevert enkel bestemd zijn voor het woon- en zorgcentrum. Men kan op deze manier onmiddellijk beschikken over de warmteproductie en men heeft het volle beslissingsrecht om de opgewekte elektriciteit te gebruiken of te leveren aan het openbaar net. Hiertegenover staat dat er geen derde partij of energiebedrijf wordt betrokken bij de financiering van het investeringsproject en dat men dus de initiële investeringsuitgave van de

WKK-installatie voor honderd procent zelf zal dragen. Ook de jaarlijkse uitbatings- en onderhoudskosten vallen ten laste van het woon- en zorgcentrum. In de economische balans zullen ook de subsidies en financiële voordelen opgenomen worden waarop men recht heeft bij de investering in warmtekrachtkoppeling.

De economische evaluatie wordt uitgevoerd aan de hand van verwachte kasstromen en niet op basis kosten en opbrengsten (boekhoudkundige resultaten). Een kasstroom is immers objectiever te bepalen dan een boekhoudkundige opbrengst of kost, die bijvoorbeeld beïnvloed wordt door afschrijvingsmethodes en waarderingsgrondslagen.

Het is belangrijk op te merken dat enkel differentiële kasstromen beschouwd worden in de investeringsanalyse. We beschouwen dus enkel inkomsten en uitgaven die ontstaan ten gevolge van het nieuwe energiesysteem, die niet zouden voorkomen in de bestaande situatie zonder WKK-installatie. Cashflows die zich voordoen onder de huidige situatie en die nog steeds ondervonden zullen worden bij het nieuwe energiesysteem, zullen niet opgenomen worden.

10.4.1 Investeringskosten

We gaan uit van een investering in een WKK-installatie op pyrolyse-olie die hierboven aangeduid werd als meest geschikte technologie, met een elektrisch vermogen van 210 kW_e en een thermisch vermogen van 254 kW_{th}.

De investeringskosten in een WKK op bio-olie worden volgens Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) berekend aan de hand van een logaritmische functie in functie van de grootte van de motor, waarbij schaalvoordelen optreden vanaf een elektrische capaciteit van 1600 kW_e. De formule voor de berekening van de investeringskosten per kW_e is dan ook verschillend al naargelang we te maken hebben met een installatie met een elektrisch vermogen kleiner of groter dan 1600 kW_e.

$$I = (-93,709 \times \ln(P_e) + 991.53) \times 2 \quad \text{Indien } P_e < 1600 \text{ kW}_e$$

$$I = 600 \quad \text{Indien } P_e > 1600 \text{ kW}_e$$

De investeringskosten per kW_e voor de vooropgestelde warmtekrachtinstallatie, met een elektrisch vermogen van 210 kW_e, bedragen 981 €/kW_e, wat neerkomt op een totale investering van €205.992.

Verder is ook een investering in een rookgasreiniger van belang om de uitstoot van schadelijke stoffen te beperken. De investeringskost hiervan bedraagt voor de gekozen installatie €16.940 (Stroobandt 2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010).

Het Excel bestand van Stroobandt dateert van 2007, bovenstaande kostprijzen dienen daarom nog geconverteerd te worden naar de huidige prijzen. Deze conversie gebeurt aan de hand van de

Marshall & Swift Equipment Cost Index. Deze index geeft in dimensieloze cijfers aan hoe de kosten van industriële installaties veranderen doorheen de tijd. In 2007 bedroeg de Marshall & Swift Equipment Cost Index 1.373,3 en in 2010 bedroeg deze 1.457,4 (Chemical Engineering, 2011). De prijzen van industriële installaties zijn dus circa 6,12% gestegen gedurende deze periode. Indien we deze prijsstijging doorrekenen in de prijzen berekend met het Excel bestand van Stroobandt, dan bedraagt de investering in de warmtekrachtinstallatie €218.607 en in de rookgasreiniger €17.977.

Als we ervan uitgaan dat het woon- en zorgcentrum, dat door het OCMW wordt uitgebaat, niet BTW-plichtig is, moet op alle materialen en toestellen die worden aangekocht 21% BTW betaald worden. Deze BTW kan dan niet worden teruggevorderd en moet in rekening worden gebracht bij de investeringsanalyse. De BTW die betaald moet worden op de warmtekrachtinstallatie en de rookgasreiniger bedraagt €49.683.

Het is aangewezen om bij de start van een project rekening te houden met onvoorziene omstandigheden en daarom in de budgetraming een toeslag voor onvoorziene kosten in rekening te brengen. De risicopremie kan best geschat worden op 15 à 20% van de totale investeringskosten (Cogen Vlaanderen, 2006). Aangezien we in deze masterproef te maken hebben met een nieuwe technologie, warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie, rekenen we met een risicopremie van 20% van de totale investeringskost.

In onderstaande tabel worden alle investeringskosten weergegeven, inclusief BTW en risicopremie. De totale investeringskost bedraagt dan €343.521.

Tabel 57: Investeringskosten WKK-installatie woon- en zorgcentrum

Warmtekrachtinstallatie	218.607
Rookgasreiniger	17.977
BTW	49.683
Risicopremie	57.253
Totaal	343.521

10.4.2 Uitgaande kasstromen

10.4.2.1 Onderhouds- en uitbatingskosten

Een onderhoudsformule waarbij alle kosten inbegrepen zijn, kost voor kleine, conventionele motoren op aardgas ongeveer 12 à 15 €/MWh. In deze masterproef wordt echter veronderstelt dat de motor draait op pyrolyse-olie. Hierdoor ligt de onderhoudsprijs een stuk hoger dan voor

conventionele WKK-installaties op aardgas. Bij motoren die werken op alternatieve brandstoffen, zoals bio-olie, zijn de onderhoudskosten veel hoger doordat meer servicebeurten en kleine revisies vereist zijn (Stroobandt, 2007).

Aan de hand van de Excel file van Stroobandt (2007, persoonlijke communicatie Tom Kuppens 30 maart 2010) kunnen ook de onderhouds- en uitbatingskosten van een WKK-installatie op bio-olie en van de rookgasreiniger bepaald worden. Voor de gekozen installatie bedragen de onderhouds- en uitbatingskosten van de installatie 37,21 €/MWh_e en voor de rookgasreiniger (ureum) 14,46 €/MWh_e. Uitgaande van 912.240 kWh_e of 912 MWh_e geproduceerde elektrische energie per jaar, komt dit neer op €33.941 onderhouds- en werkingskosten van de WKK en €13.193 onderhoudskosten voor de rookgasreiniger.

Ook hier moet rekening gehouden worden met een verandering van het prijspeil. Om de prijsgegevens van 2007 naar 2010 te converteren, wordt gebruik gemaakt van de consumptieprijsindex. In december 2007 bedroeg deze index 108,40 en in december 2010 bedroeg deze index 115,00 (FOD Economie, 2011a). De consumptieprijsindex steeg dus met 6,09%. Na aanpassing van bovenvermelde onderhoudskosten naar het prijspeil van 2010, bedragen de onderhoudskosten op jaarlijkse basis voor de WKK €36.008 en voor de rookgasreiniger €12.435.

Bovendien dienen we voor de onderhouds- en uitbatingskosten ook 21% aan te rekenen, aangezien het woon- en zorgcentrum deze niet kan terugvorderen. De BTW bedraagt €10.173.

De totale jaarlijkse onderhouds- en uitbatingskosten voor een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie bedragen voor het woon- en zorgcentrum €58.616. In onderstaande tabel worden bovenstaande gegevens samengevat.

Tabel 58: Jaarlijkse onderhouds- en uitbatingskosten woon- en zorgcentrum

Onderhouds- en uitbatingskosten WKK	36.008
Ureum rookgasreiniger	12.435
BTW	10.173
Totaal	58.616

10.4.2.2 Aankoopkosten pyrolyse-olie

Een tweede grote exploitatiekost is de aankoop van de pyrolyse-olie die nodig is om de installatie te doen draaien. Uitgaande van een jaarlijkse warmteproductie van 1.103.376 kWh_{th} en een

elektriciteitsproductie van 912.240 kWh_e kunnen we de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie berekenen.

In eerste instantie moeten we hiervoor de thermische en elektrische efficiëntie kennen. De thermische efficiëntie van de WKK-installatie bedraagt 44% en de elektrische efficiëntie 36% (zie tabel kenmerken warmtekrachtinstallatie woon- en zorgcentrum).

Verder moeten we ook de onderste verbrandingswaarde (LHV) van de pyrolyse-olie kennen. We gaan er vanuit dat 44% van de onderste verbrandingswaarde van de olie wordt omgezet in warmte en 36% van de onderste verbrandingswaarde van de olie wordt omgezet in elektriciteit. We gaan niet uit van de bovenste verbrandingswaarde (HHV), aangezien dit tot een overschatting zou leiden van de geproduceerde warmte en elektriciteit. Bij gebruik van de bovenste verbrandingswaarde wordt immers verondersteld dat de latente energie (warmte) van de waterdamp in de rookgassen gerecupereerd kan worden. In de praktijk wordt deze latente energie echter niet gebruikt en dienen de berekeningen uitgevoerd te worden met de onderste verbrandingswaarde. In de literatuur (Lu, et al., 2009) vinden we een onderste verbrandingswaarde van pyrolyse-olie terug van 14-18 MJ/kg. Uitgaande van een dichtheid van 1,2 kg/l (T. Bridgwater, 2007) krijgen we zo een onderste verbrandingswaarde van 16,8 - 21,6 MJ/l. Ringer (2006) neemt als onderste verbrandingswaarde 18 MJ/l en deze waarde wordt ook in deze studie gehanteerd voor de berekening van de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie. 18 MJ/l komt overeen met 5 kWh/l, aangezien 1 kWh overeenstemt met 3,6 MJ.

$$1.103.376 \text{ kWh} = V_{olie} * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} * 0,44$$

$$912.240 \text{ kWh} = V_{olie} * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} * 0,36$$

Uit beide berekeningen komt naar voren dat een volume pyrolyse-olie van zo'n 506.800 liter benodigd is voor de benodigde warmte- en elektriciteitsproductie, gegeven de thermische en elektrische rendementen en gegeven de LHV van de pyrolyse-olie.

Coenen en Schlatmann (2007) gaan uit van een verkoopprijs van pyrolyse-olie van €6 per GJ. Ringer (2006) schat dat de verkoopprijs van ruwe pyrolyse-olie circa \$7,62 per GJ bedraagt. Dit komt overeen met €5,28 per GJ (wisselkoers april 2010) of €0,019 per kWh. Volgens Van Stijn (persoonlijke communicatie, 19 november 2010) bedraagt de verkoopprijs van pyrolyse-olie €9 per GJ of €0,0324 per kWh. Deze laatste prijs wordt aangehouden in deze masterproef. Uitgaande van een LHV van 18 MJ/l (of 5 kWh/l) betekent dit een prijs van €0,162 per liter. Bij een jaarlijks verbruik van 506.800 liter houdt dit een kostprijs van €82.102 in. Wanneer hier BTW wordt bijgeteld, bekomt men een jaarlijkse kostprijs voor de pyrolyse-olie van €99.343.

10.4.3 Inkomende kasstromen

10.4.3.1 *Besparingen energierekening*

Een eerste 'inkomende' kasstroom bestaat uit de besparing op de energierekening doordat minder brandstof nodig is voor de opwekking van warmte. De WKK-installatie zal een gedeelte van de warmte produceren die vroeger door ketels werd geleverd.

De warmtekrachtinstallatie produceert op jaarbasis 1.103.376 kWh thermische energie. Indien deze hoeveelheid opgewekt zou worden door de verwarmingsketels is hiervoor, uitgaande van een thermisch rendement van 80%, 1.379.220 kWh aan stookolie nodig. De netto stookwaarde van stookolie bedraagt 9,9 kWh/l (Daoud & Lebbe, 2009). Er is bijgevolg 139.315 liter (1.379.220 kWh / 9,9 kWh/l) stookolie nodig.

Om deze vermeden aangekochte stookolie te waarderen, wordt gebruik gemaakt van cijfergegevens van de FOD Economie, aangezien we geen prijsgegevens ter beschikking hebben van het woon- en zorgcentrum. Op haar website publiceert de FOD Economie (2010) de gemiddelde prijzen van verschillende goederen en diensten doorheen de tijd. De gepubliceerde prijs voor gasolie voor verwarmingstoepassing met een levering van meer dan 2000 liter bedroeg in 2010 gemiddeld 0,623 €/l. De besparing die gerealiseerd wordt doordat minder stookolie aangekocht moet worden met het nieuwe energiesysteem, bedraagt dan €86.793 (139.315 l * 0.623 €/l).

Een tweede 'inkomende' kasstroom bestaat uit de besparing op de energierekening doordat elektriciteit nu lokaal wordt geproduceerd. De warmtekrachtinstallatie levert op jaarbasis 912.240 kWh elektrische energie. De totale elektriciteitsvraag bedraagt 713.982 kWh op jaarbasis en kan dus volledig vervuld worden met behulp van de WKK. Deze elektriciteit moet niet meer uit het net aangekocht worden. De vermeden aangekochte elektriciteit wordt gewaardeerd aan de hand van de elektriciteitsprijzen die het woon- en zorgcentrum betaalt. De elektriciteitsprijs bestaat ook in dit geval uit 3 componenten: de energieprijis, het nettatarief en de toeslagen. De energieprijis bedraagt 0,070500 €/kWh voor de normale uren en 0,040130 €/kWh voor de stille uren. Aangezien de warmtekrachtkoppeling theoretisch gezien alle gevraagde elektriciteit kan opwekken voor de gevalstudie, waarderen we deze aan de gemiddelde prijs die over de normale en stille uren verbruikt wordt. Rekening houdend met het aandeel stille en normale uren in het totale elektriciteitsverbruik, komen we op een gemiddelde prijs van 0,052380 €/kWh. Het nettatarief bedraagt 0,023358 €/kWh, dit zijn de kosten voor het transport en de distributie van de elektriciteit. De toeslagen zijn de taksen en heffingen die de overheid bepaalt. In dit geval wordt een federale bijdrage aangerekend van 0,003358 €/kWh. De totale prijs die betaald moet worden bedraagt dan 0,079096 inclusief BTW. De besparing die gerealiseerd wordt doordat minder

elektriciteit aangekocht moet worden van het net bedraagt dan €56.473 (713.982 kWh * 0,079096 €/kWh).

Tabel 59: Besparingen energierekening woon- en zorgcentrum

Vermeden aankoop stookolie	€ 86.793
Vermeden aankoop elektriciteit	€ 56.473

In deze rubriek "besparingen op de energierekening" is het belangrijk enkele veronderstellingen toe te lichten. Een eerste assumptie betreft de energievraag. We gaan ervan uit dat de energievraag de volgende 10 jaren gelijk is aan de huidige energievraag en dat het woon- en zorgcentrum dus hetzelfde warmte- en elektriciteitsverbruik zal kennen. Een tweede assumptie betreft de energieprijzen. Het is moeilijk te voorspellen hoe de prijzen precies zullen evolueren, hoewel we op lange termijn wel een stijging van de energieprijzen verwachten. In deze studie wordt de prijs voor stookolie en elektriciteit echter voor 10 jaar hetzelfde gehouden, waardoor ook de jaarlijkse besparingen op de energierekening voor 10 jaar hetzelfde zijn. Dit standpunt lijkt de voorzichtigste aanpak, aangezien het toekennen van een arbitrair groeicijfer van de energieprijzen en dus ook van de gerealiseerde besparingen ervoor zou zorgen dat in een later stadium de berekende NCW hoger wordt.

10.4.3.2 Verkopen elektriciteit

De opgewekte elektriciteit door de warmtekrachtkoppeling bedraagt 912.240 kWh_e, terwijl de totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit slechts 713.982 kWh_e bedraagt. Er wordt dus meer elektriciteit opgewekt door de warmtekrachtkoppeling dan de totale jaarlijkse elektriciteitsvraag. Doordat de warmtekrachtinstallatie gedimensioneerd is op de warmtevraag van het woon- en zorgcentrum, is het mogelijk dat deze installatie op elektriciteitsvlak overgedimensioneerd is. Dit vormt op zich geen probleem, aangezien de overschot aan elektriciteit op het net kan worden gezet.

Doordat de overschot aan elektriciteit op het net wordt gezet, ontstaan er opbrengsten uit de verkoop van de elektriciteit. Doorgaans vormen de opbrengsten uit verkoop van overtollige elektriciteit bij een WKK-project geen grote opbrengstenpost. De prijs die men ontvangt voor elektriciteit die aan het net geleverd wordt, ligt altijd veel lager dan de prijs die men zelf als verbruiker betaalt. De prijs die men als eindverbruiker betaalt, bestaat namelijk uit verschillende componenten, zoals de productiekosten, taksen, nettarieven, heffingen, een winstmarge van de leverancier etc. Indien men elektriciteit aan het net levert, zal de leverancier meestal enkel bereid zijn de productiekost te betalen. Lebbe (2011) gaat uit van een verkoopprijs van ±40 €/MWh elektriciteit die geïnjecteerd wordt in het net. De totale jaarlijkse opbrengst die ontstaat door

verkopen van elektriciteit aan het net, bedraagt in deze gevalstudie dan €7.930 (198.258 kWh * 0,04 €/kWh).

10.4.3.3 *Inkomsten uit verkoop van warmtekrachtcertificaten*

Voor overgegaan kan worden tot het bepalen van de inkomsten uit de warmtekrachtcertificaten, moet eerst onderzocht worden of men effectief recht heeft op deze certificaten en of de installatie dus kwalitatief is. Aangezien we te maken hebben met een installatie kleiner dan 1 MW_e, is het voldoende als de relatieve primaire energiebesparing groter is dan 0% (Vlaamse Regering, 2006a).

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \right) \geq 0 \%$$

Hierbij dienen de Europese referentierendementen gebruikt te worden. Het thermisch referentierendement kan in tabel 1 van bijlage 2 teruggevonden worden en bedraagt 89% indien de WKK draait op pyrolyse-olie. Het elektrisch referentierendement kan in tabel 2 van bijlage 2 teruggevonden worden en bedraagt 44,2% voor installaties op biobrandstoffen die geconstrueerd werden in 2006-2011. Er dient nog wel een correctie uitgevoerd te worden voor de klimaatomstandigheden. De gemiddelde jaartemperatuur bedraagt in België 11°C (Cogen Vlaanderen, 2006). Aangezien het referentierendement verhoogd moet worden met 0,1% per graad waarmee de gemiddelde jaartemperatuur beneden de 15°C blijft, bedraagt het referentierendement 44,6%. Bovendien moet ook nog een correctie doorgevoerd worden voor de aansluitspanning. De correctiefactoren hiervoor zijn terug te vinden in tabel 3 van bijlage 2. De warmtekrachtinstallatie zal aangesloten worden op het distributienet. Indien de elektriciteit getransporteerd wordt over het middenspanningsnet, bedraagt het referentierendement 0,446 * 0,945 = 0,42147. Indien het transport van elektriciteit over het laagspanningsnet gebeurt, bedraagt het referentierendement 0,446 * 0,925 = 0,41255. In dit onderzoek wordt 0,42147 als elektrisch referentierendement gehanteerd. In onderstaande tabel worden de referentierendementen en de rendementen van de WKK-installatie weergegeven die gebruikt worden om de relatieve primaire energiebesparing te berekenen.

Tabel 60: Rendementen voor berekening RPEB woon- en zorgcentrum

Thermisch rendement WKK α_Q	44 %
Elektrisch rendement WKK α_E	36 %
Thermisch rendement referentie η_Q	89 %
Elektrisch rendement referentie η_E	42,1 %

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{0,44}{0,89} + \frac{0,36}{0,421}} \right) = 25,8 \% \geq 0 \%$$

De relatieve primaire energiebesparing ligt duidelijk hoger dan 0%, waardoor de WKK-installatie recht heeft op warmtekrachtcertificaten.

Om het aantal warmtekrachtcertificaten te bepalen waarop de installatie recht heeft, dienen we de absolute primaire energiebesparing te berekenen. Per gerealiseerde MWh absolute energiebesparing wordt 1 certificaat toegekend. We moeten dus de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (E) vermenigvuldigen met de warmtekrachtbesparingsfactor.

$$PEB = E * \left(\frac{1}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E * \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right)$$

In deze formule gebruiken we voor de referentierendementen niet dezelfde cijfers als hierboven, maar worden de Vlaamse referentierendementen (Vlaamse Regering, 2006a) gehanteerd. In tabel 1 van bijlage 1 zien we dat het thermisch referentierendement 90% bedraagt. Het elektrisch referentierendement kan afgelezen worden in tabel 3 van bijlage 1 en bedraagt 42,7%, aangezien de WKK installatie gebruik maakt van een vloeibare biobrandstof. De hoeveelheid geproduceerde elektrische energie (E) bedraagt 912.240 kWh_e op jaarbasis.

Tabel 61: Gegevens berekening absolute PEB woon- en zorgcentrum

Thermisch rendement WKK α_Q	44 %
Elektrisch rendement WKK α_E	36 %
Thermisch rendement referentie η_Q	90 %
Elektrisch rendement referentie η_E	42,7 %
Geproduceerde elektrische energie E	912.240 kWh _e

$$PEB = 912.240 kWh * \left(\frac{1}{0,427} + \frac{0,44}{0,36 * 0,90} - \frac{1}{0,44} \right) = 1.301.965 kWh$$

De absolute primaire energiebesparing bedraagt 1.301.965 kWh of 1.301,97 MWh en aangezien er per gerealiseerde MWh absolute energiebesparing 1 warmtekrachtcertificaat wordt toegekend, heeft men recht op 1.301,97 certificaten per jaar. Om de opbrengsten uit de verkopen van de certificaten te bepalen, hebben we twee mogelijkheden. We kunnen rekenen met de marktprijs of met de minimumprijs. De VREG adviseert bij het opmaken van financiële haalbaarheidsstudies te werken met de minimumsteun en niet met de marktprijs, omdat enkel de minimumsteun gegarandeerd is (VREG, 2011d). In deze studie wordt dan ook gerekend met de minimumprijs van

€27 per certificaat. Gedurende de eerste 4 jaren brengen de certificaten jaarlijks €35.153 (1.301,97 certificaten * 27 €/certificaat) op.

Vanaf maand 49 (jaar 5) wordt nog slechts een fractie X van de certificaten aanvaard.

$$X = \frac{RPEB - 0,2 * (T - 48)}{RPEB}$$

Waarbij T de tijd in maanden bedraagt en RPEB de relatieve primaire energiebesparing voorstelt, berekend met referentiewaarden van de Vlaamse regering (2006a) en dus niet met de Europese referentiewaarden zoals hierboven. De relatieve primaire energiebesparing op basis van de Vlaamse referentiewaarden bedraagt 24,92%.

$$RPEB = \left(1 - \frac{1}{\frac{0,44}{0,90} + \frac{0,36}{0,427}} \right) = 24,92 \%$$

In bijlage 9 wordt op maandbasis het percentage aanvaarde certificaten, het aantal aanvaarde certificaten en de inkomsten uit de verkoop van de warmtekrachtcertificaten weergegeven. In onderstaande tabel worden deze gegevens gesommeerd per jaar.

Tabel 62: Bepaling jaarlijks aantal warmtekrachtcertificaten en hun opbrengsten (woon- en zorgcentrum)

Jaar	Aantal certificaten	Inkomsten (€)
Jaar 1	1301,97	35.153 €
Jaar 2	1301,97	35.153 €
Jaar 3	1301,97	35.153 €
Jaar 4	1301,97	35.153 €
Jaar 5	1234,06	33.320 €
Jaar 6	1108,69	29.935 €
Jaar 7	983,31	26.549 €
Jaar 8	857,94	23.164 €
Jaar 9	732,57	19.779 €
Jaar 10	607,20	16.394 €

10.4.3.4 Inkomsten uit verkoop van groenestroomcertificaten

Aangezien de warmtekrachtinstallatie draait op pyrolyse-olie, kan de eigenaar naast warmtekrachtcertificaten ook aanspraak maken op groenestroomcertificaten. De groenestroomcertificaten worden maandelijks toegekend per schijf van 1.000 kWh opgewekte elektriciteit. De certificaten worden dus verkregen voor alle geproduceerde elektriciteit, ongeacht of deze plaatselijk verbruikt wordt of aan het net wordt geleverd (Vlaamse regering, 2010b).

Om het aantal groenestroomcertificaten te berekenen waarop de eigenaar recht heeft, wordt enkel gekeken naar de nettoproductie van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen. De uitdrukking "netto" houdt in dat een bepaalde hoeveelheid energie moet worden afgetrokken van de gemeten elektriciteitsproductie. Het betreft de energie die verbruikt wordt door de hulpvoorziening van de productie-installatie, de energie die verbruikt werd bij het eventuele transport van de hernieuwbare energiebron uit het buitenland en de energie die verbruikt werd voor de voorbehandeling die nodig was om de hernieuwbare energiebron geschikt te maken voor elektriciteitsproductie (Vreg, 2007). Vooral de voorbehandeling is in het kader van deze masterproef een grote energiepost. Hierbij denken we onder andere aan de landbouwactiviteiten van het kortoomloophout (zaaien, bewerken van het land, oogsten, verhakselen,...) en aan de pyrolyse van het kortoomloophout. Indien de eigenaar van de warmtekrachtinstallatie die draait op pyrolyse-olie aanspraak wil maken op groenestroomcertificaten, is het zijn taak om aan de VREG alle info te bezorgen die nodig is om het equivalent elektriciteitsverbruik van de voorbehandeling te kunnen bepalen.

In dit onderzoek wordt verondersteld dat de "netto" elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen 75% bedraagt van de totale elektriciteitsproductie en dat dus 25% moet worden afgetrokken als voorbehandelingsenergie (Tom Kuppens, persoonlijke communicatie 20 mei 2011). In dit geval komt dus ook 75% van de elektriciteit die opgewekt wordt met de WKK in aanmerking voor groenestroomcertificaten.

De warmtekrachtinstallatie produceert 912.240 kWh_e of 912,24 MWh_e elektrische energie op jaarbasis. Als we ervan uitgaan dat 75% van deze opgewekte elektriciteit in aanmerking komt voor groenestroomcertificaten, betekent dit in deze gevalstudie dat het woon- en zorgcentrum voor 684.180 kWh of 684,18 MWh elektrische energie beroep kan doen op groenestroomcertificaten. Net als bij de berekening van de opbrengsten uit de warmtekrachtcertificaten, wordt ook bij de berekening van de opbrengsten uit groenestroomcertificaten gewerkt met de minimumprijs in plaats van de marktprijs, aangezien enkel de minimumprijs gegarandeerd is. Uitgaande van de minimumsteun voor groenestroomcertificaten van €90 per certificaat en gegeven het feit dat elke MWh_e elektrische energie een certificaat oplevert, betekent dit zo'n €61.575 aan certificaten op jaarbasis. De groenestroomcertificaten hebben geen degressief karakter, men heeft alle jaren recht op evenveel certificaten.

10.4.3.5 Verhoogde investeringsaftrek

Een onderneming die een energiebesparende investering doet, kan onder bepaalde voorwaarden profiteren van een investeringsaftrek. Dit houdt in dat de belastbare winst van de onderneming verminderd kan worden met een gedeelte van het bedrag van de investering uitgevoerd in de belastbare periode. Indien we ervan uitgaan dat de instelling onder het OCMW valt en dat er geen

vennootschapsbelasting betaald moet worden, kan ook geen beroep worden gedaan op de verhoogde investeringsaftrek.

10.4.4 Berekening Netto Contante Waarde (NCW)

In deze fase van het onderzoek wordt de netto contante waarde van het investeringsproject in een WKK-installatie op pyrolyse-olie voor het woon- en zorgcentrum onderzocht. De formule voor de berekening van de NCW kan als volgt worden weergegeven (Mercken, 2004):

$$NCW_i = \sum_{t=1}^n [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * \widehat{A}_t] * A_{t-i} - I_0 + b * c * I'_0$$

De verschillende parameters zullen stap voor stap ingevuld en besproken worden. In eerste instantie gaan we ervan uit dat de warmtekrachtinstallatie die draait op pyrolyse-olie een levensduur van 10 jaren zal hebben. In de literatuur vinden we terug dat interne verbrandingsmotoren een levensduur van 15 jaar hebben, maar aangezien de pyrolyse-olie versnelde slijtage kan veroorzaken, gaan we uit van een levensduur van 10 jaar.

10.4.4.1 Jaarlijkse cashflows (O_t - Q_t)

Gegeven dat we een projectduur van 10 jaar vooropstellen, worden vervolgens de jaarlijkse netto cashflows die zich gedurende deze 10 jaar voordoen opgelijst. De relevante kasstromen werden reeds besproken in bovenstaande paragrafen en worden samengevat in onderstaande overzichtstabellen.

Tabel 63: Overzicht jaarlijkse uitgaande cashflows woon- en zorgcentrum

Jaar	Jaarlijkse onderhouds- en werkingskosten (€)	Jaarlijkse aankoop pyrolyse-olie (€)	Uitgaande cashflows totaal (€)
1	58.616	99.343	157.959
2	58.616	99.343	157.959
3	58.616	99.343	157.959
4	58.616	99.343	157.959
5	58.616	99.343	157.959
6	58.616	99.343	157.959
7	58.616	99.343	157.959
8	58.616	99.343	157.959
9	58.616	99.343	157.959
10	58.616	99.343	157.959

Tabel 64: Overzicht jaarlijkse inkomende cashflows woon- en zorgcentrum

Jaar	Vermeden aankoop stookolie (ketel) (€)	Vermeden aankoop elektriciteit (€)	Inkomsten verkoop overtollige elektriciteit (€)	Inkomsten WK certificaten (€)	inkomsten GS certificaten (€)	Inkomende cashflows totaal (€)
1	86.793	56.473	7.930	35.153	61.576	247.926
2	86.793	56.473	7.930	35.153	61.576	247.926
3	86.793	56.473	7.930	35.153	61.576	247.926
4	86.793	56.473	7.930	35.153	61.576	247.926
5	86.793	56.473	7.930	33.320	61.576	246.092
6	86.793	56.473	7.930	29.935	61.576	242.707
7	86.793	56.473	7.930	26.549	61.576	239.322
8	86.793	56.473	7.930	23.164	61.576	235.937
9	86.793	56.473	7.930	19.779	61.576	232.552
10	86.793	56.473	7.930	16.394	61.576	229.167

Tabel 65: Overzicht jaarlijkse netto cashflows woon- en zorgcentrum

Jaar	Netto cashflow (€)
1	89.967
2	89.967
3	89.967
4	89.967
5	88.133
6	84.748
7	81.363
8	77.978
9	74.593
10	71.208

10.4.4.2 Jaarlijkse afschrijvingen (\widehat{A}_t)

Aangezien we ervan uitgaan dat het woon- en zorgcentrum niet onderworpen is aan de vennootschapsbelasting, is er ook geen spreke van een gunstig belastingeffect van de afschrijvingen. In bovenstaande formule van de NCW bedraagt b dus 0. Gegeven het feit dat er geen gunstig afschrijvingseffect bestaat, worden de jaarlijkse afschrijvingen hier niet berekend.

10.4.4.3 Verdiscontering (A_{t-i})

Om de verwachte toekomstige kasstromen te kunnen vergelijken en optellen, is het nodig om deze cashflows op een gemeenschappelijke tijdsbasis te brengen. De verwachte toekomstige kasstromen worden daarom geactualiseerd tegen de kapitaalkost (ook vereist rendement of discontovoet genoemd) om ze effectief te kunnen vergelijken met kasstromen van nu en om ze te kunnen optellen. De relevante interestvoet voor een bedrijf is de marginale opbrengstvoet van investeringen of anders gezegd, de return die gerealiseerd wordt op bijkomende investeringen. Aangezien we geen situatiespecifieke gegevens ter beschikking hebben, wordt in deze studie een discontovoet gehanteerd van 9%. Deze waarde wordt immers als standaardwaarde gehanteerd als private discontovoet voor bedrijven (Ochelen & Putzeijs, 2008). In deze 9% zit de marktintrestvoet vervat plus een risicopremie.

Zoals hierboven al werd weergegeven is de formule van de NCW:

$$NCW_i = \sum_{t=1}^n [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * \widehat{A}_t] * A_{t-i} - I_0 + b * c * I'_0$$

Aangezien we ervan uitgaan dat het woon- en zorgcentrum niet onderworpen is aan de vennootschapsbelasting, bedraagt b in bovenstaande formule 0. De formule wordt dan vereenvoudigd tot:

$$NCW_i = \sum_{t=1}^n [(O_t - Q_t)] * A_{t-i} - I_0$$

In volgende tabel wordt het eerste gedeelte van deze formule berekend, het gedeelte dat verdisconteerd moet worden. In de eerste kolom staat de netto cashflow weergegeven ($O_t - Q_t$). In de volgende kolom staat de discontofactor A_{t-i} weergegeven op jaarbasis. In de laatste kolom tenslotte, worden alle verdisconteerde cashflows die het project genereert weergegeven.

Tabel 66: Berekening verdisconteerde netto cashflows na belastingen woon- en zorgcentrum

Jaar	Netto cashflow ($O_t - Q_t$)	Disconto factor $A(t-i)$	Verdisconteerde netto cashflows
1	89.967	0,92	82.538
2	89.967	0,84	75.723
3	89.967	0,77	69.471
4	89.967	0,71	63.735
5	88.133	0,65	57.281
6	84.748	0,60	50.533
7	81.363	0,55	44.509
8	77.978	0,50	39.135
9	74.593	0,46	34.345
10	71.208	0,42	30.079
Totaal			547.348

10.4.4.4 Investeringsbedrag (I_0)

In het laatste deel van de formule voor de NCW berekening wordt het investeringsbedrag in rekening gebracht. Het totale investeringsbedrag (I_0) bedraagt €342.521. Gezien we ervan uitgaan dat het woon- en zorgcentrum niet onderworpen is aan de vennootschapbelastingen, kan ook niet gerekend worden op een investeringsaftrek.

10.4.4.5 Netto Contante Waarde (NCW)

Om ten slotte de NCW van het investeringsproject te bepalen, wordt de som van de verdisconteerde kasstromen (€547.348) verminderd met de netto investeringskost (342.521). We bekomen dan een netto contante waarde van €203.827. Deze NCW is positief, het woon- en zorgcentrum kan uitgaande van deze gegevens dus op een economisch verantwoorde manier investeren in een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie. In onderstaande tabel worden de jaarlijkse verdisconteerde kasstromen van heel het investeringsproject samengevat.

Tabel 67: Samenvatting verdisconteerde netto cashflows en NCW woon- en zorgcentrum

Jaar	Verdisconteerde netto cashflow na belastingen (€)
jaar 0	-343.521
jaar 1	82.538
jaar 2	75.723
jaar 3	69.471
jaar 4	63.735
jaar 5	57.281
jaar 6	50.533
jaar 7	44.509
jaar 8	39.135
jaar 9	34.345
jaar 10	30.079
NCW	203.827

10.4.5 Internal Rate of Return (IRR)

De interne opbrengstvoet geeft de discontovoet weer die overeenstemt met een NCW gelijk aan nul (Mercken, 2004). Op deze manier wordt dus aangegeven hoe hoog de discontovoet mag oplopen vooraleer het niet langer economisch verantwoord is om het investeringsproject uit te voeren. Men kan de interne opbrengstvoet dan ook interpreteren als de hoogste interestvoet die de investeerder kan betalen zonder geld te verliezen, indien het project volledig gefinancierd zou worden met behulp van een lening en de inkomende cashflows van het project instaan voor de aflossing van de lening (Mercken, 2004).

De IRR van het investeringsproject werd bepaald met de formule IR in Excel en bedraagt 21,76%. Deze interne opbrengstvoet is ruim groter dan de discontovoet van 9% en ook op deze manier kunnen we dus besluiten dat het project economisch verantwoord is.

10.4.6 Verdisconteerde terugverdientijd (DPB)

De verdisconteerde terugverdientijd is de tijd die nodig is om de initiële investeringskost terug te verdienen door de netto cashflows die het project genereert, waarbij rekening gehouden wordt met de tijds waarde van geld. Er wordt met andere woorden berekend hoeveel tijd er nodig is om de contante waarde van de kasstromen van negatief naar positief te brengen (Mercken, 2004). In onderstaande tabel worden de gecumuleerde verdisconteerde netto cashflows na belastingen weergegeven. We kunnen zien dat na 5 jaar de initiële netto investeringsuitgave van €343.521

reeds volledig is terugverdiend. Interpolatie leert ons dat na 4 jaar en 331 dagen de investering is terugverdiend.

Tabel 68: Bepaling verdisconteerde terugverdientijd woon- en zorgcentrum

Jaar	Verdisconteerde netto cashflow na belastingen (€)	Gecumuleerde cashflows (€)
jaar 0	-343.521	-343.521
jaar 1	82.538	-260.982
jaar 2	75.723	-185.259
jaar 3	69.471	-115.788
jaar 4	63.735	-52.053
jaar 5	57.281	5.227
jaar 6	50.533	55.760
jaar 7	44.509	100.268
jaar 8	39.135	139.403
jaar 9	34.345	173.748
jaar 10	30.079	203.827
NCW	203.827	

10.5 FASE 4: RISICO EN ONZEKERHEID

Tot hertoe hebben we nog geen rekening gehouden met onzekerheid. We hebben de berekeningen uitgevoerd alsof de resultaten en gevolgen van het investeringsproject met zekerheid gekend waren. In werkelijkheid is er echter helemaal geen zekerheid omtrent verschillende kasstromen en zijn de waarden die we hebben toegekend enkel "intelligent guesses" van de onzekere parameterwaarden. Denken we bijvoorbeeld maar aan de investeringskosten, de brandstofprijzen, de elektriciteitsprijzen, de waarde van de groenestroom- en warmtekrachtcertificaten, de levensduur van de machine... In deze vierde fase van het haalbaarheidsonderzoek proberen we rekening te houden met onzekerheid. Dit houdt in dat er moet worden nagedacht over de verschillende resultaten en hun bijhorende waarschijnlijkheden. Rekening houden met onzekerheid kan het best op een systematische manier gebeuren.

10.5.1 Identificatie onzekere variabelen

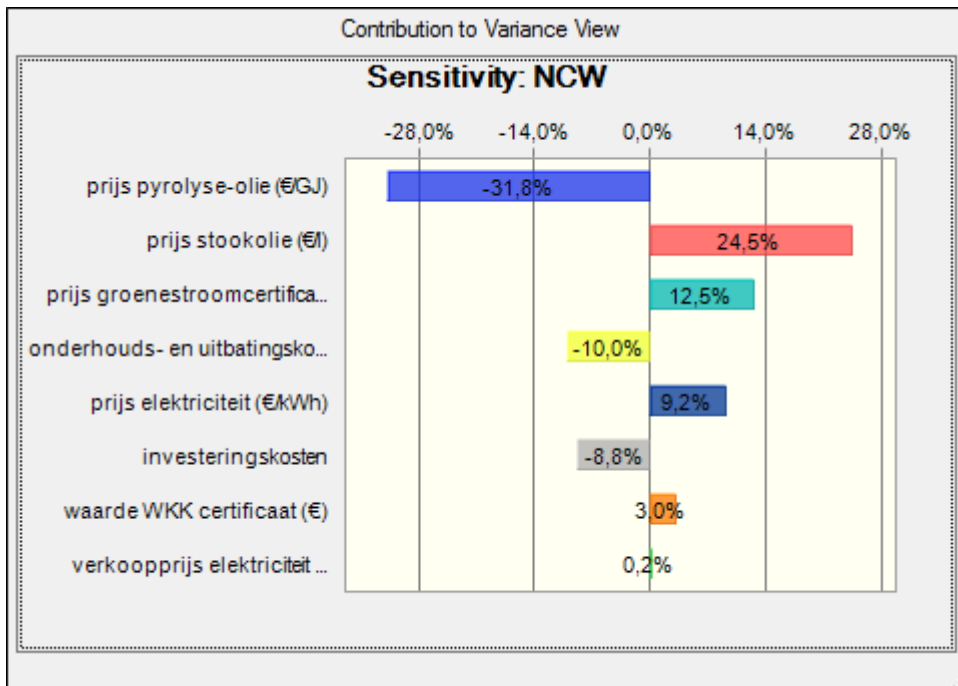
We starten met de identificatie van de onzekere variabelen. Enerzijds zijn er heel wat variabelen die per definitie een fluctuerende waarde hebben, denken we bijvoorbeeld maar aan de prijs van de groenestroom- en warmtekrachtcertificaten, die door vraag en aanbod op de certificatenmarkt tot stand komt. Anderzijds zijn er bepaalde variabelen die men tamelijk zeker kan bepalen, maar

die een erg grote bijdrage hebben in de totale uitgaven of inkomsten. Een kleine verandering in de parameterwaarde zou in dit geval een grote impact hebben op de netto contante waarde. Op basis van deze criteria (fluctuerend karakter en belang) werden 8 parameters uit het economisch model weerhouden:

- de investeringskost van de warmtekrachtkoppeling;
- de aankoopprijs van elektriciteit;
- de aankoopprijs van stookolie;
- de aankoopprijs van pyrolyse-olie;
- de onderhoudskosten;
- de prijs van de warmtekrachtcertificaten;
- de prijs van de groenestroomcertificaten;
- de verkoopprijs van elektriciteit.

10.5.2 Sensitiviteitsanalyse

Nu we de onzekere parameters geïdentificeerd hebben, starten we met een sensitiviteitsanalyse. De hoofdvraag die we ons hierbij stellen is: wat is het effect op de netto contante waarde door de verandering van één bepaalde parameter? (Mercken, 2004). We kunnen de relatieve sensitiviteit van de NCW voor elke parameter weergeven aan de hand van een Tornado diagram, dat opgesteld kan worden met het software programma Crystal Ball. Om zulk Tornado diagram op te stellen, laten we de onzekere variabelen variëren binnen een bepaald bereik, waarbij de minimum- en maximumwaarde respectievelijk 10% minder en 10% meer bedragen dan de meest waarschijnlijke waarde die in de economische analyse werd gehanteerd. Door elke parameter 10% te laten variëren, hebben we geen last van schaalverschillen tussen de parameters. In het Tornado diagram wordt dan weergegeven hoeveel invloed de wijziging van één parameter heeft op de NCW (al het overige gelijkblijvend) en dat kan dan vergeleken worden met het effect op de NCW van een vergelijkbare verandering in een andere parameter.



Figuur 57: Resultaten sensitiviteitsanalyse Tornado diagram (woon- en zorgcentrum)

Met behulp van bovenstaand Tornado diagram krijgen we inzicht in de gevoeligheid van de netto contante waarde voor de verschillende parameters. Aangezien de relatieve afwijking voor elke parameter hetzelfde is (plus en min 10%), geeft de breedte van de balkjes de mate van invloed aan op de gevoeligheid van de netto contante waarde. De variabelen worden gerangschikt op het effect dat ze teweegbrengen.

De diagramstaven die rechts van de y-as uitwijken, zijn variabelen met een positief effect op de netto contante waarde. De diagramstaven die aan de linkerkant van de y-as uitwijken hebben een negatief effect op de netto contante waarde.

Uit bovenstaand Tornado diagram kunnen we afleiden dat de prijs van de pyrolyse-olie de meest invloedrijke parameter is, die 31,8% van de variatie in de NCW bepaalt. Het teken is negatief. Hoe hoger de prijs die betaald moet worden voor de pyrolyse-olie om de warmtekrachtkoppeling te doen draaien, hoe lager de NCW van het investeringsproject. Ook de prijs van stookolie blijkt een belangrijke invloed te hebben op de NCW van het investeringsproject. Deze invloed is positief: hoe hoger de stookoliekost, hoe interessanter het is om te investeren in een WKK die draait op pyrolyse-olie, zodat er minder (dure) stookolie nodig is. De prijs van de groenestroomcertificaten blijkt in deze gevalstudie de derde belangrijkste bijdrage te leveren aan de gevoeligheid van de NCW. Hoe hoger de prijs die men ontvangt voor een groenestroomcertificaat, hoe hoger de NCW. De onderhoudskosten hebben een negatieve invloed op de NCW: hoe hoger de onderhoudskosten,

hoe lager de NCW van het investeringsproject. De aankoop prijs van elektriciteit heeft dan weer een positieve invloed op het resultaat. Wanneer de elektriciteitsprijs stijgt, wordt het immers economisch gezien interessanter te investeren in een WKK, zodat er minder dure elektriciteit van het net moet worden aangekocht. De investeringskost heeft een negatieve bijdrage van 8,8%: hoe hoger de kostprijs, hoe lager de netto contante waarde. De prijs van de warmtekrachtcertificaten heeft een kleine, positieve invloed op de NCW. Hoe hoger de prijs is die men ontvangt, hoe interessanter het is om in een WKK te investeren. Tot slot is er nog de verkoopprijs van elektriciteit. Deze parameter heeft een erg kleine positieve invloed op het resultaat. Hoe hoger de verkoopprijs die de eigenaar van de WKK ontvangt voor de elektriciteit die hij op het net zet, hoe hoger de NCW. De positieve bijdrage is echter bijzonder klein (0,2%).

Het doel van dit Tornado diagram is om de relatieve sensitiviteit van de NCW voor elke parameter in het project weer te geven. Op zulke manier kunnen we onze aandacht toespitsen op de kritische onzekerheden van het project en verliezen we geen tijd met het analyseren van variabelen die maar een relatief kleine impact hebben. In een volgende stap wordt voor de belangrijkste variabelen een Monte Carlo analyse uitgevoerd.

10.5.3 Monte Carlo analyse

Naast de sensitiviteitsanalyse, waarbij de invloed van individuele parameters wordt nagegaan, is het ook van belang om oog te hebben voor simultane veranderingen van de parameterwaarden. We trachten in deze fase te begrijpen wat het effect is van gelijktijdige verandering van een reeks parameters op de NCW.

Om de onzekerheid in afzonderlijke parameters te vertalen naar de onzekerheid in het projectresultaat, zou men bijvoorbeeld elke parameter haar meest negatieve waarde kunnen toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt en daarna elke parameter haar meest positieve waarde toekennen en nagaan hoeveel de NCW dan bedraagt. Deze methode geeft echter een veel te groot en onrealistisch onzekerheidsgebied voor de NCW, aangezien het wel heel onwaarschijnlijk is dat alle parameters gelijktijdig hun meest extreme waarde aannemen. Een algemeen erkende werkwijze om de onzekerheden van de parameters op een realistische manier te vertalen naar de onzekerheid in projectuitkomst, is de zogenaamde Monte Carlo methode.

Een Monte Carlo simulatie kan worden toegepast indien een systeem elementen bevat die beïnvloed worden door het toeval. Voor het investeringsproject in de warmtekrachtkoppeling geldt dat quasi alle parameters probabilistisch zijn van aard. Het uiteindelijk resultaat wordt bepaald door een voorlopig onbekende combinatie van de parameterwaarden (Mercken, 2004).

Bij een Monte Carlo simulatie worden verschillende experimenten uitgevoerd, waarbij telkens een scenario wordt samengesteld op basis van toevallig gekozen waarden voor de verschillende

parameters. Voor elk scenario wordt dan de NCW berekend. Door dit experiment veelvuldig uit te voeren, verkrijgt men uiteindelijk een kansverdeling van de NCW.

Een Monte Carlo simulatie bestaat uit 5 grote stappen (Mercken, 2004):

- Identificatie van de sleutelparameters waarvan de waarde onzeker is en die een door het toeval bepaalde waarde zullen aannemen;
- Bepaling van de kansverdeling voor deze parameters;
- Toevallige keuze van een parameterwaarde voor elke parameter aan de hand van een toevalsgetallengenerator;
- Berekening van de NCW van het toevallig samengestelde scenario;
- Verzameling van experimentele gegevens en verwerking ervan tot kansverdeling van de NCW.

10.5.3.1 *Identificatie sleutelvariabelen*

Wat betreft de identificatie van de sleutelparameters, wordt ervoor gekozen om 7 parameters die werden gebruikt in de sensitiviteitsanalyse ook in de Monte Carlo simulatie te weerhouden. Het betreft:

- de investeringskost van de warmtekrachtkoppeling;
- de aankoopprijs van elektriciteit;
- de aankoopprijs van stookolie;
- de aankoopprijs van pyrolyse-olie;
- de onderhoudskosten;
- de prijs van de warmtekrachtcertificaten;
- de prijs van de groenestroomcertificaten.

De verkoopprijs van elektriciteit wordt in de Monte Carlo analyse niet weerhouden, aangezien deze parameter slechts een kleine impact heeft op de NCW van het project.

10.5.3.2 *Bepaling kansverdeling parameters*

De kansverdelingen voor bovenstaande parameters zijn niet exact gekend. Een eenvoudige, pragmatische oplossing is dan om te werken met drie ramingen (meest waarschijnlijke waarde, minimumwaarde en maximumwaarde) en hier een driehoeksverdeling op toe te passen. De meest waarschijnlijke waarde heeft hierbij een hogere kans om voor te komen dan de meest extreme waarden. In dit onderzoek wordt voor elke onzekere parameter gewerkt met een driehoeksverdeling.

In de hierboven besproken sensitiviteitsanalyse werden alle factoren verondersteld te veranderen binnen -10% en +10% van de meest verwachte waarde, om op die manier de bijdragen aan de sensitiviteit van de NCW van alle variabelen te kunnen evalueren op gemeenschappelijke basis.

In de Monte Carlo analyse nemen we als minimumwaarde en maximumwaarde niet gewoon 10% meer en 10% minder dan de meest verwachte waarde, aangezien we verwachten dat deze parameters anders variëren. In onderstaande tabel wordt voor elk van de onzekere parameters de meest verwachte waarde, de minimumwaarde en de maximumwaarde aangegeven.

Tabel 69: Onzekere parameters en hun verdeling

Parameter	Minimumwaarde	Meest verwachte waarde	Maximumwaarde
Investeringskost (€)	240.465	343.521	446.577
Aankoopprijs elektriciteit (€/kWh)	0,071186	0,079096	0,087006
Aankoopprijs stookolie (€/l)	0,561	0,623	0,685
Aankoopprijs pyrolyse-olie (€/GJ)	7,2	9	10,8
Onderhoudskosten (€)	52.754	58.616	64.478
Prijs WKC (€/MWh)	27	27	41,48
Prijs GSC (€/MWh)	90	90	107,77

In de kolom "Meest verwachte waarde" zijn telkens de waarden terug te vinden die ook in het basisscenario gehanteerd werden (zie ook fase 3 economische analyse). Wat betreft de investeringskosten, hanteren we een marge van 30% voor de minimumwaarde en maximumwaarde, aangezien Peters, Timmerhaus en West (2004) ervan uitgaan dat de verwachte nauwkeurigheid van de geschatte investeringskosten voor chemische procesinstallaties 20 à 30% bedraagt. De aankoopprijs voor elektriciteit en stookolie en de onderhoudskosten laten we variëren met plus en min 10%. De prijs van de pyrolyse-olie laten we variëren met plus en min 20%, omdat het gebruik van pyrolyse-olie als brandstof nog in zijn kinderschoenen staat en de prijs veel minder zeker is. Wat betreft de prijs van warmtekracht- en groenestroomcertificaten, hanteren we als minimumwaarde en meest verwachte waarde de minimumsteun en als maximumwaarde de hoogste waarde die al betaald is voor de certificaten op de markt. Het lijkt misschien vreemd om als meest verwachte waarde de minimumsteun te hanteren, maar dit wordt door de VREG aanbevolen, aangezien enkel deze minimumsteun gegarandeerd is.

10.5.3.3 Toevallige keuze parameterwaarden

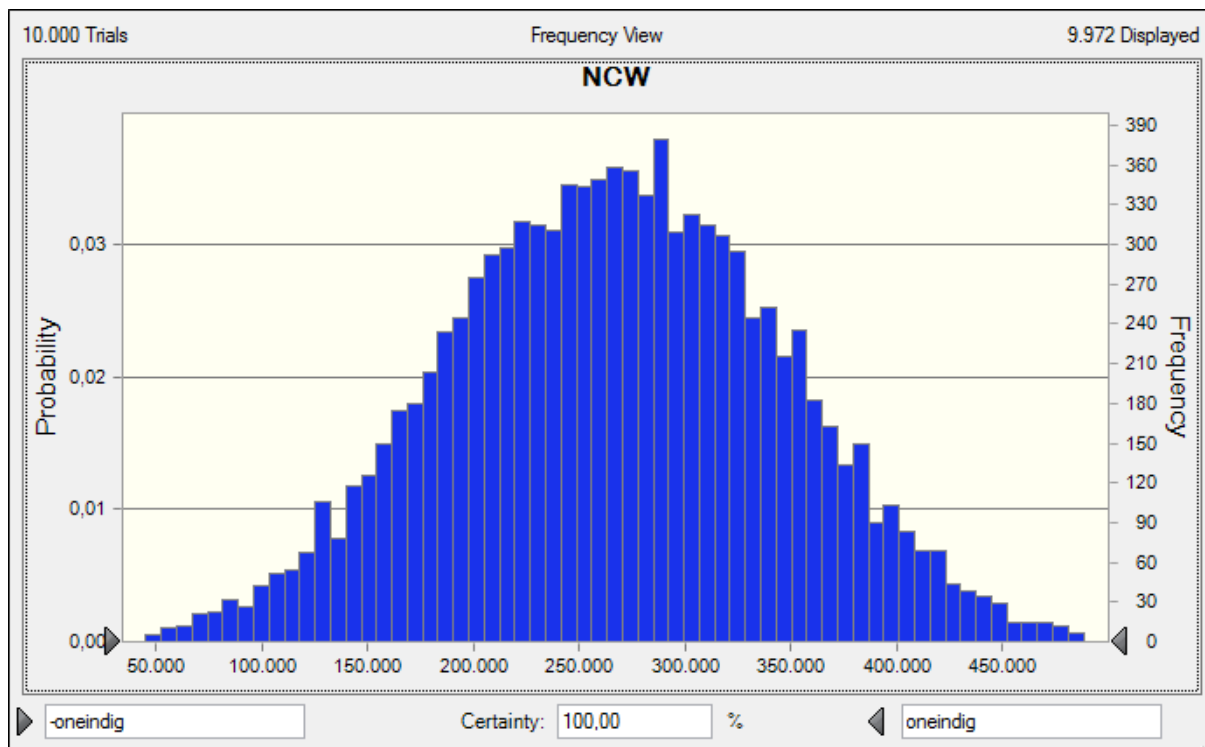
In de Monte Carlo analyse werd ingesteld dat 10.000 trials gedaan moeten worden. Bij elke trial trekt het model een willekeurige waarde uit elke verdeling van de onzekere parameters, waarbij de driehoeksverdeling de kans bepaalt dat een bepaalde waarde getrokken wordt.

10.5.3.4 Berekenen NCW van het toevallig samengesteld scenario

In deze stap wordt de NCW berekend van het toevallig samengesteld scenario (willekeurige parametercombinatie).

10.5.3.5 Opstellen kansverdeling NCW

Nadat 10.000 trials zijn gedaan en dus 10.000 keer de NCW waarde is berekend van een willekeurig samengestelde parametercombinatie, kunnen deze netto contante waarden grafisch voorgesteld worden. In onderstaande figuur wordt de kansverdeling van de NCW die bekomen werd na 10.000 trials weergegeven.



Figuur 58: Kansverdeling NCW

De NCW ligt tussen een minimum van €-31.763 en een maximum van €556.487. In tegenstelling tot de andere gevalstudies, kan de NCW hier dus ook negatief worden. De kans op een negatieve NCW bedraagt echter slechts 0,02%. De gemiddelde NCW bedraagt €266.597 en de mediaan €267.307. De gevonden waarde uit het basisscenario van €203.829 ligt dus eerder aan de lage kant.

Ongeveer 95% van de waarden ligt binnen 2 standaarddeviaties van het gemiddelde ($\mu - 2\sigma$; $\mu + 2\sigma$). De standaarddeviatie bedraagt in dit geval €79.133. In 95% van de gevallen zal de NCW dus liggen tussen €108.331 en €424.863.

10.5.4 Belang van certificaten voor NCW

Een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie kan in Vlaanderen genieten van twee soorten uitbatingssubsidies, namelijk van groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten. Deze certificaten vormen extra inkomsten voor de investeerder en hebben een aanzienlijke

bijdrage aan de NCW van het investeringsproject. In deze fase van het onderzoek wordt nagegaan hoe de NCW zou veranderen indien de certificaten zouden wegvallen.

In onderstaande tabel worden de 2 uitbatingssubsidies weergegeven. Indien de groenestroomcertificaten wegvallen, wordt de netto contante waarde van het investeringsproject meteen negatief en is de investering dus ook niet meer rendabel. Indien de kleinere subsidie van de warmtekrachtcertificaten wegvalt, maar het systeem van groenestroomcertificaten blijft bestaan, is de investering nog net rendabel. Hieruit kunnen we afleiden dat subsidies belangrijk zijn voor de rendabiliteit van het investeringsproject in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie.

Tabel 70: Belang groenestroom- en warmtekrachtcertificaten (woon- en zorgcentrum)

Warmtekrachtcertificaat (€/MWh)	Groenestroomcertificaat (€/MWh)	NCW (€)
27	90	203.827
27	0	-191.348
0	90	8.256
0	0	-386.919

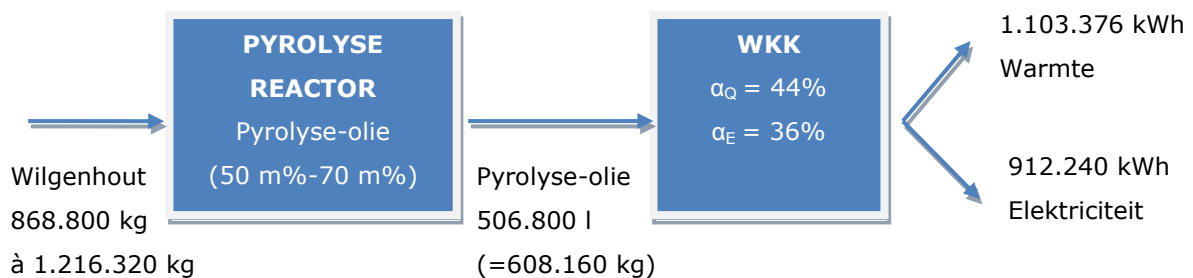
10.5.5 Maximumprijs pyrolyse-olie

De prijs van de pyrolyse-olie werd in de economische analyse vastgelegd op €9 per GJ. Het gebruik van pyrolyse-olie als brandstof staat echter nog in zijn kinderschoenen, waardoor we niet zeker zijn hoeveel de marktprijs precies zal bedragen. In deze paragraaf gaan we daarom na wat de maximumprijs is die de eigenaar van de WKK maximaal kan betalen. Hiervoor beantwoorden we de vraag: hoe hoog mag de maximumprijs van de pyrolyse-olie bedragen opdat de NCW positief blijft? We kunnen het antwoord op deze vraag vinden door de ingebouwde functionaliteit "doelzoeken" te gebruiken in het Excel bestand. Deze functionaliteit laat toe om voor een specifiek berekende cel (in dit geval de berekende NCW van het investeringsproject) uit te rekenen wat de waarde moet zijn van een andere cel (in dit geval de prijs van de pyrolyse-olie) om de specifiek berekende cel (NCW) een gegeven doelwaarde te laten aannemen (in dit geval 0). De maximale prijs die betaald kan worden voor de pyrolyse-olie bedraagt in deze gevalstudie €11,88 per GJ. Dit komt overeen met €0,0428 per kWh, aangezien 1 kWh overeenkomt met 0,0036GJ. Uitgaande van een onderste verbrandingswaarde van 18MJ/l (Ringer, 2006), kan de prijs van pyrolyse-olie ook in euro per liter uitgedrukt worden. De maximumprijs bedraagt dan €0,214 per liter.

10.6 TERUGKOPPELING NAAR FYTOREMEDIATIEPROJECT

Nadat we voor deze gevalstudie de optimale warmtekrachtinstallatie hebben geïdentificeerd en tot de conclusie zijn gekomen dat een investeringsproject in zulke installatie onder bepaalde voorwaarden haalbaar blijkt, keren we nu even terug naar het begin van het verhaal. In deze laatste paragraaf wordt nagegaan hoeveel hout uit het fyto-remediatieproject nodig is opdat het woon- en zorgcentrum de warmtekrachtinstallatie heel het jaar door kan doen draaien op pyrolyse-olie uit het korteomloophout.

De warmtekrachtinstallatie verbruikt jaarlijks zo'n 506.800 liter pyrolyse-olie. Hoeveel korteomloophout uit het fyto-remediatieproject is hiervoor nodig? In eerste instantie wordt de benodigde hoeveelheid pyrolyse-olie omgezet van liter in kg, uitgaande van een dichtheid van 1,2 kg/l (T. Bridgwater, 2007). De WKK-installatie verbruikt op jaarbasis dan zo'n 608.160 kg pyrolyse-olie (506.800 l * 1,2 kg/l). Nu het gewicht van de pyrolyse-olie gekend is, kan ook bepaald worden hoeveel hout nodig is om dit gewicht aan pyrolyse-olie te bekomen. Volgens Bridgwater (2003) levert snelle pyrolyse van wilgen zo'n 70% pyrolyse-olie op, vertrekkende van droge biomassa. Uit onderzoek (Stals, Carleer, et al., 2010) blijkt dat de opbrengst aan pyrolyse-olie van korteomloophout uit de Kempen, gecontamineerd met zware metalen geen 70 m% bedraagt maar eerder 50 m%. In dit onderzoek wordt daarom een opbrengstenrange van 50 m% - 70 m% gehanteerd. Gegeven deze range zal de benodigde hoeveelheid korteomloophout ook liggen tussen de 868.800 kg (608.160 kg / 0,70) en de 1.216.320 kg (608.160 kg / 0,50). Om een duidelijker inzicht te krijgen in bovenstaande cijfergegevens, worden ze in onderstaande figuur schematisch weergegeven.



Figuur 59: Overzicht inputgegevens voor pyrolyse en WKK (woon- en zorgcentrum)

Nu bepaald is hoeveel ton korteomloophout vereist is, kan ook berekend worden hoeveel hectare grond in het fyto-remediatieproject nodig is om deze hoeveelheid hout te produceren. Garcia (2003) geeft aan dat wilg doorgaans een opbrengst oplevert van 10,8 ton droge stof per hectare per jaar. Uit experimenten op het proefterrein in Lommel blijkt echter dat de biomassaopbrengst voor korteomloophout op zanderige, met zware metalen gecontamineerde bodems slechts 8 ton droge

stof per hectare bedraagt (Vangronsveld, et al., 2009). Uitgaande van een opbrengst van 8 ton droge stof per hectare, is een oppervlakte van 109 hectare (868.800 kg / 8000 kg/ha) tot 152 hectare (1.216.320 kg / 8000 kg/ha) grond in het fyto-remediatieproject vereist.

HOOFDSTUK 11: CONCLUSIES EN DISCUSSIE

In deze masterproef werd de toepassingsmogelijkheid van pyrolyse-olie in een warmtekrachtkoppeling onderzocht. Meer bepaald werd nagegaan of het voor enkele gevalstudies economisch haalbaar is om te investeren in een warmtekrachtkoppeling die draait op pyrolyse-olie.

11.1 TECHNOLOGISCHE ASPECTEN PYROLYSE EN WKK

Pyrolyse is een thermisch proces waarbij organisch materiaal wordt ontleed onder invloed van een verhoogde temperatuur, zonder dat er zuurstof wordt toegevoegd. De pyrolyse-olie, het belangrijkste eindproduct, heeft vele toepassingsmogelijkheden. De pyrolyse-olie kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor warmte- en elektriciteitsproductie, in transportbrandstoffen en in chemische toepassingen. In deze masterproef staat de toepassing van de pyrolyse-olie voor gelijktijdige warmte- en elektriciteitsproductie in een warmtekrachtkoppeling centraal.

Warmtekrachtkoppeling betreft de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische) en nuttige thermische energie, uitgaande van eenzelfde primaire energiebron. Er wordt met andere woorden gelijktijdig elektriciteit en warmte opgewekt in dezelfde installatie. Hierdoor wordt een hoger rendement behaald dan bij de traditionele, afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit. Er bestaan verschillende technologieën voor warmtekrachtkoppeling, elk met een eigen toepassingsgebied. In het kader van deze masterproef zijn voornamelijk de turbinetechnologie en de inwendige verbrandingsmotoren belangrijk, aangezien het gebruik van pyrolyse-olie bij deze technologieën reeds gedemonstreerd werd. Bepaalde aanpassingen aan de olie en aan de installatie zijn wel vereist.

11.2 ONDERZOEK GEVALSTUDIES

11.2.1 Keuze technologie

Om de haalbaarheid van een warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie te onderzoeken, werd voor de 3 gevalstudies een stappenplan gevolgd. De eerste fase betrof telkens een analyse van de energievraag (zowel de warmte- als de elektriciteitsvraag) van de organisatie. In de tweede fase werden jaarbelastingduurcurves opgesteld. Dit zijn curves die helpen om de installatie optimaal technisch te dimensioneren. De geïnstalleerde vermogens voor de verschillende gevalstudies worden in onderstaande overzichtstabel weergegeven. Voor alle drie de gevalstudies bleek, gegeven hun energievraag, een interne verbrandingsmotor de beste technologie.

Tabel 71: Overzicht keuze installaties

	Zwembad	Ziekenhuis	Woon- en zorgcentrum
Elektrisch vermogen	54 kW _e	404 kW _e	210 kW _e
Thermisch vermogen	77 kW _{th}	453 kW _{th}	254 kW _{th}
Keuze technologie	Inwendige verbrandingsmotor	Inwendige verbrandingsmotor	Inwendige verbrandingsmotor

11.2.2 Economische analyse

Nadat de optimale dimensionering en technologie voor elke gevalstudie werd bepaald, werd in de volgende fase de rendabiliteit onderzocht.

Naast de investeringskosten die de investeerder initieel oploopt, brengt het project jaarlijkse exploitatiekosten met zich mee, zoals de onderhouds- en werkingskosten en de brandstofkosten. Hiertegenover staan de inkomsten onder de vorm van besparingen op de elektriciteitsfactuur en aardgas- of stookoliefactuur en de eventuele verkoop van geproduceerde elektriciteit aan het net. Ook de overheidssteun onder de vorm van warmtekrachtcertificaten en groenestroomcertificaten vormen een belangrijke inkomstenpost.

Om na te gaan of het plaatsen van een warmtekrachtinstallatie op pyrolyse-olie haalbaar is, werd in eerste instantie de netto contante waarde (NCW) als evaluatiemaatstaf toegepast. Deze maatstaf geeft antwoord op de vraag: hoeveel blijft er over van de jaarlijkse inkomsten die voortvloeien uit de investering, nadat de jaarlijkse uitgaven en investeringskosten afgetrokken zijn (rekening houdend met de thuiswaarde van geld)? Daarnaast werd ook de interne rendementsvoet (IRR) berekend. Deze maatstaf geeft aan wat de discontovoet is die leidt tot een NCW van 0. Tot slot werd ook de verdisconteerde terugverdientijd (DPB) berekend. De verdisconteerde terugverdientijd geeft aan hoeveel tijd nodig is om de contante waarde van de kasstromen van negatief naar positief te brengen, rekening houdend met de tijdswaarde van geld. Uit de calculaties van deze financiële parameters komt naar voren dat alle drie de organisaties op een rendabele manier kunnen investeren in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie.

Tabel 72: Overzicht financiële parameters

	Zwembad	Ziekenhuis	Woon- en zorgcentrum
NCW	€ 59.614	€ 354.256	€ 203.827
IRR	23,59%	22,78%	21,76%
DPB	4 jaar 110 dagen	4 jaar 227 dagen	4 jaar 331 dagen

11.2.3 Onzekerheidsonderzoek

Om de economische analyse te optimaliseren, werd in de volgende fase rekening gehouden met onzekerheid, aangezien we werken met onzekere parameters en schattingen. Voor elke gevalstudie werd daarom een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd. Hierbij lieten we enkele onzekere parameters variëren binnen een bepaald bereik, waarbij de minimum- en maximumwaarde respectievelijk 10% minder en 10% meer bedroegen dan de meest waarschijnlijke waarde die in de economische analyse werd gehanteerd. Door elke parameter 10% te laten variëren, werd er geen probleem ondervonden door schaalverschillen tussen de parameters. In onderstaande tabel is de invloed te zien die de wijziging van één bepaalde parameter heeft op de NCW (al het overige gelijkblijvend). Deze invloed kan dan vergeleken worden met het effect op de NCW met een vergelijkbare verandering in een andere parameter.

Tabel 73: Overzicht sensitiviteitsanalyse

	Sensitiviteit NCW zwembad	Sensitiviteit NCW ziekenhuis	Sensitiviteit NCW woon- en zorgcentrum
Aankoopprijs pyrolyse-olie	-23,2%	-23,5%	-31,8%
Aankoopprijs elektriciteit	27,5 %	26,3%	9,2%
Investeringskosten	-16,6%	-13,0%	-8,8%
Onderhoudskosten	-10,4%	-11,3%	-10,0%
Prijs groenestroomcertificaten	10,2%	14,3%	12,5%
Aankoopprijs aardgas	8,6%	8,9%	-
Aankoopprijs stookolie	-	-	24,5%
Prijs warmtekrachtcertificaten	3,5%	2,7%	3,0%
Verkoopprijs elektriciteit	-	-	0,2%

Voor alle drie de gevalstudies blijkt de variabiliteit in de aankoopprijs van pyrolyse-olie een belangrijke invloed te hebben op de NCW. Dit verband is negatief: hoe hoger de aankoopprijs, hoe minder interessant het is om een WKK te doen draaien op pyrolyse-olie en hoe lager de NCW. Ook de variabiliteit van de aankoopprijs van elektriciteit heeft een aanzienlijke bijdrage aan de sensitiviteit van de NCW. Het verband is hier positief: hoe hoger de aankoopprijs van elektriciteit, hoe interessanter de besparing op de elektriciteitsrekening wordt dankzij de WKK en hoe hoger de NCW. De prijs van de pyrolyse-olie en van de elektriciteit zijn dus parameters die de organisaties goed in het oog moeten houden indien ze willen investeren in een WKK die werkt op pyrolyse-olie, aangezien veranderingen van deze parameters een grote invloed uitoefenen op de NCW. Bij het woon- en zorgcentrum heeft een stijging van de aankoopprijs van stookolie ook een grote invloed op de NCW van het investeringsproject. Deze invloed is positief: hoe hoger de aankoopprijs van de

stookolie, hoe interessanter de besparing aan stookoliekosten zijn dankzij de WKK en dus hoe hoger de NCW.

Naast de sensitiviteitsanalyse, waarbij de invloed van individuele parameters werd nagegaan, werd ook een Monte Carlo analyse uitgevoerd om het effect na te gaan van simultane veranderingen van de parameterwaarden op de NCW. Bij een Monte Carlo simulatie worden verschillende experimenten uitgevoerd, waarbij telkens een scenario wordt samengesteld op basis van toevallig gekozen waarden voor de verschillende parameters. Voor elk scenario wordt dan de NCW berekend. Door dit experiment veelvuldig uit te voeren, verkrijgt men uiteindelijk een kansverdeling van de NCW. Op basis van de kansverdeling van de NCW, werd een 95% betrouwbaarheidsinterval geconstrueerd van de NCW voor elke gevalstudie. In onderstaande tabel worden de betrouwbaarheidsintervallen weergegeven, samen met berekende NCW's uit het basisscenario. Zoals kan worden afgeleid uit de tabel, is de range voor alle gevalstudies positief. De berekende NCW's uit het basisscenario's, liggen bovendien tamelijk links in de betrouwbaarheidsintervallen.

Tabel 74: Overzicht betrouwbaarheidsintervallen NCW

	Zwembad	Ziekenhuis	Woon- en zorgcentrum
NCW	€ 59.614	€ 354.256	€ 203.827
95% Range NCW	€ 38.888 - € 106.120	€ 212.394 - € 660.174	€ 108.331 - € 424.863

In het onderdeel "risico en onzekerheid" werd ook voor alle gevalstudies nagegaan wat er zou gebeuren indien de warmtekrachtcertificaten en/of groenestroomcertificaten zouden wegvallen. Hoewel uit de overzichtstabel van de sensitiviteitsanalyse blijkt dat een verandering van de prijs van de certificaten geen extreem grote invloed zou uitoefenen op NCW, moeten we deze bevinding met enige voorzichtigheid benaderen. In de tabel wordt enkel de invloed weergegeven op de NCW van een verandering van 10% van de waarde van de certificaten. Indien de certificaten echter volledig zouden wegvallen, zal de invloed op de NCW veel groter zijn. In onderstaande tabel wordt schematisch weergegeven hoeveel de NCW zou bedragen indien de warmtekrachtcertificaten en/of groenestroomcertificaten zouden wegvallen.

Tabel 75: Overzicht belang certificaten voor de NCW

WKC (€/MWh)	GSC (€/MWh)	Zwembad NCW (€)	Ziekenhuis NCW (€)	Woon- en zorgcentrum NCW (€)
27	90	59.614	354.256	203.827
27	0	-13.022	-230.757	-191.348
0	90	15.012	111.131	8.256
0	0	-57.624	-473.881	-386.919

Uit de tabel blijkt dat de financiële haalbaarheid van een investering in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie afhankelijk is van het bestaan van de certificaten. Indien de warmtekrachtcertificaten wegvallen, maar de groenestroomcertificaten blijven bestaan, is het project nog net financieel haalbaar. Indien de groenestroomcertificaten wegvallen, wordt het project voor alle drie de organisaties financieel oninteressant. Het bestaan van het certificatenstelsel is dus van groot belang opdat een investering in een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie haalbaar is.

11.2.4 Terugkoppeling fyto-remediatieproject

Tot slot werd er voor alle gevalstudies kort een terugkoppeling gemaakt naar het fyto-remediatieproject.

Een eerste terugkoppeling betreft de maximumprijs die de organisaties kunnen betalen voor de pyrolyse-olie. De prijs van de pyrolyse-olie werd in de economische analyse vastgelegd op €9 per GJ. Het gebruik van pyrolyse-olie als brandstof staat echter nog in zijn kinderschoenen, waardoor we niet zeker zijn hoeveel de marktprijs precies zal bedragen. Bovendien blijkt uit de sensitiviteitsanalyse dat de prijs van de pyrolyse-olie een belangrijke invloed heeft op de gevoeligheid van de NCW. Voor elke gevalstudie werd daarom de vraag beantwoord: "hoe hoog mag de maximumprijs van de pyrolyse-olie zijn opdat de NCW van het investeringsproject positief blijft?". In onderstaande overzichtstabel worden de resultaten weergegeven. De maximale prijs die betaald kan worden voor de pyrolyse-olie varieert voor de 3 gevalstudies tussen €11,88 per GJ en 14,07 € per GJ, wat hoger is dan de geschatte 9 € per GJ.

Daarnaast werd ook een terugkoppeling gedaan naar de benodigde hoeveelheid hout die nodig is opdat de organisaties hun installatie kunnen doen werken op pyrolyse-olie. In onderstaande tabel wordt de benodigde hoeveelheid hout weergegeven. Daarnaast werd ook voor elke gevalstudie berekend hoeveel hectare grond in het fyto-remediatieproject nodig is. Ook deze gegevens zijn terug te vinden in onderstaande tabel. De totale oppervlakte die vereist is voor het fyto-remediatieproject bedraagt voor de 3 gevalstudies 376 tot 526 hectare. Thomas Voets schat in dat er in Lommel, Overpelt, Neerpelt, Balen, Mol, Hamont-Achel en Hechtel-Eksel in totaal zo'n

3400 ha landbouwareaal beschikbaar is voor fyto-remediatie (persoonlijke communicatie Tom Kuppens, 30 mei 2011). Voor deze drie gevalstudies zou dus 10% à 15% van de totale beschikbare landbouwgrond nodig zijn.

Tabel 76: Overzicht terugkoppeling fyto-remediatieproject

	Zwembad	Ziekenhuis	Woon- en zorgcentrum
Maximumprijs pyrolyse-olie (€/GJ)	14,07	13,25	11,88
Benodigde hoeveelheid hout (kg)	264.255 - 369.914	1.872.646-2.621.705	868.800 - 1.216.320
Oppervlakte (ha)	33-46	234-328	109-152

11.3 DISCUSSIE

Over het gebruik van pyrolyse-olie in een warmtekrachtkoppeling is momenteel nog niet veel informatie beschikbaar, noch over de technische, noch over de economische kant van het verhaal. Deze masterproef vormt dan ook slechts een aanzet tot onderzoek naar het gebruik van pyrolyse-olie in WKK's. Er zijn verschillende elementen waarop verder zich zou kunnen richten.

In eerste instantie is verder onderzoek naar de technische aspecten vereist. Welke aanpassingen van de motoren/turbines en van de pyrolyse-olie zijn optimaal om een warmtekrachtinstallatie te doen werken op pyrolyse-olie? Hoe hoog lopen de kosten op om deze aanpassingen te doen? Een nauwkeurige inschatting van deze kosten zou het economisch model verbeteren. Evenzo zijn langdurige testen van de pyrolyse-olie in de WKK nodig, om een betere inschatting te verkrijgen het onderhoud en de revisies die nodig zijn. Een betere prognose van de hieraan verbonden kosten zou het economisch model opnieuw verbeteren.

Daarnaast is onderzoek vereist naar de levensduur van een warmtekrachtkoppeling die werkt op pyrolyse-olie. In dit onderzoek werd ervan uitgegaan van dat een motor met pyrolyse-olie als brandstof 10 jaar meegaat. Er is echter geen zekerheid omtrent de levensduur van de WKK. Indien de technologie minder lang of langer meegaat, heeft dit een grote invloed op de NCW van het project. De investeerder geniet dan immers ook respectievelijk minder lang of langer van de inkomende kasstromen die het investeringsproject met zich meebrengt. Voor de gevalstudie van het zwembad werd bijvoorbeeld nagegaan wat er zou gebeuren indien de WKK slechts 5 jaar zou meegaan. De NCW van het investeringsproject bedraagt in dit geval slechts €16.351 (in vergelijking met €59.614 indien de WKK 10 jaar meegaat). Een goed inzicht van de levensduur van een WKK met pyrolyse-olie als brandstof is dus vereist om de NCW te berekenen.

Een volgende aanbeveling voor verder onderzoek betreft de dimensionering van de warmtekrachtinstallatie. In deze masterproef werd de installatie gedimensioneerd met behulp van de thermische jaarbelastingduurcurve en de productiecurve. Meer bepaald werd gezocht naar de grootste rechthoek onder de jaarbelastingduurcurve, om op die manier een zo groot mogelijke hoeveelheid warmte te produceren met de WKK. In verder onderzoek kan worden nagegaan wat de invloed zou zijn op de NCW indien een andere dimensionering wordt toegepast. Zo kan bijvoorbeeld bij een relatief vlakke jaarbelastingduurcurve een rechthoek geconstrueerd worden met een kleiner vermogen en een groter aantal gebruiksuren. Als het een vlakke curve betreft, zal op die manier misschien weinig ingeboet moeten worden op vlak van opgewekte warmte (kWh), terwijl wel het aantal gebruiksuren toeneemt en het thermisch vermogen afneemt. Door het lagere thermische (en ook elektrische) vermogen zal een lagere investeringskost nodig zijn, wat misschien opweegt tegen de iets lagere opbrengsten. Verder onderzoek naar de NCW bij een ander dimensioneringsalgoritme is dus aangeraden.

Uit de economische analyse bleek dat de energieprijzen (van elektriciteit, stookolie en aardgas) een grote impact hebben op de rentabiliteit van een WKK. Een zo correct mogelijke inschatting van de evolutie van deze prijzen (misschien zelfs met een kansverdeling) lijkt dan ook zeer waardevol. Ook de prijs van de pyrolyse-olie bleek een grote invloed uit te oefenen op de rentabiliteit van het project. Aangezien pyrolyse-olie niet courant verhandeld wordt op de markt, is de marktprijs ervan erg onzeker. Meer zekerheid omtrent de prijs van pyrolyse-olie zou de betrouwbaarheid van de economische analyse verbeteren.

Tot slot wil ik nog graag de opmerking maken dat de besproken gevalstudies best als inleidende haalbaarheidsstudies worden beschouwd. Voor een concreet project dient een gespecialiseerd ingenieursbureau aangesproken te worden om tot een meer gedetailleerdere dimensionering en investeringsanalyse te komen. De bovenstaande conclusies moeten dan ook met de nodige voorzichtigheid gebruikt worden.

BIJLAGEN

BIJLAGE 1 : REFERENTIEREDEMEMENTEN VOOR GESCEIDEN OPWEKKING VAN WARMTE EN ELEKTRICITEIT

Tabel 1: Vlaamse referentierendementen voor gescheiden productie van warmte

WKK geeft warmte af in de vorm van	Thermisch rendement referentieketel
Heet water	90 %
Hete lucht voor droogtoepassingen	93 %
Stoom	85 %
Andere media	85 %
WKK maakt gebruik van biogas	70%

(Bron: Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties, 2006)

Tabel 2 en 3: Vlaamse referentierendementen voor gescheiden productie van elektriciteit

WKK maakt gebruik van fossiele energiebronnen en is aangesloten op een spanningsnet met nominale spanning	Elektrisch rendement referentieketel
> 15 kV	55 %
≤ 15 kV	50 %

WKK maakt gebruik van	Elektrisch rendement referentieketel
Biogas	42%
Vloeibare biobrandstoffen	42.7 %
Hout of houtafval	34 %
Andere vaste biomassastromen	25 %

(Bron: Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties, 2006)

BIJLAGE 2 : REFERENTIEREDEMMENTEN VOOR GESCEIDEN OPWEKKING VAN WARMTE EN ELEKTRICITEIT EN CORRECTIEFACTOREN

Tabel 1: Europees vastgelegde rendementen voor referentieketel voor warmteproductie in functie van de warmtevorm en aangewende brandstof

	Brandstoftype	Stoom/warm water	Direct gebruik van verbrandingsgassen
Vast	Steenkool/cokes	88%	80%
	Bruinkool/ bruinkoolbriketten	86%	78%
	Turf/turfbriketten	86%	78%
	Houtbrandstoffen en houtafval	86%	78%
	Landbouwbiomassa	80%	72%
	Bio-afbreekbaar (stadsafval)	80%	72%
	Niet-hernieuwbaar (stads – en industrie-afval)	80%	72%
	Steenolie	86%	78%
	Vloeibaar	Olie (gasolie + stookolie), LPG	89%
Biobrandstoffen		89%	81%
Bio-afbreekbaar afval		80%	72%
Niet – hernieuwbaar afval		80%	72%
Gasvormig		Aardgas	90%
	Raffinaderijgas/ waterstof	89%	81%
	Biogas	70%	62%
	Cokesovengas, hoogovengas, andere afvalgassen	80%	72%

(Bron: Ministerieel besluit inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties, 2006)

Tabel 2: Europees vastgelegde rendementen voor referentiecentrale voor elektriciteitsproductie in functie van het jaar van indienstname en van de aangewende brandstof

Constructiejaar		2001	2002	2003	2004	2005	2006 - 2011
Vast	Steenkool/cokes	42.7	43.1	43.5	43.8	44.0	44.2
	Bruinkool/ bruinkoolbriketten	40.3	40.7	41.1	41.4	41.6	41.8
	Turf/turfbriketten	38.1	38.4	38.6	38.8	38.9	39.0
	Houtbrandstoffen en houtafval	30.4	31.1	31.7	32.2	32.6	33.0
	Landbouwbiomassa	23.1	23.5	24.0	24.4	24.7	25.0
	Bio-afbreekbaar (stadsafval)	23.1	23.5	24.0	24.4	24.7	25.0
	Niet-hernieuwbaar (stads- en industrie-afval)	23.1	23.5	24.0	24.4	24.7	25.0
	Steenolie	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	39.0
Vloeibaar	Olie (gasolie+stookolie), LPG	42.7	43.1	43.5	43.8	44.0	44.2
	Biobrandstoffen	42.7	43.1	43.5	43.8	44.0	44.2
	Bio-afbreekbaar afval	23.1	23.5	24.0	24.4	24.7	25.0
	Niet – hernieuwbaar afval	23.1	23.5	24.0	24.4	24.7	25.0
Gasvormig	Aardgas	51.7	51.9	52.1	52.3	52.4	52.5
	Raffinaderijgas/ waterstof	42.7	43.1	43.5	43.8	44.0	44.2
	Biogas	40.1	40.6	41.0	41.4	41.7	42.0
	Cokesovengas, hoogovengas, andere afvalgassen, recuperatiewarmte	35	35	35	35	35	35

(Bron: Ministerieel besluit inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties, 2006)

Tabel 3: Europees vastgelegde correctiefactoren voor het elektrisch referentierendement

Spanning	Voor spanning geleverd aan het net	Voor elektriciteit ter plaatse gebruikt
> 200 kV	1	0.985
100 – 200 kV	0.985	0.965
50 – 100 kV	0.965	0.945
0.4 – 50 kV	0.945	0.925
<0.4 kV	0.925	0.860

(Bron: Ministerieel besluit inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties, 2006)

BIJLAGE 3: GEGEVENS WARMTEVRAAG EN BEREKENINGEN THERMISCHE JAARBELASTINGDUURCURVE (ZWEMBAD)

Periode	Gas verbruik (m ³)	Gas verbruik (kWh)	Warmte behoefte (kWh)	Benodigd vermogen (kW)	Cumulatief aantal uren	Gerangschikt vermogen (kW)	Bepaling grootste rechthoek (kWh)
week 1	2.872	32.678	24.998	149	168	149	24.998
week 2	2.465	28.047	21.456	128	336	141	47.316
week 3	2.253	25.635	19.610	117	504	140	70.765
week 4	2.533	28.820	22.048	131	672	131	88.191
week 5	2.239	25.475	19.489	116	840	128	107.279
week 6	2.718	30.925	23.658	141	1.008	126	127.325
week 7	2.399	27.296	20.881	124	1.176	126	147.692
week 8	2.261	25.726	19.680	117	1.344	124	167.050
week 9	2.424	27.580	21.099	126	1.512	120	181.978
week 10	2.438	27.740	21.221	126	1.680	120	201.414
week 11	1.773	20.173	15.432	92	1.848	120	220.981
week 12	1.912	21.755	16.642	99	2.016	117	236.162
week 13	1.997	22.722	17.382	103	2.184	117	254.936
week 14	1.433	16.305	12.473	74	2.352	116	273.450
week 15	1.488	16.930	12.952	77	2.520	116	292.330
week 16	1.580	17.977	13.753	82	2.688	107	287.586
week 17	1.171	13.324	10.193	61	2.856	103	295.498
week 18	1.711	19.468	14.893	89	3.024	103	311.313
week 19	1.599	18.193	13.918	83	3.192	102	325.136
week 20	1.234	14.040	10.741	64	3.360	101	340.507
week 21	987	11.230	8.591	51	3.528	99	349.490
week 22	948	10.786	8.252	49	3.696	94	348.323
week 23	879	10.001	7.651	46	3.864	92	354.947
week 24	8	91	70	0	4.032	89	357.428
week 25	32	364	279	2	4.200	83	347.949
week 26	1.057	12.027	9.200	55	4.368	82	357.567
week 27	326	3.709	2.838	17	4.536	79	358.159
week 28	301	3.425	2.620	16	4.704	77	362.651
week 29	429	4.881	3.734	22	4.872	74	361.719
week 30	701	7.976	6.102	36	5.040	70	353.563
week 31	265	3.015	2.307	14	5.208	64	332.969
week 32	687	7.817	5.980	36	5.376	62	332.290

week 33	669	7.612	5.823	35	5.544	61	336.355
week 34	784	8.920	6.824	41	5.712	61	346.252
week 35	1.017	11.571	8.852	53	5.880	55	322.011
week 36	874	9.944	7.607	45	6.048	54	324.004
week 37	1.170	13.312	10.184	61	6.216	53	327.529
week 38	976	11.105	8.495	51	6.384	51	326.459
week 39	1.354	15.406	11.785	70	6.552	51	331.316
week 40	1.034	11.765	9.000	54	6.720	49	330.062
week 41	1.524	17.340	13.265	79	6.888	46	313.690
week 42	1.966	22.369	17.112	102	7.056	45	319.513
week 43	1.987	22.608	17.295	103	7.224	41	293.435
week 44	1.193	13.574	10.384	62	7.392	36	268.471
week 45	1.819	20.697	15.833	94	7.560	36	269.089
week 46	2.065	23.496	17.974	107	7.728	35	267.862
week 47	2.323	26.431	20.220	120	7.896	22	175.502
week 48	2.710	30.834	23.588	140	8.064	17	136.203
week 49	2.308	26.260	20.089	120	8.232	16	128.378
week 50	2.314	26.329	20.141	120	8.400	14	115.330
week 51	2.244	25.532	19.532	116	8.568	2	14.205
week 52	1.956	22.255	17.025	101	8.760	0	3.631
totaal	79.407	903.493	691.172				

**BIJLAGE 4: GEGEVENS ELEKTRICITEITSVRAAG EN BEREKENINGEN
ELEKTRISCHE JAARBELASTINGDUURCURVE (ZWEMBAD)**

Maand	Dag verbruik (kWh)	Nacht verbruik (kWh)	Weekend verbruik (kWh)	Totaal verbruik (kWh)	Aantal uur	Benodigd vermogen (kW)	Gerangschikt vermogen (kW)	Cumul. aantal uren	Bepaling grootste rechthoek (kWh)
Jan	17.306	5.827	7.615	30.748	744	41,33	43,40	672	29.162
Feb	17.269	5.288	6.605	29.162	672	43,40	42,31	1.416	59.917
Mrt	19.539	5.708	6.235	31.482	744	42,31	41,33	2.160	89.268
Apr	16.358	5.357	5.811	27.526	720	38,23	40,47	2.904	117.514
Mei	15.326	5.148	6.193	26.667	744	35,84	39,18	3.648	142.924
Jun	8.726	2.640	3.025	14.391	720	19,99	39,02	4.368	170.425
Jul	14.658	3.931	5.472	24.061	744	32,34	38,23	5.088	194.517
Aug	15.800	3.796	5.137	24.733	744	33,24	37,55	5.808	218.074
Sep	17.468	4.187	5.379	27.034	720	37,55	35,84	6.552	234.842
Okt	17.501	4.308	7.340	29.149	744	39,18	33,24	7.296	242.543
Nov	16.894	5.121	6.077	28.092	720	39,02	32,34	8.040	260.014
Dec	20.048	4.943	5.116	30.107	744	40,47	19,99	8.760	175.091
Totaal	196.893	56.254	70.005	323.152	8.760				

BIJLAGE 5: BEPALING VAN HET PERCENTAGE WKC, HET AANTAL WKC EN HUN INKOMSTEN (ZWEMBAD)

Maand	X (%)	Aantal certificaten	Inkomsten (€)
1-12	100,00%	38,03	1.027 €
13-24	100,00%	38,03	1.027 €
25-36	100,00%	38,03	1.027 €
37-48	100,00%	38,03	1.027 €
49	99,12%	37,70	1.018 €
50	98,24%	37,37	1.009 €
51	97,37%	37,03	1.000 €
52	96,49%	36,70	991 €
53	95,61%	36,36	982 €
54	94,73%	36,03	973 €
55	93,86%	35,70	964 €
56	92,98%	35,36	955 €
57	92,10%	35,03	946 €
58	91,22%	34,69	937 €
59	90,34%	34,36	928 €
60	89,47%	34,03	919 €
61	88,59%	33,69	910 €
62	87,71%	33,36	901 €
63	86,83%	33,03	892 €
64	85,95%	32,69	883 €
65	85,08%	32,36	874 €
66	84,20%	32,02	865 €
67	83,32%	31,69	856 €
68	82,44%	31,36	847 €
69	81,57%	31,02	838 €
70	80,69%	30,69	829 €
71	79,81%	30,35	820 €
72	78,93%	30,02	811 €
73	78,05%	29,69	802 €
74	77,18%	29,35	793 €
75	76,30%	29,02	784 €
76	75,42%	28,69	775 €
77	74,54%	28,35	765 €
78	73,66%	28,02	756 €
79	72,79%	27,68	747 €
80	71,91%	27,35	738 €

81	71,03%	27,02	729 €
82	70,15%	26,68	720 €
83	69,28%	26,35	711 €
84	68,40%	26,01	702 €
85	67,52%	25,68	693 €
86	66,64%	25,35	684 €
87	65,76%	25,01	675 €
88	64,89%	24,68	666 €
89	64,01%	24,34	657 €
90	63,13%	24,01	648 €
91	62,25%	23,68	639 €
92	61,38%	23,34	630 €
93	60,50%	23,01	621 €
94	59,62%	22,68	612 €
95	58,74%	22,34	603 €
96	57,86%	22,01	594 €
97	56,99%	21,67	585 €
98	56,11%	21,34	576 €
99	55,23%	21,01	567 €
100	54,35%	20,67	558 €
101	53,47%	20,34	549 €
102	52,60%	20,00	540 €
103	51,72%	19,67	531 €
104	50,84%	19,34	522 €
105	49,96%	19,00	513 €
106	49,09%	18,67	504 €
107	48,21%	18,34	495 €
108	47,33%	18,00	486 €
109	46,45%	17,67	477 €
110	45,57%	17,33	468 €
111	44,70%	17,00	459 €
112	43,82%	16,67	450 €
113	42,94%	16,33	441 €
114	42,06%	16,00	432 €
115	41,18%	15,66	423 €
116	40,31%	15,33	414 €
117	39,43%	15,00	405 €
118	38,55%	14,66	396 €
119	37,67%	14,33	387 €
120	36,80%	13,99	378 €

BIJLAGE 6: GEGEVENS WARMTEVRAAG EN BEREKENINGEN THERMISCHE JAARBELASTINGDUURCURVE (ZIEKENHUIS)

Periode	Warmte behoefte (kWh)	Aantal uren per periode	Benodigd vermogen (kW)	Gerangschikt vermogen (kW)	Cumulatief aantal uren	Bepaling grootste rechthoek (kWh)
Periode 1	579.258,00	696	832	872	840	732.556
Periode 2	543.498,08	672	809	832	1.536	1.278.362
Periode 3	491.857,52	672	732	809	2.208	1.785.779
Periode 4	304.538,85	672	453	732	2.880	2.107.961
Periode 5	216.962,42	744	292	727	3.552	2.581.703
Periode 6	181.053,32	768	236	503	4.392	2.210.645
Periode 7	183.719,34	744	247	453	5.064	2.294.918
Periode 8	183.938,13	768	240	312	5.736	1.789.093
Periode 9	209.600,82	672	312	292	6.480	1.889.673
Periode 10	422.800,97	840	503	247	7.224	1.783.856
Periode 11	488.430,32	672	727	240	7.992	1.914.106
Periode 12	732.556,35	840	872	236	8.760	2.065.139
totaal	4.538.214,09	8760				

BIJLAGE 7: BEPALING VAN HET PERCENTAGE WKC, HET AANTAL WKC EN HUN INKOMSTEN (ZIEKENHUIS)

Maand	X (%)	Aantal Certificaten	Inkomsten (€)
1-12	100,00%	202,72	5.473 €
13-24	100,00%	202,72	5.473 €
25-36	100,00%	202,72	5.473 €
37-48	100,00%	202,72	5.473 €
49	99,24%	201,17	5.432 €
50	98,48%	199,63	5.390 €
51	97,72%	198,09	5.348 €
52	96,96%	196,55	5.307 €
53	96,20%	195,00	5.265 €
54	95,43%	193,46	5.223 €
55	94,67%	191,92	5.182 €
56	93,91%	190,38	5.140 €
57	93,15%	188,84	5.099 €
58	92,39%	187,29	5.057 €
59	91,63%	185,75	5.015 €
60	90,87%	184,21	4.974 €
61	90,11%	182,67	4.932 €
62	89,35%	181,12	4.890 €
63	88,59%	179,58	4.849 €
64	87,83%	178,04	4.807 €
65	87,07%	176,50	4.765 €
66	86,30%	174,95	4.724 €
67	85,54%	173,41	4.682 €
68	84,78%	171,87	4.640 €
69	84,02%	170,33	4.599 €
70	83,26%	168,78	4.557 €
71	82,50%	167,24	4.516 €
72	81,74%	165,70	4.474 €
73	80,98%	164,16	4.432 €
74	80,22%	162,61	4.391 €
75	79,46%	161,07	4.349 €
76	78,70%	159,53	4.307 €
77	77,94%	157,99	4.266 €
78	77,17%	156,45	4.224 €
79	76,41%	154,90	4.182 €
80	75,65%	153,36	4.141 €
81	74,89%	151,82	4.099 €

82	74,13%	150,28	4.057 €
83	73,37%	148,73	4.016 €
84	72,61%	147,19	3.974 €
85	71,85%	145,65	3.933 €
86	71,09%	144,11	3.891 €
87	70,33%	142,56	3.849 €
88	69,57%	141,02	3.808 €
89	68,80%	139,48	3.766 €
90	68,04%	137,94	3.724 €
91	67,28%	136,39	3.683 €
92	66,52%	134,85	3.641 €
93	65,76%	133,31	3.599 €
94	65,00%	131,77	3.558 €
95	64,24%	130,22	3.516 €
96	63,48%	128,68	3.474 €
97	62,72%	127,14	3.433 €
98	61,96%	125,60	3.391 €
99	61,20%	124,06	3.349 €
100	60,44%	122,51	3.308 €
101	59,67%	120,97	3.266 €
102	58,91%	119,43	3.225 €
103	58,15%	117,89	3.183 €
104	57,39%	116,34	3.141 €
105	56,63%	114,80	3.100 €
106	55,87%	113,26	3.058 €
107	55,11%	111,72	3.016 €
108	54,35%	110,17	2.975 €
109	53,59%	108,63	2.933 €
110	52,83%	107,09	2.891 €
111	52,07%	105,55	2.850 €
112	51,31%	104,00	2.808 €
113	50,54%	102,46	2.766 €
114	49,78%	100,92	2.725 €
115	49,02%	99,38	2.683 €
116	48,26%	97,83	2.642 €
117	47,50%	96,29	2.600 €
118	46,74%	94,75	2.558 €
119	45,98%	93,21	2.517 €
120	45,22%	91,66	2.475 €

BIJLAGE 8: GEGEVENS WARMTEVRAAG EN BEREKENINGEN THERMISCHE JAARBELASTINGDUURCURVE (WOON- EN ZORGCENTRUM)

Periode	Spreidings gegevens COGENcalc (%)	Warmte behoefte (kWh)	Aantal uren per periode	Benodigd vermogen (kW)	Gerangschikt vermogen (kW)	Cumul. aantal uren	Bepaling grootste rechthoek (kWh)
Jan	13,53%	275.934	744	371	377	672	253.500
Feb	12,43%	253.500	672	377	371	1.416	525.165
Mrt	11,21%	228.619	744	307	354	2.160	765.573
Apr	8,97%	182.936	720	254	307	2.904	892.353
Mei	6,06%	123.589	744	166	305	3.624	1.106.578
Jun	4,49%	91.570	720	127	254	4.344	1.103.716
Jul	3,64%	74.235	744	100	204	5.088	1.039.054
Aug	3,62%	73.827	744	99	166	5.832	968.779
Sep	4,89%	99.728	720	139	139	6.552	907.523
Okt	7,45%	151.937	744	204	127	7.272	924.858
Nov	10,78%	219.850	720	305	100	8.016	799.823
Dec	12,93%	263.697	744	354	99	8.760	869.255
Totaal	100,00%	2.039.424	8760				

BIJLAGE 9: BEPALING VAN HET PERCENTAGE WKC, HET AANTAL WKC EN HUN INKOMSTEN (WOON- EN ZORGCENTRUM)

Maand	X (%)	Aantal certificaten	Inkomsten (€)
1-12	100,00%	108,50	2.929 €
13-24	100,00%	108,50	2.929 €
25-36	100,00%	108,50	2.929 €
37-48	100,00%	108,50	2.929 €
49	99,20%	107,63	2.906 €
50	98,40%	106,76	2.882 €
51	97,59%	105,89	2.859 €
52	96,79%	105,01	2.835 €
53	95,99%	104,14	2.812 €
54	95,19%	103,27	2.788 €
55	94,38%	102,40	2.765 €
56	93,58%	101,53	2.741 €
57	92,78%	100,66	2.718 €
58	91,98%	99,79	2.694 €
59	91,17%	98,92	2.671 €
60	90,37%	98,05	2.647 €
61	89,57%	97,18	2.624 €
62	88,77%	96,31	2.600 €
63	87,96%	95,44	2.577 €
64	87,16%	94,57	2.553 €
65	86,36%	93,70	2.530 €
66	85,56%	92,83	2.506 €
67	84,75%	91,96	2.483 €
68	83,95%	91,08	2.459 €
69	83,15%	90,21	2.436 €
70	82,35%	89,34	2.412 €
71	81,54%	88,47	2.389 €
72	80,74%	87,60	2.365 €
73	79,94%	86,73	2.342 €
74	79,14%	85,86	2.318 €
75	78,33%	84,99	2.295 €
76	77,53%	84,12	2.271 €
77	76,73%	83,25	2.248 €
78	75,93%	82,38	2.224 €
79	75,12%	81,51	2.201 €
80	74,32%	80,64	2.177 €
81	73,52%	79,77	2.154 €

82	72,72%	78,90	2.130 €
83	71,91%	78,03	2.107 €
84	71,11%	77,15	2.083 €
85	70,31%	76,28	2.060 €
86	69,51%	75,41	2.036 €
87	68,70%	74,54	2.013 €
88	67,90%	73,67	1.989 €
89	67,10%	72,80	1.966 €
90	66,30%	71,93	1.942 €
91	65,49%	71,06	1.919 €
92	64,69%	70,19	1.895 €
93	63,89%	69,32	1.872 €
94	63,09%	68,45	1.848 €
95	62,29%	67,58	1.825 €
96	61,48%	66,71	1.801 €
97	60,68%	65,84	1.778 €
98	59,88%	64,97	1.754 €
99	59,08%	64,09	1.731 €
100	58,27%	63,22	1.707 €
101	57,47%	62,35	1.684 €
102	56,67%	61,48	1.660 €
103	55,87%	60,61	1.637 €
104	55,06%	59,74	1.613 €
105	54,26%	58,87	1.590 €
106	53,46%	58,00	1.566 €
107	52,66%	57,13	1.543 €
108	51,85%	56,26	1.519 €
109	51,05%	55,39	1.495 €
110	50,25%	54,52	1.472 €
111	49,45%	53,65	1.448 €
112	48,64%	52,78	1.425 €
113	47,84%	51,91	1.401 €
114	47,04%	51,04	1.378 €
115	46,24%	50,16	1.354 €
116	45,43%	49,29	1.331 €
117	44,63%	48,42	1.307 €
118	43,83%	47,55	1.284 €
119	43,03%	46,68	1.260 €
120	42,22%	45,81	1.237 €

BRONNEN

Balat, M., Kirtay, E., & Balat, H. (2009). Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management*, 50(12), 3147-3157.

Brammer, J. G., Lauer, M., & Bridgwater, A. (2006). Opportunities for biomass-derived "bio-oil" in European heat and power markets. [Article]. *Energy Policy*, 34(17), 2871-2880.

Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. [Proceedings Paper]. *Chemical Engineering Journal*, 91(2-3), 87-102.

Bridgwater, A. V., Meier, D., & Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. [Proceedings Paper]. *Organic Geochemistry*, 30(12), 1479-1493.

Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1-73.

Bridgwater, A. V., Toft, A. J., & Brammer, J. G. (2002). A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(3), 181-246.

Bridgwater, T. (2007). Biomass pyrolysis. *Biomass & Bioenergy*, 31(4), VII-XVIII.

Ceulemans, R., De Ruyck, J., De Spiegeleer, E., Draeck, M., Laureysens, I., Van den Branden, S. (z.d.) *Biomassa*. Opgevraagd op 12 oktober, 2010, via http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_biomassa.pdf

Chemical Engineering (2011) *Economic Indicators*. Opgevraagd op 20 mei, 2011, via <http://www.che.com>

Chiaromonti, D., Oasmaa, A., & Solantausta, Y. (2007). Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1056-1086.

Coenen, J., Schlatmann, S. (2007). *Rentabiliteit biomassa WKK. Mogelijkheden tot verbetering*. SenterNovem/Cogen Projects. Opgevraagd op 14 maart, 2011, via http://refman.et-model.com/publications/552/download/Cogen_200705_Rentabiliteit%20biomassa%20WKK.pdf?1297827221

Cogen Vlaanderen (2004). *Wegwijzer 2004*. Opgevraagd op 10 oktober, 2010, via http://www.emis.vito.be/sites/default/files/brochures/WKK_wegwijzer___editie_2004.pdf

Cogen Vlaanderen. (2006). *Basishandboek warmtekrachtkoppeling*. Opgevraagd op 10 oktober, 2010, via http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk_basishandboekcogen.pdf.

Cogen Vlaanderen. (2010). *WKK wegwijzer 2010*. Opgevraagd op 5 januari, 2011, via [http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/wkkwegwijzer2010\(1\).pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/wkkwegwijzer2010(1).pdf)

Colby, J. L., Dauenhauer, P. J., & Schmidt, L. D. (2008). Millisecond autothermal steam reforming of cellulose for synthetic biofuels by reactive flash volatilization. *Green Chemistry*, 10(7), 773-783.

Daoud, I., Lebbe, Y. (2009) *Inleiding tot warmtekrachtkoppeling: voorstudie van een warmtekrachtkoppeling*. Opgevraagd op 10 mei 2011, via http://www.leefmilieubrussel.be/uploadedFiles/Contenu_du_site/Professionnels/Themes/L%C3%A9nergie/La_cog%C3%A9n%C3%A9ration/Les_outils/2_WKK_Brochure_mei%202006.pdf

De Somviele, B., Meiresonne, L. & Verdonckt, P. (2009). *Van Wilg tot Warmte. Potenties van Korteomloophout in Vlaanderen*. Vereniging voor Bos in Vlaanderen, Gontrode; Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel, Provinciaal Centrum voor Landbouw en Milieu, Roeselare. Opgevraagd op 5 november, 2010, via http://www.vbv.be/Van_Wilg_Warmte.pdf

Devriendt, N., Vanderstraeten, P. (2003) *Optimale valorisatie houtafval. Studie Vito in opdracht van ANRE*. Opgevraagd op 8 december 2010, via http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/biomassa_houtafval.pdf

Energie Overleggroep Staat-Gewesten ENOVER/CONCERE. (2010). Nationaal actieplan voor hernieuwbare energie overeenkomstig Richtlijn 2009/28/EG. Opgevraagd op 20 maart, 2011, via http://economie.fgov.be/nl/binaries/NREAP-BE-v25-NL_tcm325-112992.pdf

Energik. (2004). *Handboek Warmtekrachtkoppeling - Addendum 2004*. Opgevraagd op 7 december, 2010, via <http://www.energik.be/belcogen/index.html>

Europees Parlement en de Raad. (2001). *Europese richtlijn 2001/77/EG betreffende de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen op de interne elektriciteitsmarkt*. Opgevraagd op 12 oktober, 2010, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:283:0033:0040:NL:PDF>

Europees Parlement en de Raad. (2004). *Europese richtlijn 2004/8/EG inzake de bevordering van warmtekrachtkoppeling op basis van de vraag naar nuttige warmte binnen de interne energiemarkt*. Opgevraagd op 10 oktober, 2010, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0060:NL:PDF>

Europees Parlement en de Raad. (2009). *Europese richtlijn 2009/28/EG ter bevordering van het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen*. Opgevraagd op 12 oktober, 2010, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:nl:PDF>

Europese Commissie. (2008). *Europa kan meer energie besparen door warmtekrachtkoppeling*. Opgevraagd op 5 november, 2010, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0771:FIN:NL:PDF>

Europese Unie. (2011). *Wetgeving*. Opgevraagd op 5 mei, 2011, via http://ec.europa.eu/legislation/index_nl.htm

Federale regering. (2002). Koninklijk besluit van 16 juli 2002 betreffende de instelling van mechanismen voor de bevordering van elektriciteit opgewekt uit hernieuwbare energiebronnen. Opgevraagd op 15 oktober, 2010, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2002/08/23/77091.pdf>

FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie. (2010). *Gemiddelde prijzen van producten, diensten en productgroepen*. Opgevraagd op 12 februari, 2011, via http://economie.fgov.be/nl/modules/publications/statistiques/economie/prix_moyens_des_produits_services_et_groupes_de_produits.jsp

FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie. (2011). *Index Research*. Opgevraagd op 20 mei 2011, via http://economie.fgov.be/nl/statistieken/cijfers/economie/consumptieprijzen/consumptie_prijnsindexen/index_search/

Garcia, C.V., Mathijs, E., Nevens, F., Reheul, D. (2003). *Energiegewassen in de Vlaamse landbouwsector*. Steunpunt Duurzame Landbouw. Publicatie 1, 94p. Opgevraagd op 18 oktober, 2010, via http://www.ilvo.vlaanderen.be/Portals/9/Documents/Pub_stedula/stedula1.pdf

Geurds, M., Devriendt, N. (2006). *Bio-energie: omzetten van vaste biomassa in hernieuwbare warmte en elektriciteit*. Opgevraagd op 8 december 2010, via http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_bioenergie.pdf

Glick, B. R. (2003). Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. [Proceedings Paper]. *Biotechnology Advances*, 21(5), 383-393.

Goudswaard, P., Grift, J., de Jong, A., Koolwijk, E., Schlatmann, S., Steenbergen, P., van Gastel, M., de Visser, I. (2008) *Warmte en Kracht: WarmteKrachtKoppeling: een overzicht en leidraad*. Opgevraagd op 10 december, 2010, via http://www.gasterra.nl/kennisdeling/Documents/wkk-warmte_en_kracht.pdf

INBO. (2007) *Van snoeihout tot warmte: een gesloten cyclus*. Opgevraagd op 15 oktober, 2010, via <http://www.inbo.be/docupload/3648.pdf>

Infrax. (2011). *Calorische bovenwaarde aardgas*. Opgevraagd op 20 april, 2011, via <http://www.infrax.be/nl/over-infrax/energiesector/calorische-bovenwaarde-aardgas>

Informazout. (2011). *Eigenschappen van stookolie*. Opgevraagd op 15 april, 2011, via http://www.informazout.be/home/pdf_generate/cid/1037/

Isaac, P. R. D., Hayes, C. R., & Akers, R. K. (2010). Optimisation of water and energy use at the Wales National Pool. *Water and Environment Journal*, 24(1), 39-48.

Kajikawa, Y., & Takeda, Y. (2008). Structure of research on biomass and bio-fuels: A citation-based approach. [Article]. *Technological Forecasting and Social Change*, 75(9), 1349-1359.

Klok, T. (2009) Een duurzaam zwembad, een voorbeeld voor de samenleving, *VV+*, november 2009, 650-653

Koppolu, L., Agblevor, F. A., & Clements, L. D. (2003). Pyrolysis as a technique for separating heavy metals from hyperaccumulators. Part II: Lab-scale pyrolysis of synthetic hyperaccumulator biomass. *Biomass & Bioenergy*, 25(6), 651-663.

Kuppens, T., Thewys, T. (2009). *Methode voor de bepaling van de prijs voor korteomloophout uit fyto-remediatie*. Conference paper - unpublished

Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. [Review]. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr*, 3(5), 547-562.

Lebbe, Y. (2011). *Warmtekrachtkoppeling: basisbeginselen*. Opgevraagd op 11 mei, 2011, via http://www.icedd.be/downloads/data/110428_ENERGIE_EV_LEBBE1.pdf

Leefmilieu Brussel. (2007). *Benaderende studie van de rendabiliteit van een WKK*. Opgevraagd op 25 april, 2011, via http://www.ibgebim.be/uploadedFiles/Contenu_du_site/Professionnels/Themes/L%C3%A9nergie/La_cog%C3%A9n%C3%A9ration/Les_ouils/070723_energie_cogencalc_fr_nl.xls

Lewandowski, I., Clifton-Brown, J. C., Scurlock, J. M. O., & Huisman, W. (2000). Miscanthus: European experience with a novel energy crop. [Article]. *Biomass & Bioenergy*, 19(4), 209-227.

Lievens, C., Carleer, R., Cornelissen, T., & Yperman, J. (2009). Fast pyrolysis of heavy metal contaminated willow: Influence of the plant part. *Fuel*, 88(8), 1417-1425.

Lu, Q., Li, W. Z., & Zhu, X. F. (2009). Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. [Article]. *Energy Conversion and Management*, 50(5), 1376-1383.

Maggi, R., & Delmon, B. (1994). COMPARISON BETWEEN SLOW AND FLASH PYROLYSIS OILS FROM BIOMASS. *Fuel*, 73(5), 671-677.

Maher, K. D., & Bressler, D. C. (2007). Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals. [Review]. *Bioresource Technology*, 98(12), 2351-2368.

Mariaziekenhuis. (2011). *Over het Mariaziekenhuis*. Opgevraagd op 28 april, 2011, via <http://www.mznl.be/mariaziekenhuis.html?mariaziekenhuis>

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. [Review]. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46.

Mercken, R. (2004). *De investeringsbeslissing: een beleidsgerichte analyse. 1^{ste} editie*. Antwerpen – Apeldoorn: Garant.

Oasmaa, A., Peacocke, C., Gust, S., Meier, D., & McLellan, R. (2005). Norms and standards for pyrolysis liquids. End-user requirements and specifications. *Energy & Fuels*, 19(5), 2155-2163.

Ochelen, S., Putzeijs, B. (2008). *Milieubeleidskosten, begrippen en berekeningsmethoden*. Brussel: Departement Leefmilieu, Natuur en Energie. Opgevraagd op 8 december, 2010, via http://www.lne.be/themas/beleid/milieueconomie/downloadbare-bestanden/ME2_rapport%20Milieukosten.pdf

ODE Vlaanderen. (z.d.). *Bio-energie*. Opgevraagd op 16 november 2010, via <http://www.ode.be/bio-energie>

Onay, O., & Kockar, O. M. (2003). Slow, fast and flash pyrolysis of rapeseed. [Article]. *Renewable Energy*, 28(15), 2417-2433.

Peacocke, G. V. C., & Bridgwater, A. V. (1994). ABLATIVE PLATE PYROLYSIS OF BIOMASS FOR LIQUIDS. *Biomass & Bioenergy*, 7(1-6), 147-154.

Peeters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E. (2004). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5th Ed. New York: McGraw-Hill

Ringer, M., Putsche, V., Scahill, J. (2006). *Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis*. NREL, Golden. Opgevraagd op 10 oktober, 2010, via <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/37779.pdf>

Stals, M., Carleer, R., Reggers, G., Schreurs, S., & Yperman, J. (2010). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated hardwoods from phytoremediation: Characterisation of biomass, pyrolysis oil and char/ash fraction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1), 22-29.

Stals, M., Thijssen, E., Vangronsveld, J., Carleer, R., Schreurs, S., & Yperman, J. (2010). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated biomass from phytoremediation: Influence of temperature, entrained flow and wood/leaves blended pyrolysis on the behaviour of heavy metals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 87(1), 1-7.

Stroobandt, A. (2007). *WKK in zorginstellingen*. Opgevraagd op 19 februari, 2010, via http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/20071218_wkk_in_verzorgingssector.pdf

Thewys, T., & Kuppens, T. (2008). Economics of willow pyrolysis after phytoextraction. [Article]. *International Journal of Phytoremediation*, 10(6), 561-583.

Trianti-Stourna, E., Spyropoulou, K., Theofylaktos, C., Droutsas, K., Balaras, C. A., Santamouris, M., et al. (1998). Energy conservation strategies for sports centers: Part B. Swimming pools. *Energy and Buildings*, 27(2), 123-135.

Van den Berg, W.J., Wiersma, G. (2004). *Biomassketens energetisch en economisch vergeleken*. Opgevraagd op 20 oktober 2010, via http://www.knnadvies.nl/user_files/downloads/rapporten/Eindrapport.pdf

Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., et al. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. [Review]. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7), 765-794.

Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2010). Fast pyrolysis technology development. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr*, 4(2), 178-208.

Venendaal, R., Jorgensen, U., & Foster, C. A. (1997). European energy crops: A synthesis. *Biomass & Bioenergy*, 13(3), 147-185.

Vlaams Agentschap Zorg en Gezondheid. (z.d.). *Blootstellingsonderzoek Noorderkempen*. Opgevraagd op 19 oktober, 2010, via <http://dev.zorg-en-gezondheid.be/subMenuTabulation.aspx?id=6342>

Vlaams energieagentschap. (2011). *Verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen*. Opgevraagd op 18 april, 2011, via http://www.energiesparen.be/subsidies/subsidieregel_detail?id=1831&verstr=769&doelgroep=2

Vlaamse Regering. (1995). *Besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne, gewijzigd bij de besluiten van de Vlaamse regering van (...) (diverse data)*. Opgevraagd op 16 januari 2011, via <http://www.lne.be/themas/vergunningen/bestand/regelgeving/titel-ii-van-het-vlarem.pdf>

Vlaamse Regering. (2004). *Besluit van de Vlaamse Regering inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen*. Opgevraagd op 19 januari 2011, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2004/03/23/85951.pdf>

Vlaamse Regering. (2006). *Decreet van 19 mei 2006 houdende diverse bepalingen inzake leefmilieu en energie*. Opgevraagd op 15 november 2011, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2006/06/20/98642.pdf>

Vlaamse Regering. (2006a). *Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties*. Opgevraagd op 19 januari, 2011, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2006/12/01/101817.pdf>

Vlaamse Regering. (2006b). *Ministerieel besluit van 6 oktober 2006 inzake de vastlegging van referentierementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties*. Opgevraagd op 17 maart, 2011, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2006/12/01/102156.pdf>

Vlaamse Regering. (2009). *Decreet van 8 mei 2009 houdende algemene bepalingen betreffende het energiebeleid*. Opgevraagd op 19 januari, 2011, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2009/07/07/113589.pdf>

Vlaamse Regering. (2010a). *Besluit van de Vlaamse Regering van 17 december 2010 tot toekenning van steun aan ondernemingen voor ecologie-investeringen in het Vlaamse Gewest*. Opgevraagd op 19 april, 2011, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2011/01/28/118119.pdf>

Vlaamse Regering. (2010b). *Besluit van de Vlaamse Regering van 19 november 2010 houdende algemene bepalingen over het energiebeleid*. Opgevraagd op 17 maart, 2011, via <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2010/12/08/117665.pdf>

Voorspools, K. R., & D'Haeseleer, W. D. (2006). Reinventing hot water? Towards optimal sizing and management of cogeneration: A case study for Belgium. *Applied Thermal Engineering*, 26(16), 1972-1981.

VREG. (2007). *Mededeling van de Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt met betrekking tot het in mindering te brengen energieverbruik van de hulpdiensten, de voorbehandeling en het transport in de berekening van het aantal toe te kennen groenestroomcertificaten voor elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen, gewijzigd op 18 december 2007 en op 9 maart 2009*. Opgevraagd op 19 november, 2010, via <http://www.vreg.be/sites/default/files/mededelingen/mede-2007-1.pdf>

VREG. (2011a). *Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten en gemiddelde prijs*. Opgevraagd op 25 april, 2011, via <http://www.vreg.be/sites/default/files/uploads/documenten/Statistieken/verhandelde-wkk.pdf>

VREG. (2011b). *Aantal bilateraal verhandelde groenestroomcertificaten en gemiddelde prijs*. Opgevraagd op 26 april, 2011, via <http://www.vreg.be/sites/default/files/uploads/gscbilaterale/transacties.pdf>

VREG. (2011c). *Soorten meters*. Opgevraagd op 20 april, 2011, via <http://www.vreg.be/soorten-meters-0>

VREG. (2011d). *Financiële aspecten*. Opgevraagd op 17 april, 2011, via <http://www.vreg.be/financiele-aspecten>

Yaman, S. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. [Review]. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 651-671.

Zhang, L. H., Xu, C. B., & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. [Article]. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969-982.

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Het gebruik van pyrolyse-olie in warmtekrachtkoppeling, een haalbare kaart in de Kempen? Drie gevalstudies: zwembad, ziekenhuis en woon- en zorgcentrum

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-technologie-, innovatie- en milieumanagement**

Jaar: **2011**

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,

Faes, Bea