

**STUDIE
OPTIMALE ENERGETISCHE
VALORISATIE
VAN HOUTAFVAL**

Eindrapport

N. Devriendt, P. Vanderstraeten

Uitgevoerd in opdracht van ANRE

2003/ETE/R/158

Vito

November 2003

MANAGEMENTSAMENVATTING

Houtafval is een belangrijke groene stroom met een aanzienlijke energie-inhoud in Vlaanderen. Een optimale benutting van dit energetisch potentieel kan dan ook een aanzienlijke bijdrage leveren tot de vermindering van de broeikasgassen (Kyoto-protocol) en het behalen van het beoogde percentage van 6% groene stroom in 2010.

Het doel van deze studie is een goed inzicht te krijgen in de verschillende mogelijkheden van energetische valorisatie van houtafval zowel rekening houdend met de technologisch, economische als wetgevende aspecten. Zowel voor overheden als voor privé-bedrijven, kan deze studie een overzicht geven van de mogelijke oplossingen om tot een invulling te komen van het potentieel van energetische benutting van houtafval.

In een eerste deel wordt een overzicht gegeven van mogelijke technologieën voor energetische valorisatie van houtafval met specifieke kenmerken en voor- en nadelen. Klassieke conversiesystemen maar ook veelbelovende nieuwe systemen komen aan bod. Vervolgens worden deze technologieën geëvalueerd op energetische efficiëntie, voornamelijk de WKK-installaties worden van nabij bekeken in het kader van de toekomstige WKK-certificaten. Een bijkomend energetisch aspect dat besproken wordt is dat houtafval als brandstof wordt vergeleken met andere fossiele brandstoffen.

De verschillende technieken worden in een volgend hoofdstuk ook economisch doorgelicht. De belangrijkste factoren die de kost van deze installaties bepalen, worden toegelicht. In een theoretisch voorbeeld worden installaties voor warmte-, elektriciteit- en WKK-productie naast elkaar gezet en besproken.

Een laatste hoofdstuk beschrijft de huidige inzet van houtafval voor energetische valorisatie. Een technisch potentieel en bijhorend CO₂-reductiepotentieel naar de toekomst toe worden berekend. Daarnaast worden de stimulerende beleidsmaatregelen voor het benutten van houtafval voor energetische valorisatie onder de loep genomen en geëvalueerd. Tot slot van dit hoofdstuk worden de verschillende hindernissen die op de weg van energetische valorisatie van houtafval liggen, kort samengevat.

De belangrijkste besluiten van deze studie kunnen als volgt worden samengevat:

Technologisch en energetisch:

Op zuiver technologisch vlak komt naar voor dat voor energetische valorisatie van houtafval een stoom- of warm water ketel de techniek is met de grootste betrouwbaarheid. Stoom wordt zowel gebruikt voor de warmtetoepassingen als voor elektriciteitsopwekking. Elektriciteitsproductie met stoom in kleine installaties is economisch (nog) niet interessant. Het onderzoek heeft zich dan ook toegespitst naar andere mogelijke technieken om aan elektriciteitsproductie te doen. Zo lijken vergassing met valorisatie in gasmotoren of gasturbines, ORC en Stirling veelbelovende technieken, het prijskaartje dat eraan vast hangt is echter nog zeer hoog en niet lager dan bij stroomproductie uit stoom.

De productie van elektriciteit alleen op basis van 100% hout is vanuit energetisch oogpunt ongunstig (omwille van de vereiste gematigde stoomcondities omwille van gevaar voor

slakvorming en corrosie). Bij biomassacentrales op basis van 100% hout cfr. de EPON centrale bij Cuyck, wordt uitgegaan van 25 tot max. 30% elektrisch rendement bij uitsluitend elektriciteitsproductie. De gesubstitueerde hoeveelheid aardgas bij houtcentrales ligt laag en bedraagt slechts 0,5 tot 0,6 GJ per GJ houtbrandstof.

Bij directe of indirecte co-verbranding van hout in een steenkoolcentrale is het elektrisch rendement ruim hoger (ca. 35%) ten opzichte van mono-verbranding van houtafval. Mono-verbranding van houtafval voor warmteproductie scoort beter t.o.v. co-verbranding in steenkoolcentrales op basis van de aangenomen rendementen. Wanneer rekening gehouden wordt met de stabiele continue benutting van het houtafval bij co-verbranding in steenkoolcentrales ten opzichte van de meer variabele benutting voor gebruik van warmte, dan kunnen beide als praktisch gelijkwaardig ingeschat worden.

Toepassing van WKK op basis van houtafval scoort energetisch het hoogst. Toch moet hierbij opgemerkt worden dat de gesubstitueerde hoeveelheid aardgas per eenheid brandstofenergie van ongeveer 1,0 laag is ten opzichte van WKK op basis van aardgas waarmee 1,3 kan gerealiseerd worden. De reden hiervoor berust voornamelijk bij de beperkte stoomcondities en het resulterend laag elektrisch rendement. Wanneer de warmte/krachtfractie daalt, dan zal de primaire energiebesparing eveneens dalen.

Het decreet voor kwalitatieve WKK is opgesteld uitgaande van een WKK op aardgas. Uit bovenstaande berekeningen kan duidelijk afgeleid worden dat een aanzienlijke relatieve primaire energiebesparing realiseren conform het WKK-decreet niet eenvoudig is met houtafval. Enkel een tegendrukturbine en een gasturbine kunnen tot een primaire energiebesparing komen van 5% met proceswarmte vb. met stoom of oververhit water. Voor ruimteverwarming kan theoretisch gemakkelijker 5% PEB gerealiseerd worden, maar ook hier is de marge klein binnen gegeven randvoorwaarden. In praktijk stelt zich bij verwarming het probleem van de schommelende (vnl. seizoensgebonden) warmtevraag met als gevolg een beperkte benutting van laagtemperatuur warmte.

De oorzaken van de (voorlopig) lage rendementen zijn afhankelijk van de gebruikte techniek. De meest gebruikte methode voor WKK met hout is een klassieke verbrandingsketel met stoomproductie, gevolgd door een stoomturbine of stoommotor. Hierbij spelen het lagere ketelrendement en de beperkte stoomcondities een rol. Een stoommotor is enkel bruikbaar in de kleinere ranges (tot 2 MWel) en inherent hierbij zijn ook lagere efficiënties. Dit bemoeilijkt het nog eens om de kaap van 5% PEB te halen.

Andere meer innovatievere technieken voor een WKK op hout zijn een gasmotor, een gasturbine, ORC en een Stirling motor. Deze technieken beogen voornamelijk elektriciteitsproductie (direct of indirect) zonder omweg over stoom, maar hierbij stellen zich andere problemen. Een gasmotor heeft een vrij goed elektrisch rendement maar de laagwaardige warmte die vrijkomt bij een gasmotor is slechts beperkt bruikbaar wat een negatief effect heeft op het thermisch rendement. Bij een gasturbine zijn er betere mogelijkheden voor WKK. De productie van geschikt stookgas zowel voor de gasmotor als de gasturbine is evenwel nog problematisch: bij vastbed vergassers is een uitgebreide stookgasreiniging vereist omwille van het hoog gehalte teerachtigen, bij wervelbed vergassing stelt zich het probleem van stookgasreiniging minder maar de economische kost is hoger zodat dit alleen voor hogere vermogens in aanmerking komt.

Een ORC-cyclus bevat een secundaire kringloop met een geschikt organisch medium (lage verdampings-temperatuur en –druk) waardoor elektriciteit kan geproduceerd worden uit relatief lage temperatuurswarmte. De bijkomende kringloop heeft een negatieve invloed op de PEB. Bijkomende beperking is dat een ORC slechts voor kleine vermogens haalbaar is. Een Stirling-motor biedt voordelen naar direct gebruik van energie maar de combinatie van houtafval en Stirling-motoren is nog volop in ontwikkeling, ook hierbij speelt het feit dat Stirling motoren maar voor kleine vermogens gebruikt kunnen worden. De gasturbines voor vaste brandstof hebben op lange termijn waarschijnlijk belangrijke voordelen maar deze zijn nog volop in ontwikkeling en het zal nog even duren eer deze technologie marktrijp is.

Naast de beperkte ervaring en het klein aantal draaiuren dat men met deze innovatieve technieken heeft, is er een bijkomend probleem dat zich op korte termijn stelt nl. dat de huidige demo- en pilootprojecten bijna uitsluitend zijn uitgetest op onbehandelde, niet-verontreinigde houtstromen. Voor de onbehandelde houtstromen zal er binnenkort een keuze zijn tussen verschillende technieken, voor behandelde stromen blijft dit beperkt tot ofwel verbranding in een warm water/stoom ketel met stoommotor of –turbine ofwel verbranding in een thermische olietel met ORC (verontreinigde stromen geen probleem).

Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van een verhoogde elektrische efficiëntie (verhoogde stoomcondities, gasturbine, gasturbine voor vaste brandstof), kleinschalige stroomproductie (ORC, Stirling) en nieuwe evoluties op het gebied van warmtetoepassingen (tri-generatie, koude-warmte opslag) zullen een WKK-installatie op houtafval vooruit helpen. Niettegenstaande de 5% relatieve PEB moeilijk haalbaar is bij energetische valorisatie van hout, blijft een WKK-toepassing de meest optimale energetische benutting van het hout en draagt dit het meest bij tot reductie van de CO₂-uitstoot. Toepassing van WKK moet dan ook verder gestimuleerd worden bij energetische valorisatie van houtafval, voornamelijk bij de houtindustrie met behoefte aan proceswarmte (spaanplaatindustrie).

Economisch

De verschillende mogelijkheden voor energetische valorisatie van houtafval werden in deze studie uitgezet in dit diagram van dimensieloze kosten. Bij de productie van warmte en/of stoom bleek voornamelijk het aantal draaiuren per jaar cruciaal te zijn voor de economische haalbaarheid. Bij elektriciteitsproductie door co-verbranding is de brandstofkost een belangrijke parameter aangezien in de brandstofkost ook de verzamel- en transportkosten verrekend zijn. Elektriciteitsproductie in een ‘fuel dedicated’ centrale en een WKK-installatie is in de gegeven omstandigheden economisch ongunstig. Zelfs met maatregelen die door de overheid genomen of gepland zijn zoals ecologiesteun, groenestroomcertificaten en WKK-certificaten leidt dit nog niet naar gunstige scenario’s. Bij ‘fuel dedicated’ elektriciteitscentrales kan een lichte stijging van de groenestroomprijs, een daling van de brandstofprijs of een daling in productiekost het tij al keren. Een verder stimulering van ‘fuel dedicated’ elektriciteitscentrales op basis van houtafval is evenwel niet gerechtvaardigd omwille van de lage energetische efficiëntie van dergelijke installaties. Voor WKK-installaties brengt enkel een daling in productiekost (mogelijk bij hogere vermogens) of een serieuze stijging in stroomvergoeding een oplossing.

Om de energetisch meest optimale oplossing (WKK) te stimuleren zijn reeds verschillende stappen in de goede richting gezet maar is het financiële plaatje nog niet rond. Aan de

kostprijs van technologie en met de ondersteunende maatregelen zal verder aandacht moeten besteed worden.

Omvang en potentieel

Houtafval is qua omvang een belangrijke stroom. Dit blijkt uit onderstaande tabel waarin de omvang en de oorsprong van verschillende houtafvalstromen worden samengevat volgens het duurzaamheidsscenario (voor verdere toelichting zie hoofdstuk 5).

	Totaal	Hergebruik/ recyclage	Energetische valorisatie binnen de houtsector	Energetische valorisatie buiten houtsector	Verbranding in huisvuilverbrand- ingsinstallatie	Storten	Illegale verbranding bij particulieren
2001							
Houtafval	1.456	668	400	127	35	105	116
Houtsector	820	350	400	70			
Eindgebruikers (selectief ingezamelde fractie)	407	313	0	57	0	21	16
Huishoudens	97	74		14		5	4
Industriële sectoren	310	239	0	43	0	16	12
Eindgebruikers (niet selectief ingezamelde fractie)	225	5	0	0	35	85	100
Huishoudens	125	5			15	5	100
Industriële sectoren	100				20	80	
2008							
Houtafval	1591	734	400	350	87	0	20
Houtsector	930	440	400	90			
Eindgebruikers (selectief ingezamelde fractie)	554	294	0	260	0	0	0
Huishoudens	177	85		92			
Industriële sectoren	377	209	0	168	0	0	
Eindgebruikers (niet selectief ingezamelde fractie)	107	0	0	0	87	0	20
Huishoudens	60				40	0	20
Industriële sectoren	47				47	0	

Er wordt geschat dat in 2001 ongeveer 75 GWh/jaar elektriciteit en 1500 GWh/jaar warmte worden opgewekt met houtafval. Het technisch potentieel ligt duidelijk hoger, zeker in de toekomst waarbij de te storten fractie zal worden beperkt.

Indien wordt verondersteld dat in 2008 een totaal van 53 098 GWh elektriciteit zal verbruikt worden in Vlaanderen en dat 4.5% hiervan groene stroom moet zijn, is er 2389 GWh groene stroom nodig. Wanneer alle houtafval in 2008 omgezet wordt naar elektriciteit wordt er 866 tot 917 GWh groene stroom geproduceerd, dit is 36-38% van de totale benodigde hoeveelheid. Indien alles naar WKK wordt omgezet kan er 15-16% van de totale groene stroom met houtafval bekomen worden.

Afhankelijk van de vorm van valorisatie zal het CO₂-besparingspotentieel in 2008 zich volgens eerste schattingen situeren tussen 700 en 1000 kton/jaar.

INHOUDSTAFEL

1. Inleiding.....	9
2. Technische aspecten	10
2.1 Omzettingsprocessen.....	10
2.2 Basisprincipes van thermische conversietechnieken.....	12
2.2.1 Verbranding.....	12
2.2.2 Vergassing	17
2.2.3 Pyrolyse	22
2.3 Elektriciteit en warmteproductie.....	25
2.3.1 Energieproductie uitgaande van stoom.....	27
2.3.2 Energieproductie uitgaande van een brandbaar gas	30
2.3.3 Energieproductie uitgaande van een organisch fluïdum	35
2.3.4 Energieproductie uitgaande van warmte.....	38
2.4 Besluit	44
3 Energetische aspecten.....	48
3.1 Bespreking van de mogelijke energiedragers voor houtafval.....	48
3.1.1 Benutting van biomassa/houtafval voor productie van enkel warmte (W/K= ∞).....	48
3.1.2 Benutting van houtafval voor de productie van uitsluitend elektriciteit (W/K=0).....	49
3.1.3 Benutting van biomassa/houtafval voor de gecombineerde productie van warmte en elektriciteit: WKK (W/K >0 en < ∞).....	50
3.2 Kwalitatieve WKK.....	52
3.3 Evaluatie van energetische omzettingsrendementen van hout t.o.v. andere fossiele brandstoffen	55
3.4 Evaluatie van 5% relatieve primaire energiebesparing bij WKK-systemen met hout.....	60
3.4.1 Stoomturbine.....	60
3.4.2 Stoommotor.....	69
3.4.3 Gasmotor.....	69
3.4.4 Gasturbine.....	70
3.4.5 ORC	71
3.4.6 Stirling-motor.....	75
3.4.7 Gasturbine voor vaste brandstoffen	75
3.5 Besluit.....	76
4 Economische aspecten	81
4.1 Inleiding	81
4.2 Dimensieloze kosten	81
4.3 Economische gevoeligheid in functie van de kosten en opbrengsten.....	84
4.3.1 Factoren die invloed hebben op brandstofprijzen.....	84
4.3.2 Factoren die invloed hebben op stroom/warmteprijzen	87
4.3.3 Factoren die invloed hebben op productiekost	89
4.4 Vergelijking tussen installaties met warmte/stoomproductie, WKK- productie of elektriciteitsproductie door mono- of co-verbranding	105
4.4.1 Besluit	109
4.5 Besluit	111

5	Situatie en potentieel voor energetische valorisatie van houtafval in Vlaanderen ...	112
5.1	Aanbod van houtafval in Vlaanderen.....	112
5.1.1	Productieafval van houtverwerkende industrie	112
5.1.2	Houtafval van bedrijven.....	113
5.1.3	Houtafval van huishoudens	113
5.2	Vlaamse verwerkingscapaciteit voor houtafval	114
5.2.1	Hergebruik.....	115
5.2.2	Materiaalrecyclage.....	116
5.2.3	Thermische verwerking.....	116
5.2.4	Storten	117
5.3	Prognoses van aanbod en verwerking van houtafval in Vlaanderen	118
5.4	Technisch potentieel voor energetische valorisatie.....	122
5.5	CO ₂ -reductiepotentieel.....	125
5.6	Evaluatie beleidsmaatregelen	128
5.6.1	Groenestroomcertificaten	128
5.6.2	WKK-certificaten.....	130
5.6.3	Ecologiesteun	132
5.6.4	Investeringsaftrek.....	134
5.7	Hindernissen voor de industrie	134
5.7.1	Technologische hindernissen.....	134
5.7.2	Economische hindernissen.....	136
5.7.3	Wetgevende hindernissen	137
5.7.4	Praktische hindernissen.....	137
5.7.5	Slot matrix	138
5.8	Besluit	140
6	Algemeen besluit	141

1. INLEIDING

Terminologie: In deze studie worden de mogelijkheden onderzocht voor energetisch valorisatie van houtafval. Het houtafval waar we het in deze studie over zullen hebben is het industriële houtafval ook resthout genoemd, het houtafval van bedrijven en het houtafval van huishoudens. Een groot deel van het industrieel houtafval ontstaat in de houtverwerkende industrie (spaanplaat, meubel, schrijnwerkerijen). In tegenstelling tot houtafval uit bosontginning of zagerijen (wat meestal natuurlijk houtafval is), kan industrieel houtafval een zekere verontreiniging vertonen vanwege het gebruik van o.a. plaatmateriaal met PVC-bedekking, vanwege een oppervlaktebehandeling voor bescherming of versiering (vb. beitsen, verven). Het houtafval van bedrijven bestaat voornamelijk uit bouw- en sloophout, meubilair en verpakkingen. Het houtafval van huishoudens komt vrij onder de vorm van bouw- en sloophout, meubilair en tuinhout.

Een belangrijk deel van het houtafval, voor zo ver het niet geschikt is voor materiaalrecycling (vb. naar de spaanplaatindustrie) en niet te zeer verontreinigd is (zodanig dat verwerking in een afvalverbrandingsinstallatie niet noodzakelijk is), is een interessante brandstof voor energetische valorisatie in stookinstallaties omwille van het feit dat het hoogcalorisch afval is en bovendien CO₂ neutraal. Houtafval wordt dan ook reeds intensief toegepast voor energieopwekking via klassieke conversiesystemen voor productie van:

- Proceswarmte (onder vorm van stoom, oververhit water, thermische olie)
- Verwarming (met warm water of warme lucht)
- Elektriciteit (of mechanische energie - via stoom)
- WKK (gecombineerde productie van elektriciteit en warmte)

Bij de klassieke conversiesystemen wordt bijna steeds beroep gedaan op verbranding. Voor de productie van proceswarmte is dit meestal mono-verbranding, bij elektriciteitsproductie betreft het meestal meeverbranding of bijstook (met voorafgaande vergassing van het houtafval en bijstook van het stookgas in specifieke branders naast poederkoolbranders). Door de promotie en ondersteuning van groene stroom in het EU-beleid groeit het aantal WKK installaties sterk vnl. in Duitsland en vnl. in de spaanplaatindustrie daar deze een aanzienlijke behoefte heeft aan proceswarmte. In dergelijke installaties wordt hoofdzakelijk houtafval verbrand (eventueel aangevuld met een andere brandstof), waarbij naast industrieel houtafval van het spaanplaatbedrijf ook meer verontreinigd (gebruikt) houtafval aangewend wordt. Productie van proceswarmte (al dan niet met WKK) gebeurt meestal decentraal – bij/door het bedrijf met warmtebehoeften -, productie van enkel elektriciteit gebeurt centraal.

Naast de klassieke conversiesystemen zijn er een aantal geavanceerde systemen in de ontwikkelings- (al dan niet vergevorderd) of demonstratiefase en deze worden hierna kort besproken voor zover relevant.

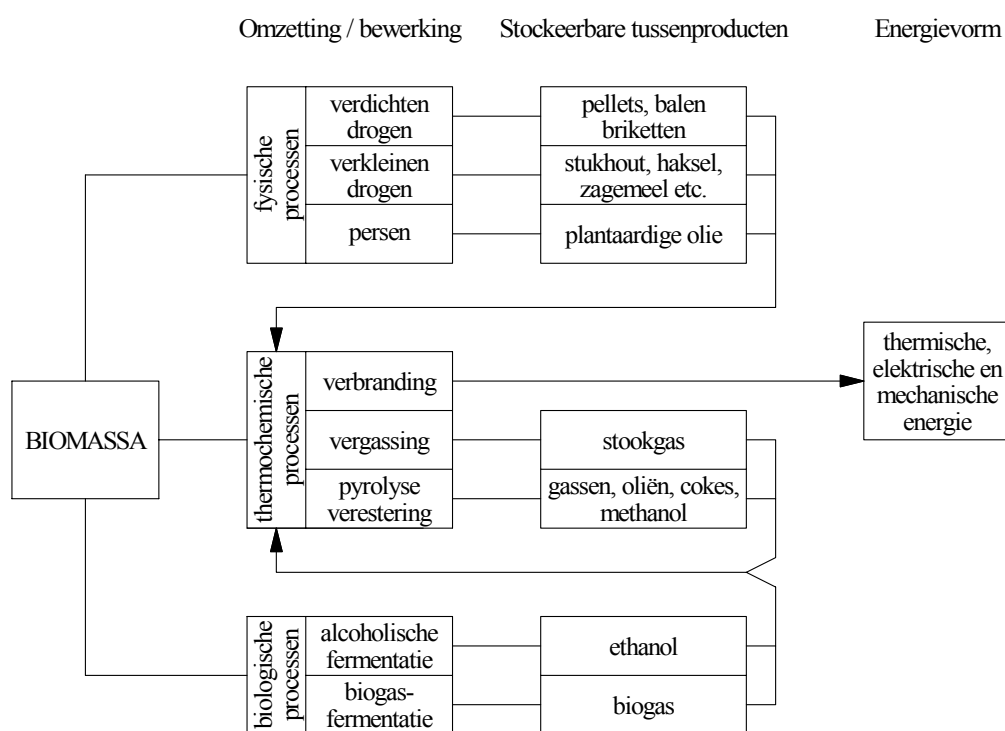
Bij de hierboven geschetste situatie stelt zich de vraag: wordt de beschikbare stroom houtafval energetisch optimaal ingezet. En zoniet wat zijn hiervoor de belangrijkste oorzaken in Vlaanderen. Deze vraag staat centraal in de studie.

2. TECHNISCHE ASPECTEN

In dit hoofdstuk zullen de technieken besproken worden om houtafval om te zetten naar energie. Dit proces kan opgesplitst worden in twee fases nl. de omzetting van het hout naar warme lucht, een stookgas of een olie. In een tweede fase worden deze energiedragers omgezet naar elektriciteit en/of proceswarmte en/of warm water. Zowel de klassieke methodes als de meer innovatieve technieken die op de rand van commercialisatie staan worden hierna besproken.

2.1 Omzettingsprocessen

Een algemeen schematisch overzicht van beschikbare conversietechnieken voor organisch-biologische stoffen wordt gegeven in *Figuur 1*.



Figuur 1: Schematische voorstelling van thermische processen voor energiewinning uit organisch-biologische stoffen (ref.1)

Deze verschillende processen kunnen tot volgende basisprocédés teruggebracht worden:

1. **Verbranding:** Organisch-biologische stoffen worden bij een temperatuur tussen de 800°C en 1300°C (maximum wordt bepaald door het smeltpunt van de assen) verbrand. De warmte die vrijkomt en afgegeven wordt aan een medium, wordt omgezet in mechanische arbeid, elektriciteit of nuttige warmte in een stoommotor, een stoomturbine, een Stirlingmotor of ORC of gewoon gebruikt als nuttige warmte.
2. **Vergassing:** De biomassa wordt vergast op een temperatuur tussen de 700°C en 900°C en met een geringere luchtvermaat dan bij verbranding. Het stookgas wordt vervolgens ofwel verbrand in een verbrandingsmotor of gasturbine, ofwel in een

verbrandingskamer waar het de warmte afgeeft aan een medium die op zijn beurt een stoomturbine of Stirlingmotor aandrijft, ofwel wordt het gas omgezet naar een transporteerbare brandstof vb. methanol.

3. Pyrolyse: De biomassa wordt bij een temperatuur tussen de 350°C en 700°C omgezet naar pyrolyse-olie, pyrolyse-gas en een restant vaste stof, dit bij een zeer kleine hoeveelheid luchtvermaat. De pyrolyse-olie kan dan gebruikt worden in een dieselmotor of gasturbine of kan als grondstof dienen voor petrochemie.
4. Vloeibaar maken van biomassa: Onder hoge druk (100-200 bar) wordt biomassa bij een temperatuur van 250°C tot 350°C met behulp van een katalysator of door omestering en extractie omgezet in een vloeibare brandstof.
5. Vergisting: Biomassa wordt bij een lage temperatuur (<100°C) via bacteriële weg afgebroken tot biogas met ca. 50 tot 60% methaan. Nog een andere manier is gebruik te maken van schimmels om de biomassa om te zetten in ethanol. Zowel biogas als ethanol kunnen gebruikt worden in verbrandingsmotoren.

Verbranding, vergassing, pyrolyse en productie van vloeibare brandstof gebeuren bij hoge temperatuur en worden omschreven als thermo-chemische processen. Onderling verschillen deze processen enerzijds omwille van de omzettingstemperatuur en anderzijds door de hoeveelheid gebruikt oxidatiemiddel. Dit wordt aangegeven aan de hand van de luchtfactor λ (λ):

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

In onderstaande *Tabel 1* worden deze parameters voor de verschillende processen weergegeven:

Tabel 1: Luchtfactor en eindproductsamenstelling met calorische onderwaarde H_u voor de verschillende thermo-chemische omzettingsprocessen (ref. 2).

Proces	Luchtfactor [-]	Temperatuur [°C]	Druk [bar]	Eindproduct		
				Gas	Vloeistof	Vast
Verbranding	$\lambda > 1$	800 – 1300	1 – 30	$H_u = 0$	-	$H_u = 0$
Vergassing	$0.2 < \lambda < 0.5$	700 - 900	1 – 30	$H_u > 0$	-	$H_u \geq 0$
Pyrolyse	$\lambda = 0; \lambda < 0.2^*$	400 – 700	1 – 30	$H_u \geq 0$	$H_u > 0$	$H_u \geq 0$
Vloeibaar maken	$\lambda = 0$	250 - 350	100 - 200	-	$H_u > 0$	$H_u \geq 0$

* Pyrolyse gebeurt zonder luchttoevoer volgens de strikte definitie, in de praktijk wordt er soms bij pyrolyse gewerkt met beperkte luchttoevoer.

Het vloeibaar maken van hout zal in de verdere studie niet meer aan bod komen daar het in de context van deze studie minder relevant is en eigenlijk een variant is van pyrolyse.

Naast een thermochemische omzetting van biomassa kan er ook bij een lagere temperatuur met behulp van bacteriën resp. schimmels via biochemische weg een omzetting plaatsvinden. In de biochemische omzetting maakt men een onderscheid in anaërobe vergisting, aërobe compostering of ethanol productie. Anaërobe vergisting gebeurt vooral bij organisch-biologische stoffen met een hoog watergehalte. Aërobe compostering daarentegen heeft een zeer trage reactietijd en er kan enkel lage temperatuurswarmte gebruikt worden. Productie van ethanol tenslotte wordt toegepast

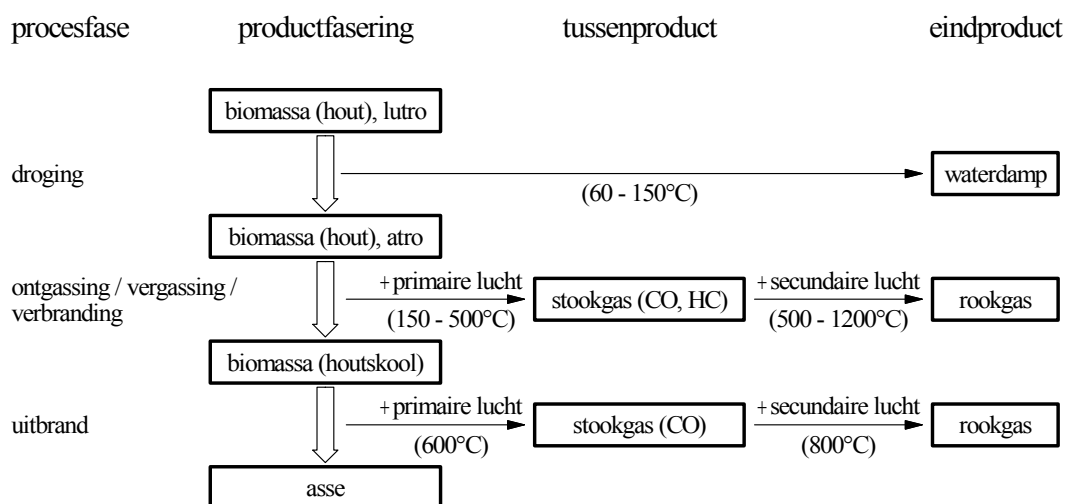
bij stoffen met een hoog suiker gehalte. De biochemische weg zal in het vervolg van deze studie dan ook niet verder uitgewerkt worden wegens niet van toepassing op hout (gering watergehalte, weinig suikers).

2.2 Basisprincipes van thermische conversietechnieken

2.2.1 Verbranding

Verbranding onderscheidt zich principieel van vergassing door de overstoëchiometrische luchttoevoer en de daaruit volgende quasi volledige omzetting van de organische fractie tot CO₂ en H₂O.

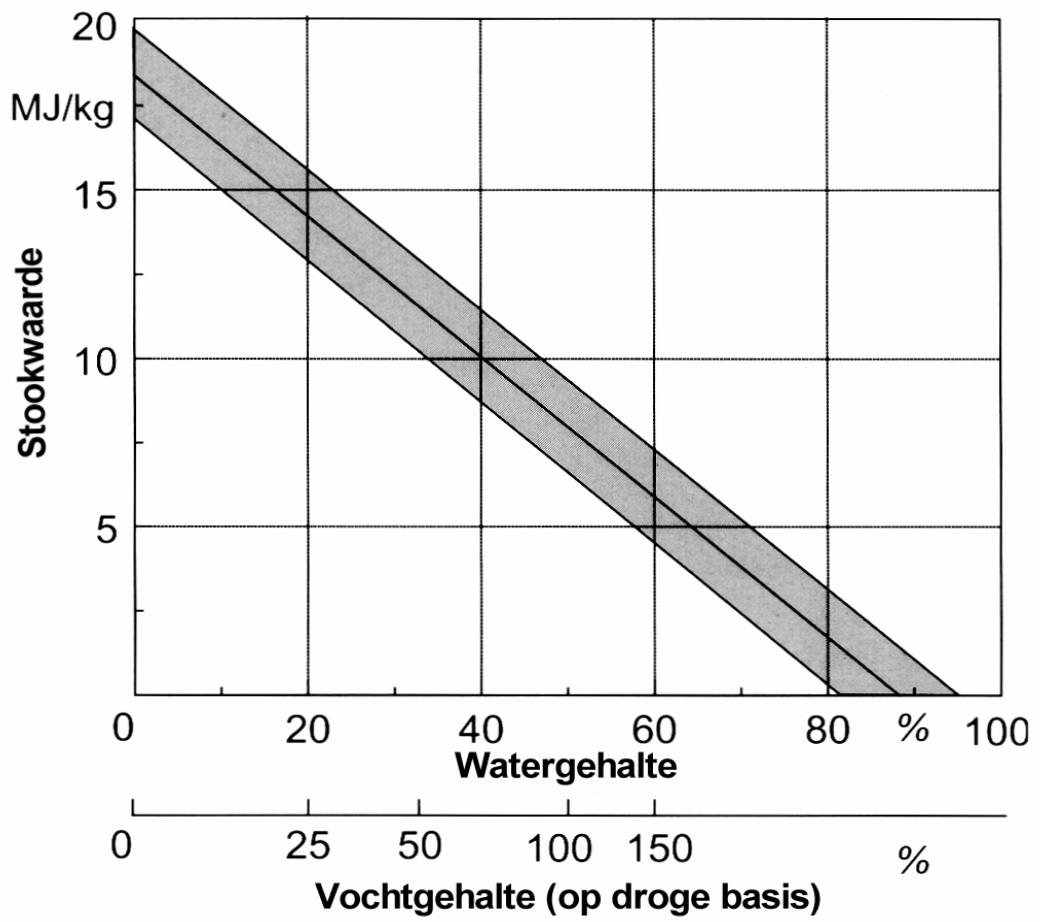
Het verloop van het verbrandingsproces wordt schematisch weergegeven in *Figuur 2*, waarbij vier deelprocessen kunnen onderscheiden worden: droging, ontgassing, vergassing en oxidatie (verbranding).



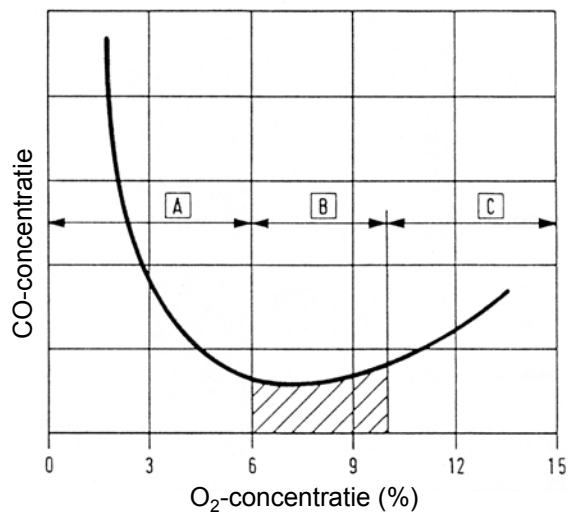
Figuur 2: Schema van het verbrandingsproces (ref. 3)

Bij verbrandingsprocessen verlopen deze vier deelprocessen gelijktijdig in dezelfde ruimte, namelijk de verbrandingskamer of vuurhaard. Voor het verbrandingsproces is de instelling van de luchtfactor de meest belangrijke parameter en daarbij horende de verdeling primaire/secundaire luchtverdeling.

Bij te lage luchtfactor λ (<1) is de verbranding onvolledig met als gevolg massale emissies van CO en koolwaterstoffen waaronder PAK's. Bij te hoge luchtfactor (>2) daalt de verbrandingstemperatuur in de vuurhaard onder een kritische waarde van ongeveer 800 °C vanwege de grote hoeveelheid ballastlucht (d.i. tevens afhankelijk van het vochtgehalte van de brandstof, deze kan bij hout sterk uiteenlopende waarden aannemen en de invloed ervan op de verbrandingswaarde wordt gegeven in *Figuur 3*). Bij een verbrandingstemperatuur < 800 °C wordt de omzetting van CO naar CO₂ sterk vertraagd, hierdoor treedt geen volledige verbranding meer op en stijgt de CO-emissie opnieuw. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van *Figuur 4a* en *b*.

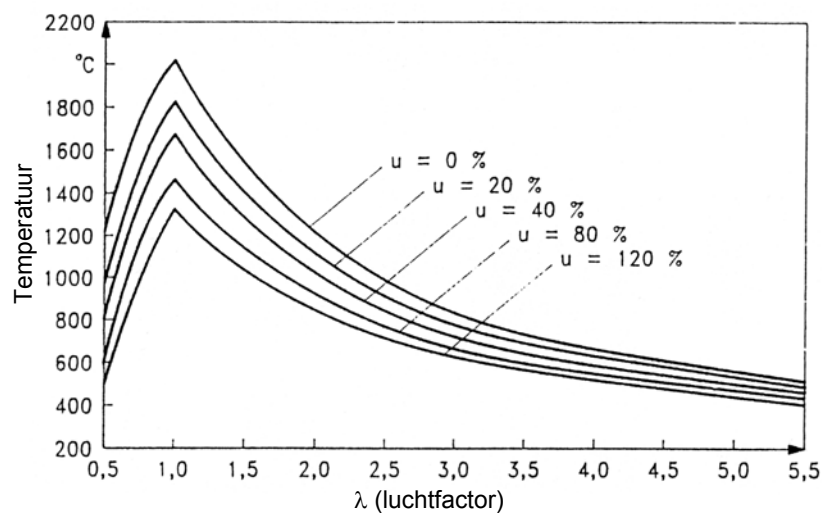


Figuur 3: Relatie tussen stookwaarde en watergehalte voor houtbrandstof (ref. 4)



- A: gebied met luchttekort of verhoogd risico hiervoor
- B: gebied met geschikte luchtvermaat
- C: gebied met te hoge luchtvermaat (zgn. koude verbranding)

Figuur 4a: Invloed van O_2 -concentratie van de rookgassen op de CO-emissie (ref. 4)



Figuur 4b: Invloed van de luchtfactor op de verbrandingstemperatuur bij houtverbranding voor verschillende waarden van het vochtgehalte u (op droge basis)(ref. 2)

Andere belangrijke parameters voor het verbrandingsproces zijn de luchtverdeling (primair - secundair - tertiair) en werking bij geschikte belasting (bij lage belasting, namelijk $< 50\%$ van de capaciteit, liggen de CO- en KWS-emissies gevoelig hoger, vandaar het belang van een goede dimensionering van de installatie). Teneinde een goede uitbrand te verzekeren wordt na de vuurhaard een uitbrandkamer voorzien met voldoende verblijftijd (min. 1, best 2 sec.) op voldoende hoge temperatuur (min. 800, best 850 °C), vooraleer de rookgassen in de ketel geleid worden. De vermelde primaire maatregelen voor het bekomen van een goede verbranding worden algemeen vermeld als de regel van de 3 T's (temperatuur – verblijftijd – turbulentie of menging van rookgassen en verbrandingslucht).

Het belang van de combinatie temperatuur-verblijftijd op de afbraaksnelheid van stabiele organische stoffen zoals voornamelijk PCDD/F, wordt geschetst in *Figuur 5*.

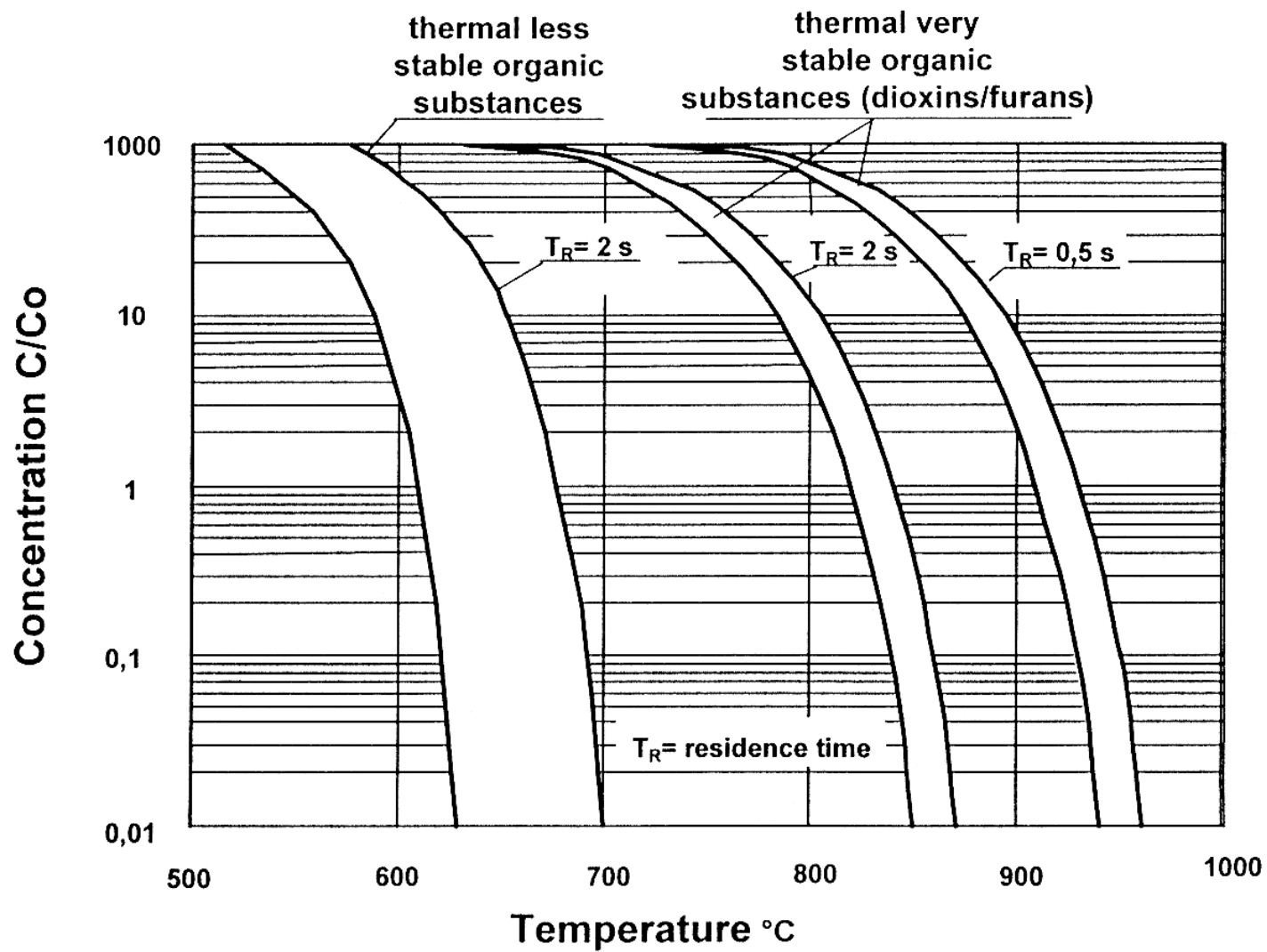
Aan klassieke verbranding zijn er toch enkele grote nadelen verbonden, waardoor men steeds op zoek blijft naar betere verbrandingstechnieken of andere technieken waar deze nadelen minder of zelfs niet spelen:

1. Het omzettingsrendement van biomassa naar elektriciteit is begrensd tot max. ~ 35% (netto) bij mono-verbranding omwille van volgende factoren:
 - beperkte stoomtemperatuur en druk in verband met gevaar voor hoge temperatuurscorrosie
 - grote luchtvermaat noodzakelijk bij verbranding.
2. De emissieproblematiek bij verbranding vraagt een zware investering in rookgasreiniging. Deze rookgasproblematiek is te wijten aan:
 - de hoeveelheid te reinigen rookgassen is groot door grote luchtvermaat
 - vorming van NO_x en dioxines en mogelijk andere vervuilingen indien met verontreinigde stromen wordt gewerkt.

Belangrijke voordelen van verbranding ten opzichte van andere technieken zijn:

1. Verbranding is een klassieke techniek waar reeds veel ervaring rond is en die betrouwbaar is.
2. Het aantal draaiuren per jaar kan gemakkelijk 8000 h bedragen.

Tot op heden is verbranding nog steeds de meest toegepaste en betrouwbare techniek om aan energiewinning uit biomassa te doen.



Figuur 5: Verband temperatuur – verblijftijd voor de afbraaksnelheid van stabiele organische stoffen (ref. 4)

2.2.2 Vergassing

Bij vergassing gebeurt de luchttoevoer onderstoëchiometrisch met als gevolg partiële verbranding van een deel van de organisch-biologische brandstof. De vrijgekomen warmte zorgt voor een verdere ontbinding van de overgebleven brandstof. Bij vergassing met lucht wordt een laagcalorisch stookgas geproduceerd bestaande uit CO, CO₂, C_nH_m, H₂, H₂O en N₂ met een verbrandingswaarde van 4 tot 8.5 MJ/Nm³. Bij gebruik van zuivere zuurstof ontstaat een gas met een hogere calorische waarde (8.5 MJ/Nm³ < H_u < 21 MJ/Nm³) het zgn. synthesegas (CO + H₂), dat mogelijk ook als grondstof voor de chemische industrie kan worden gebruikt.

In *Tabel 2* is een gemiddelde samenstelling van het stookgas uit verschillende soorten vergassers gegeven:

Tabel 2: Voorbeelden van samenstellingen en calorische waarden van stookgas uit vergassing van hout met lucht bij atmosferische druk (ref. 2).

Vergasserstype	Eenheid	Vast-bed-reactor		Wervelbed (statisch)	Circulerend wervelbed
		Tegenstroom	Meestroom		
Grootte installatie	kW _{th}	1 000	700	90	16 000
Vochtgehalte	%vocht	52	6	14	15
H ₂	Vol %	14	21	9.3	14.8
CO	Vol %	20	22.5	15.8	15.4
CO ₂	Vol %	10	11.5	16.7	15.0
CH ₄	Vol %	2.5	1.5	3.8	4.2
C _n H _m	Vol %			1.6	2.0
N ₂	Vol %			52.8	39.6
Calorische waarde	MJ/Nm ³	4.9	5.6	4.4	5.0

Vergassing is een veel gebruikte techniek in kolencentrales. Hout verschilt van kolen niet alleen op gebied van calorische waarde en samenstelling, maar vooral in reactiviteit. Hout bevat 80 gewichtsprocent aan vluchtige bestanddelen ten opzicht van kolen (40-50 gewichts-%). Ook ligt de assmelttemperatuur van hout 50°C lager dan bij kolen. Deze beide factoren brengen met zich mee dat de vergassingstechniek duidelijk moest aangepast worden aan de brandstof hout.

Er zijn verschillende types vergassers:

a. Vast-bed-reactoren (10 kW_{th} -2000 kW_{th})

Hierbij beweegt het hout van boven naar beneden door de reactor en wordt op weg naar beneden vergast. Het vergassingsmedium wordt in meestroom, tegenstroom of dwarsstroom toegevoerd. Elke uitvoeringsvorm heeft specifieke voor- en nadelen.

- Meestroom (Imbert vergasser): weinig teervorming, er is echter wel een uniforme brandstofgrootte en droge brandstof vereist;

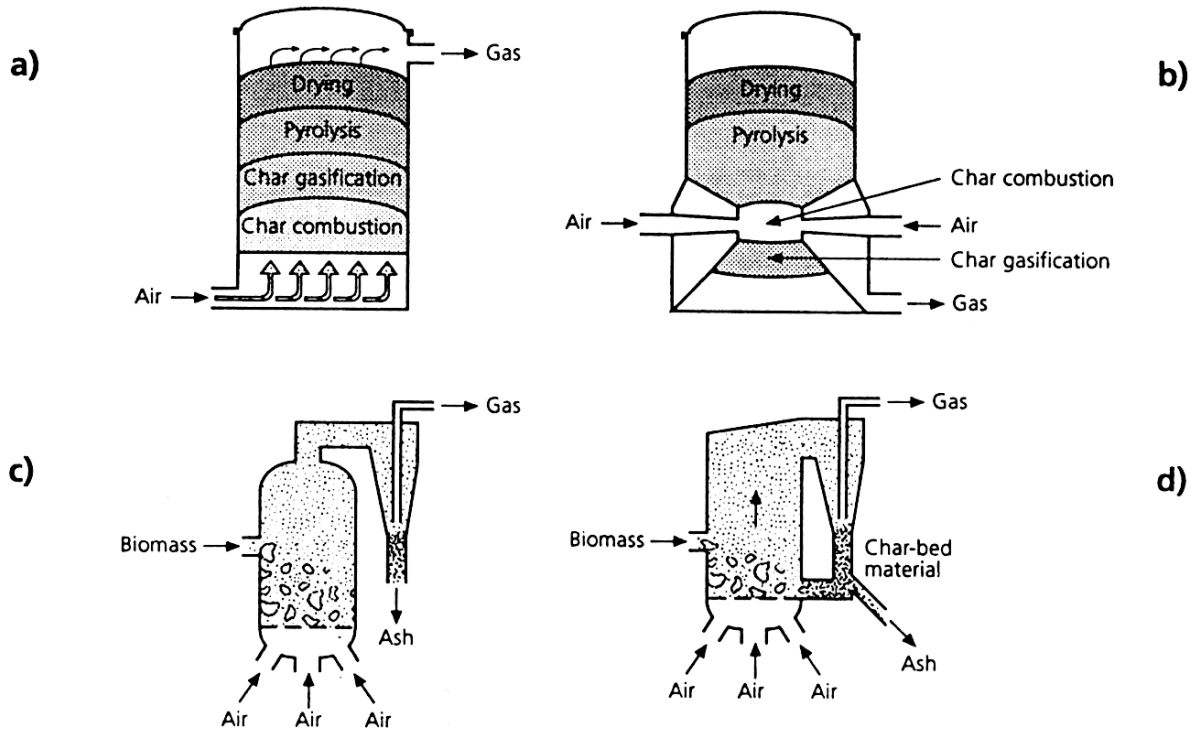
- Tegenstroom: simpel en goedkoop; het gas bevat echter een hoog teergehalte waardoor het niet geschikt is voor elektriciteitsopwekking tenzij na gasreiniging;
- Dwarsstroom: geschikt voor fluctuerende belastingsgraden; het gas bevat echter ook nog een hoog teergehalte.

b. Wervelbedreactoren (vanaf 10 000 kW_{th})

Hierbij wordt het hout in een heet (zand)bed gebracht dat met behulp van de vergassingslucht in beweging wordt gehouden. Er kunnen twee types onderscheiden worden:

- de gewone wervelbedvergasser (bubbling fluidised bed);
- de circulerende wervelbedvergasser (circulating fluidised bed - CFB).

In *Figuur 6* worden deze verschillende types voorgesteld.



Figuur 6: Verschillende types van vergassers: (a) vergasser met vast bed en opwaartse luchtstroom; (b) vergasser met vast bed en neerwaartse luchtstroom; (c) gewone wervelbedvergasser en (d) circulerende wervelbedvergasser (ref. 5)

Vast-bed-reactoren zijn geschikt voor vermogens vanaf $100 \text{ kW}_{\text{th}}$ tot enkele MW_{th} , wervelbedreactoren worden voor de grotere vermogens ingezet ($10\text{-}20 \text{ MW}_{\text{th}}$).

Vergassen heeft vergeleken met verbranden een aantal voordelen:

1. Vanwege de reducerende omstandigheden bij vergassing en de nageschakelde verbranding van een gasvormige brandstof ontstaan er vrijwel zeker geen dioxines indien de naverbranding optimaal gebeurt.
2. Bij verbranding van het gas in low-NO_x-branders is toepassing van DeNO_x wellicht niet noodzakelijk.
3. De te reinigen gashoeveelheid is aanzienlijk kleiner dan bij verbranding (circa 3 x).
4. Met vergassen kan een hoog elektrisch rendement worden bereikt door het gereinigde gas in een STEG toe te passen en de vergassingsinstallatie daarmee te integreren. Hierop is in internationaal verband het onderzoek gericht. Ook bij verbranding van gereinigd gas in een stoomketel kan in principe een hoger elektrisch rendement worden behaald dan in een houtverbrandingsinstallatie. Dit houdt verband met:
 - de lagere luchtvermaat waarmee het gereinigde gas verbrand kan worden in een ketel;
 - de beperking van de stoomtemperatuur bij houtverbranding in verband met corrosie door chloride;
 - de beperking van de verbrandingstemperatuur vanwege de maximaal toelaatbare rooster- of wervelbedtemperatuur.

Vergassen heeft echter ook een aantal nadelen ten opzichte van verbranden:

1. De vergassingstechniek voor hout is in ontwikkeling alsook de perifere processen rond het vergassen zoals de stookgasreiniging. Dit laat zich nog voelen in de betrouwbaarheid en het aantal draaiuren van commercieel uitgebate installaties.
2. De gasmotoren en gasturbines noodzakelijk voor elektriciteitsproductie, hebben reeds een verregaande ontwikkeling en verbetering achter de rug maar zijn vooral toegespitst op fossiele brandstoffen. Deze zijn echter nog niet volledig aangepast en/of geoptimaliseerd naar typische stookgassamenstellingen van biomassavergassing. Aangezien het aantal vergassers op biomassa niet zo enorm groot zal zijn, zal de aanpassing van deze machines aan stookgas eerder beperkt zijn en zal er eerder een omgekeerde beweging nodig zijn nl. een opwerking van het stookgas tot een kwaliteit die bruikbaar is voor de standaard machines.
3. De verbetering van de kwaliteit van het stookgas is momenteel nog een constante zorg van vergassingsinstallaties. Het grote probleem bij vergassing is het stofgehalte en de teervorming. Deze parameters zijn afhankelijk van het soort vergasser. In *Tabel 3* zijn de vervuilingsgraden naargelang de toegepaste techniek weergegeven:

Tabel 3: Voorbeelden van stof- en teergehalte van stookgas uit houtvergassing in verschillende systemen (ref. 2).

		Vast-bed-reactor		Wervelbed*	
		Tegenstroom	Meestroom	Statisch	Circulerend
Stofgehalte					
Range	g/Nm ³	0.1 – 3	0.02 - 8	1 - 100	8 – 100
Gemiddelde	g/Nm ³	1	1	4	20
Teergehalte					
Range	g/Nm ³	10 -150	0.01 - 6	1 - 23	1 – 30
Gemiddelde	g/Nm ³	50	0.5	12	8

* Gegeven waarden voor wervelbed zijn na cycloon.

Door de hoge stookgassnelheden in een circulerend wervelbed is het stofgehalte veel hoger, vooral het zeer fijne stof (< 10 µm) kan door een cycloon niet worden afgescheiden. De hoogste teergehaltes komen voor bij tegenstroom vast-bed vergassers. In een dergelijke installatie stroomt het hete gas uit de oxidatiezone door een kouder brandstofbed waar de pyrolyse en droging van de brandstof plaatsvindt. Deze temperaturen zijn niet hoog genoeg om de teren af te breken. In een tegenstroom vergasser verlaten de stookgassen de reactor langs een koude weg, in een meestroom reactor verlaten ze de reactor via de hete reductiezone waar de teren gebroken worden. Bij een wervelbedreactor liggen de teeremissies ergens tussenin. De temperatuur van het wervelbed heeft echter een duidelijke invloed op het teergehalte (bij een temperatuur van > 800°C kan een teergehalte van < 1g/Nm³ bereikt worden).

Teerverbindingen uit biomassavergassing beginnen te condenseren bij een temperatuur van onder de 300°C. Deze teren zijn dus reactiever dan bij kolen- of turfvergassing. Om stookgas te kunnen gebruiken in een gasmotor of gasturbine is er een stookgasreiniging nodig. De voorwaarden voor benutting in de verschillende systemen is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Minimale voorwaarden voor gebruik van stookgas in verschillende verbrandingssystemen (ref. 2).

Eisen voor stookgas*	Stofgehalte mg/Nm ³	Partikelgrootte µm	Teergehalte mg/Nm ³	Alkaligehalte** mg/Nm ³
Gasmotor	< 50	< 10	< 100	
Gasturbine	< 30	< 5	< 100	< 0.24

* Deze waarden zijn schattingen, afhankelijk van de bron kunnen deze verschillen.

**Alkaligehalte is Na+K

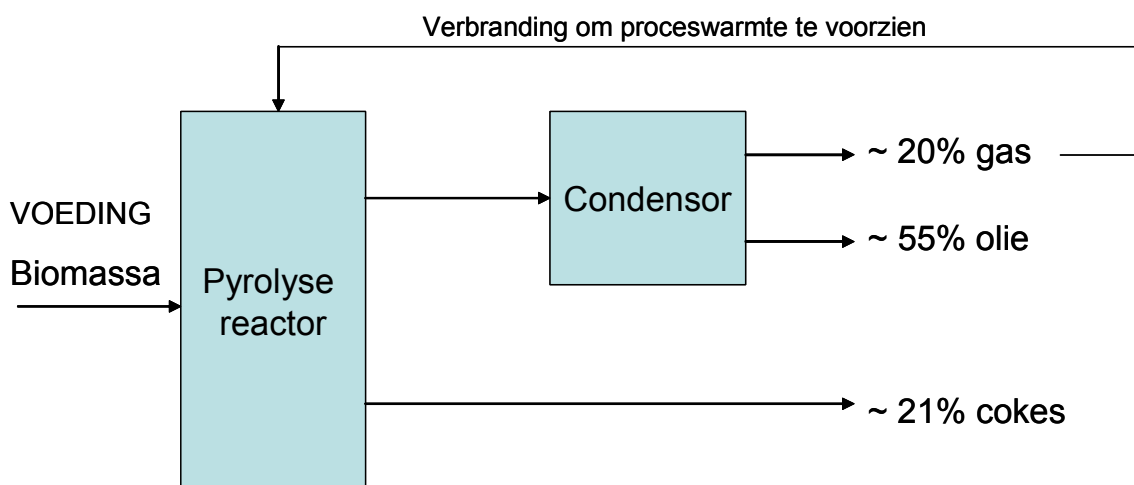
De toegestane stof- en teergehalten in deze tabel zijn duidelijk veel lager dan de waarden die gegeven worden in Tabel 3. Een goede gasreiniging (meer informatie in referentie 6) is dus noodzakelijk voor het gebruik in een gasmotor of gasturbine. Voor

de afscheiding van stof bestaan er reeds veel gekende en uitvoerig geteste technieken. Met het verwijderen van teren uit stookgas is echter heel wat minder ervaring en teren kunnen de verwijdering van stof negatief beïnvloeden.

Voor de verwijdering van teren en stof kan zowel een nat als droog proces gebruikt worden. Bij de meeste vast-bed reactoren wordt een nat proces gebruikt. In een natte stookgasreiniging wordt het stookgas eerst afgekoeld door het inspuiten van water of door het langs een warmtewisselaar te laten gaan, de afscheiding van stof en teer gebeurt dan in de wasser. Hierbij ontstaat dan een bijkomende kost nl. de behandeling van het afvalwater. In een droge stookgasreiniging moet de temperatuur van de filter hoog genoeg zijn zodat door condensatie van de kleverige teerverbindingen, de filter niet verstopt raakt. Enkel een filter zorgt niet voor voldoende afscheiding van de teren. Hiervoor kan een adsorptie met bruinkolen of actief kolen zorgen, maar hiermee is nog niet veel ervaring.

2.2.3 Pyrolyse

In afwezigheid van lucht wordt de biomassa tot 300 à 700 °C opgewarmd, bijvoorbeeld in een roterende extern verwarmde cylinder, waarbij thermische ontbinding van de organische fractie optreedt tot een gasvormige, vloeibare en vaste fractie (char, pyrolysecokes). De cokes wordt daarna verder omgezet door vergassing of verbranding.



Figuur 7: Schema van snelle pyrolyse van biomassa met typische opbrengst aan gas, pyrolyse olie en cokes in gewichtsprocent gegeven de ingezette biomassa (ref. 2).

Pyrolyse van lignocellulosehoudend materiaal resulteert in een mengsel van brandbare gassen, kool en pyrolyse-olie. De onderlinge verhouding van die producten wordt bepaald door de reactieparameters (temperatuur, verwarmingssnelheid en verblijftijd). Flash pyrolyse bij gematigde reactietemperatuur geeft tot 80 gewicht% aan pyrolyse-olie. De pyrolyse-olie heeft een calorische waarde van ongeveer 19 MJ/kg. Deze ruwe bio-olie kan direct verbrand worden in een stoomketel, motor of turbine.

Ook de samenstelling van de pyrolysecokes, -olie en -gassen zijn afhankelijk van de verschillende reactieparameters. In *Tabel 5* is de samenstelling gegeven van pyrolysecokes en pyrolysegas na flash-pyrolyse van berkenhout op 800°C, waarbij de stukgrootte van het hout tussen de 0.8 en 1mm was en de verblijftijd 1.4 seconde.

Tabel 5: : Samenstelling pyrolysecokes na flash-pyrolyse van berkenhout van 0.8-1 mm groot bij 800°C (ref 40).

	Cokes
C (wt %)	90.5
H (wt %)	1.8
N (wt %)	0.2
O (wt %)	8.0
Assen (wt %)	4.0
Vochtigheidsgraad (wt %)	2.5

Tabel 6: Samenstelling pyrolysegas na flash-pyrolyse van berkenhout van 0.8-1 mm groot bij 800°C (ref 39).

	Pyrolysegas
H ₂ (vol% ds)	16.8
CH ₄ (vol% ds)	16.2
C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ (vol% ds)	6.2
C ₂ H ₆ (vol% ds)	0.3
Benzeen (vol% ds)	1.2
Tolueen (vol% ds)	0.2
CO ₂ (vol% ds)	8.3
CO (vol% ds)	50.7

Flash pyrolyse wordt in Nederland verder ontwikkeld in het kader van het HTU proces voor directe hydrothermische liquefactie van (natte) biomassa. Het onderzoek wordt uitgevoerd door een consortium van Shell Nederland, TNO, Stork, BTG en Biofuel.

De technologie heeft echter een aantal nadelen:

1. Pyrolyse is een techniek die nog volop in onderzoek en ontwikkeling is. Niet alleen de optimalisatie van het proces is noodzakelijk (uitschakelen van een aantal ongewenste karakteristieken zoals lage thermische stabiliteit, corrosiviteit), maar er wordt ook onderzoek gedaan naar het verbeteren van de kwaliteit van de bio-olie.
2. Er zijn strenge voorwaarden verbonden aan de in te zetten biomassa: de stukgrootte mag niet groter zijn dan 6 mm en de vochtigheidsgraad van het hout moet kleiner zijn dan 10%.
3. Bij het ontwerp van de reactor moet rekening gehouden worden met de hete pyrolyse-olie dampen die zeer reactief zijn en zeer snel kunnen omgezet worden naar gas. Daarom moet de verblijftijd van deze gassen kleiner dan 1 s zijn.
4. Het omzettingsrendement van biomassa naar pyrolyse-olie ligt tussen de 40% en 60%. Met de gekende motoren of gasturbines komt de totale energiebalans op een elektrisch rendement ten opzichte van de brandstof van 20% tot maximaal 30% wat

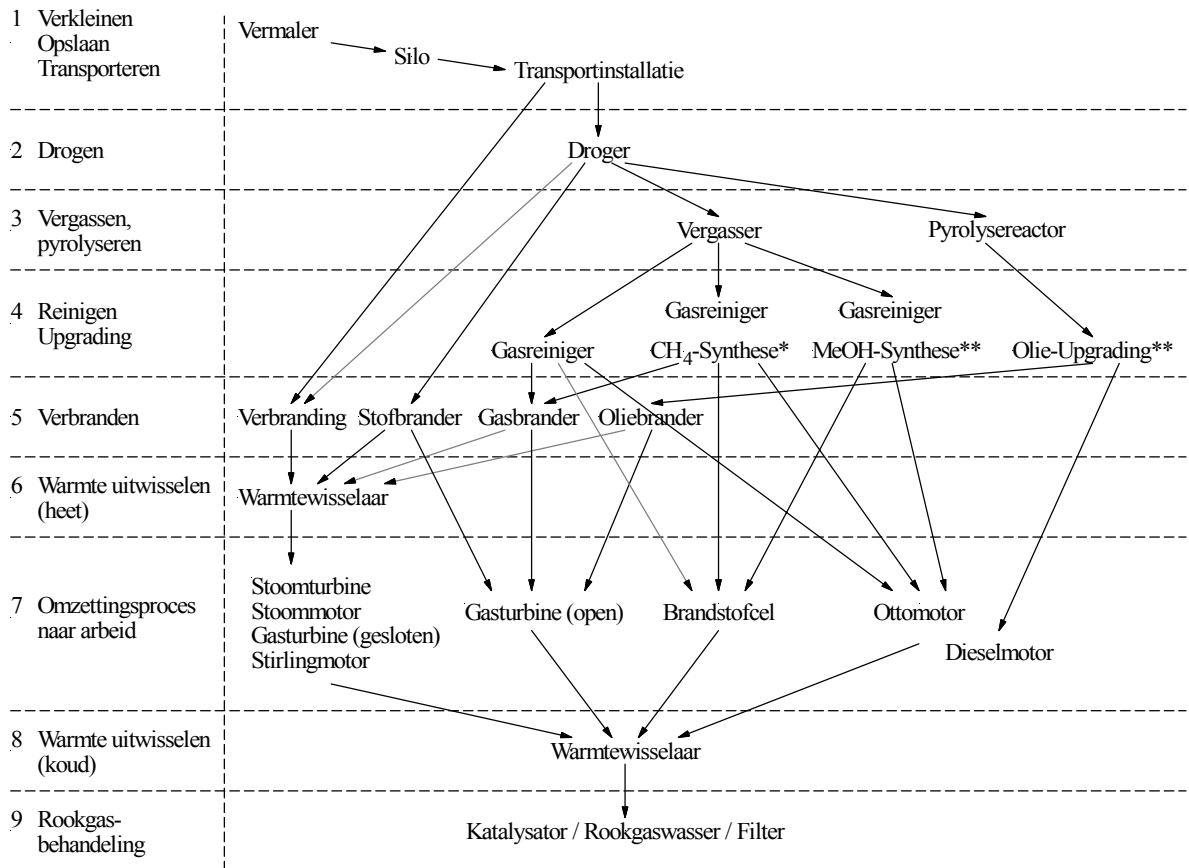
zeer laag is ten opzichte van wat bereikt kan worden in vergassing en niet veel hoger is dan bij verbranding.

Twee voordelen van pyrolyse zijn de volgende:

1. Het belangrijkste voordeel van pyrolyse-olie, hoewel het energetisch niet optimaal is, is dat de brandstofproductie gescheiden is van de elektriciteitsopwekking. Een mogelijke toepassing zou zijn de productie van pyrolyse-olie in grootschalige installaties en gebruik ervan als brandstof voor transport of voor energieproductie in stationaire hoogwaardige stookinstallaties.
2. Een ander belangrijk voordeel is de mogelijkheid van het recupereren van materiaal of elementen. Voor houtafval is dit slechts weinig van toepassing.

2.3 Elektriciteit en warmteproductie

In onderstaande figuur zijn de mogelijke processen aangeduid om van houtafval tot warmte en elektriciteitsproductie te komen.



* kan aan bestaande aardgasleidingen toegevoegd worden. Stookgas toevoegen zonder CH₄-synthese is echter moeilijk aangezien dan het CH₄-gehalte te laag is, dit in tegenstelling tot biogas van een vergisting dat na reiniging in het net kan geïnjecteerd worden zoals in Nederland, Zweden en Zwitserland reeds wordt gedaan.

** kan getransporteerd en opgeslagen worden

Figuur 8: Mogelijke totaalprocessen voor winning van elektriciteit en/of warmte opgedeeld in verschillende processtappen (ref. 2).

Momenteel zijn er slechts twee totaalprocessen louter op hout die volledig marktrijp zijn om uit hout elektriciteit en warmte te produceren nl. de verbranding van hout gevolgd door een stoomketel en deze stoom kan dan gebruikt worden in een stoommotor of stoomturbine. Bijstook van houtstof in kolencentrales wordt ook reeds dikwijls toegepast en ook het bijstoken van het gas na een houtvergassing in een kolenketel wordt reeds toegepast.

De laatste jaren is er heel wat aandacht en onderzoek gegaan naar het in gebruik nemen van nieuwe technologieën. Belangrijke innovatieve systemen zijn:

- houtvergassing en het gebruik van deze gassen in een gasmotor of gasturbine;
- verbranding van hout in een hete olietel met een nageschakelde ORC-cyclus;

- het gebruik van hete verbrandingslucht afkomstig van houtverbranding of het verbranden van stookgas, in een Stirling-motor.

Deze innovatieve technieken staan op de rand van een commerciële doorbraak en er zijn reeds een aantal piloot- en demoprojecten gerealiseerd.

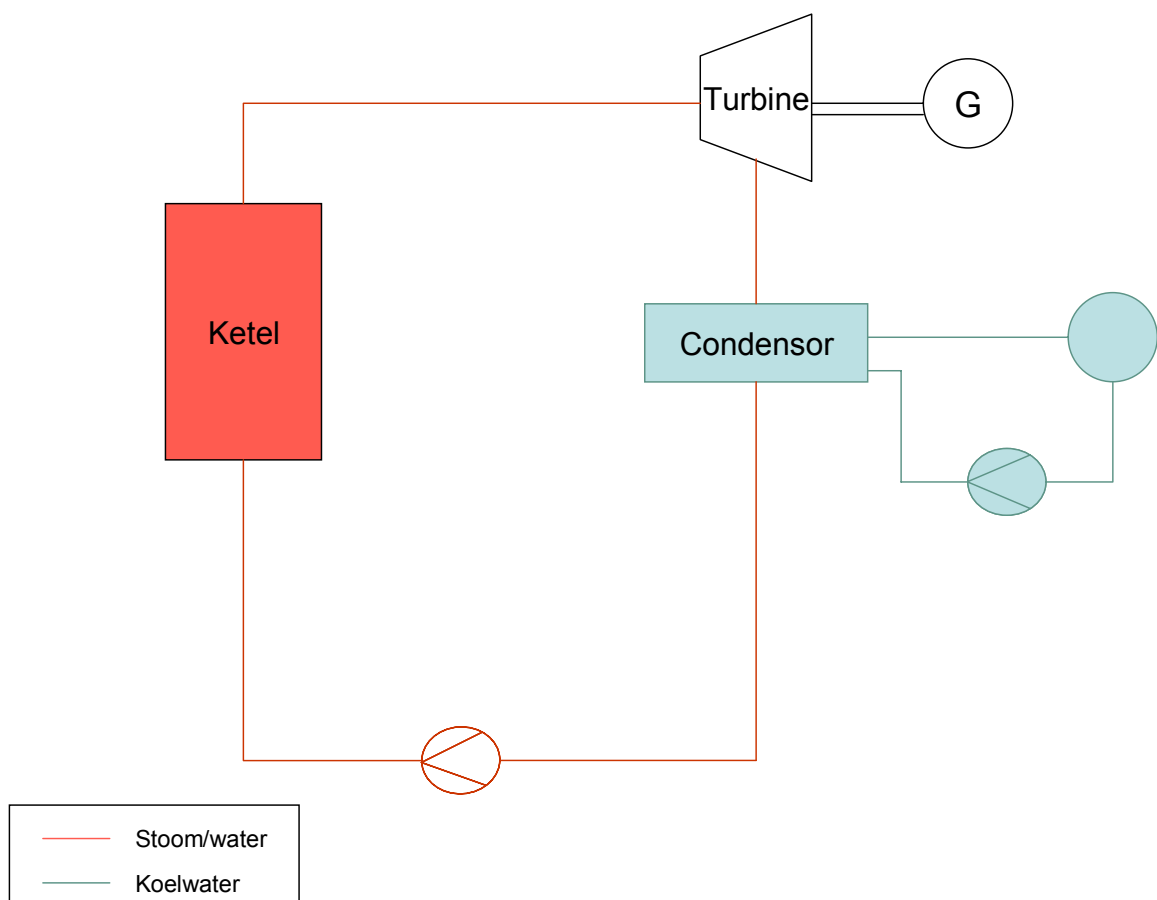
In dit hoofdstuk zullen enkel de marktrijpe toepassingen en de toepassingen die op het punt van doorbraak staan, besproken worden voor het opwekken van energie uit hout.

2.3.1 Energieproductie uitgaande van stoom

Bij energieproductie uitgaande van stoom, vindt er een overdracht plaats van de energie uit de verbrandingsgassen naar het water. Deze energie uitwisseling gebeurt volledig onder de vorm van warmteoverdracht. Dit proces is indirect en brengt een verlies aan omzettingsrendement met zich mee.

Indien enkel processtoom of warm water als energie benut wordt, volstaat een stoom/warm waterketel. Voor elektriciteitsopwekking met of zonder warmte toepassing is er een stoomturbine of stoommotor noodzakelijk.

a. Stoomturbine



Figuur 9: Schematische voorstelling van stoomketel met turbine en condensor

De stoomturbine is de meest toegepaste techniek voor elektriciteitscentrales en WKK-installaties met hout (zeker in der grotere vermogensrange (0.1 – 100 MWe).

Het principe van elektriciteitsproductie uit stoom is gebaseerd op de Rankine-cyclus, een thermodynamisch proces, dat in veel elektriciteitscentrales gebruikt wordt voor de opwekking van elektriciteit. In deze cyclus wordt in een stoomketel oververhitte stoom (d.w.z. verwarmd tot een temperatuur boven het kookpunt bij de keteldruk) onder hoge druk geproduceerd. Deze stoom expandeert vervolgens in een stoomturbine die een generator aandrijft. Daarna wordt de stoom gecondenseerd in een water- of luchtgekoelde condensor en wordt het condensaat teruggepompt naar de stoomketel. Bij deze water-stoomcyclus is

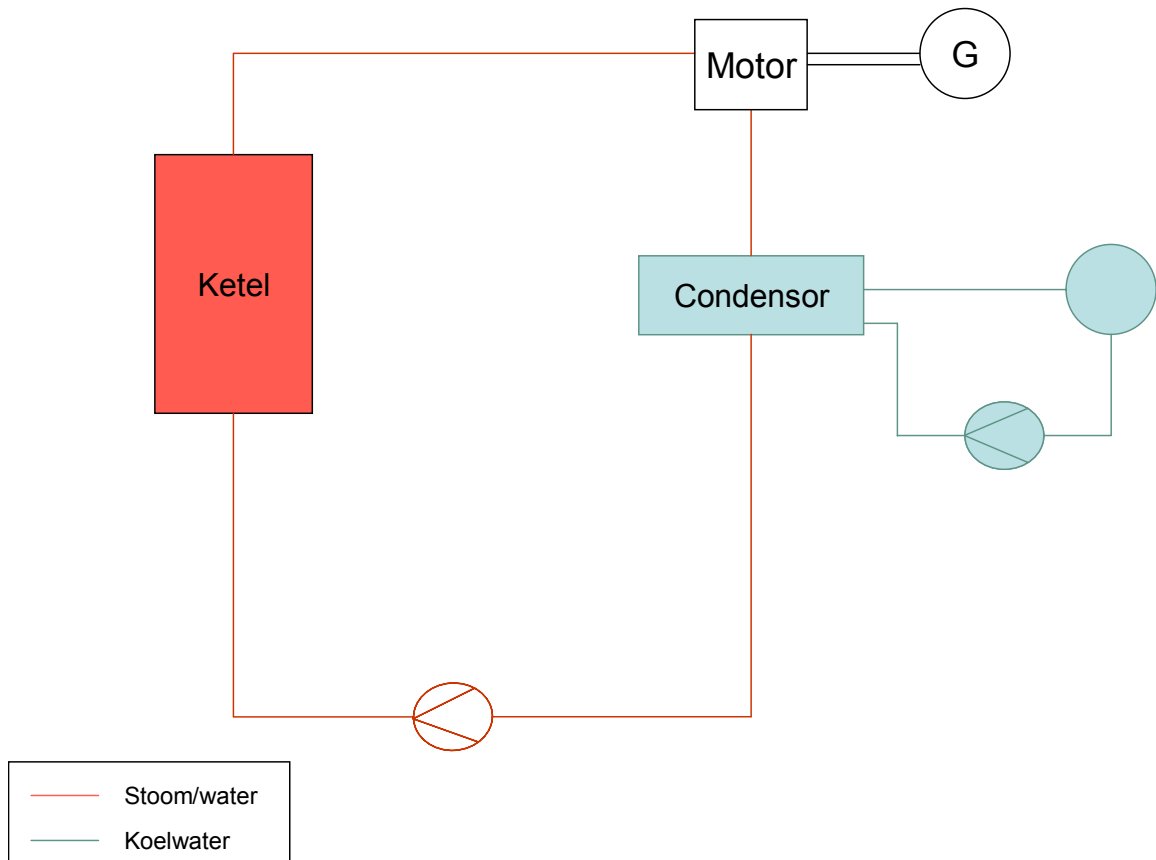
het belangrijk om de stoom te oververhitten om de vorming van condensaatdruppels in de stoomturbine te vermijden.

De elektriciteitsopwekking gebeurt in de turbine-alternatorset, bijkomende warmte-energie kan ofwel uit de uitlaat van de turbine gerecupereerd worden ofwel uit een aftap van de turbine afhankelijk van het type turbine. Er bestaan 2 types stoomturbines: de tegendruk turbine (enkel gebruikt bij WKK-installaties) en de condenserende turbine (gebruik in louter elektriciteitscentrale en WKK-installatie) al dan niet met aftap. De tegendruk turbine laat de damp gedeeltelijk ontspannen tot een bepaalde druk (cfr. de vereiste druk en temperatuur nodig voor de nageschakelde warmtetoepassing). De condenserende turbine laat de hoge druk stoom volledig ontspannen (tot ca. 0.1 bar overdruk bij luchtcondensor, mogelijk tot lagere drukken bij watercondensor). De warmte die eventueel nodig is wordt gegenereerd door een deel van het stoomdebiet af te tappen uit de turbine. Naargelang de elektriciteits- en warmtevraag moet de stoomcyclus uitgebalanceerd worden naar zijn meest optimale energetisch omzettingsrendement (geringe stoomaftap maar op hoge druk of groter stoomdebiet op lagere druk). Typische dampdrukken voor vermogens tot 5 MW_e liggen tussen de 40 en 60 bar.

Voordeel van een stoomturbine is dat het een degelijke technologie is die reeds zijn strepen verdiend heeft en dat de grootte van de installatie zeker in de grootteorde van enkele MW, geen begrenzingen heeft. Aangezien verbranding en elektriciteitsproductie gescheiden zijn, vormt het gebruik van brandstof met veel as zoals hout geen probleem. Nadelen van deze technologie bij houtverbranding is de relatief lage elektrische efficiëntie door de beperkte stoomparameters; een slecht rendement in deellast en bij kleine units; een hoge werkingskost en de noodzaak voor hoge kwaliteitsstoom.

Stoomturbines worden pas economisch echt interessant vanaf 2 MW_e, maar kleinere turbines bestaan. Tot 5 MW_e is een tegendrukturbine het best haalbaar. Nadeel hiervan is dat bij een tegendrukturbine de nominale warmteafname steeds moet gegarandeerd zijn (dus voor proceswarmte). Vanaf grotere vermogens kan er gedacht worden aan de duurdere condenserende turbines met aftap. Hier kan de warmte- en elektriciteitsproductie binnen bepaalde grenzen veranderd worden in functie van de warmtevraag.

b. Stoommotor

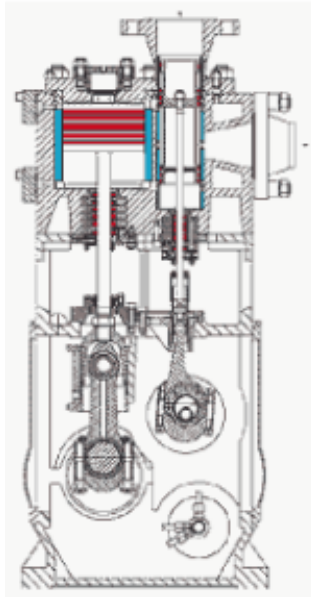


Figuur 10: Schematische voorstelling stoommotor

Stoommotoren worden voornamelijk ingezet voor de kleinere vermogens (van 20 kWel tot 1.5 MWel), in dit bereik zijn ze economisch gunstiger (tot 30% goedkoper) dan de turbines. Een stoommotor werkt volgens het principe dat de stoom in een cilinder wordt geëxpandeerd en zo arbeid verricht op een zuiger, deze arbeid wordt op zijn beurt omgezet in elektriciteit. Een stoommotor kan tot 40 t/h stoom aan, de inlaatdruk kan naargelang de bouwwijze variëren tussen de 6 en 60 bar, de uitlaatdruk kan variëren tussen de 0.5 en 25 bar.

Stoommotoren worden zowel voor louter elektriciteitsproductie als voor WKK-installaties gebruikt. De nuttige warmte wordt gegenereerd uit de uitlaat van de motor.

Voordelen van deze motoren zijn dat ze geschikt zijn voor kleinere ordegroottes, dat ze een goed rendement in deellast hebben, dat verzadigde stoom kan gebruikt worden, en dat het een marktrijpe technologie is. De nadelen zijn dan weer dat de afgassen met olie kunnen belast zijn, een lage elektrische efficiëntie (6 - 20%), een hoge onderhoudskost en geluidsintensief.



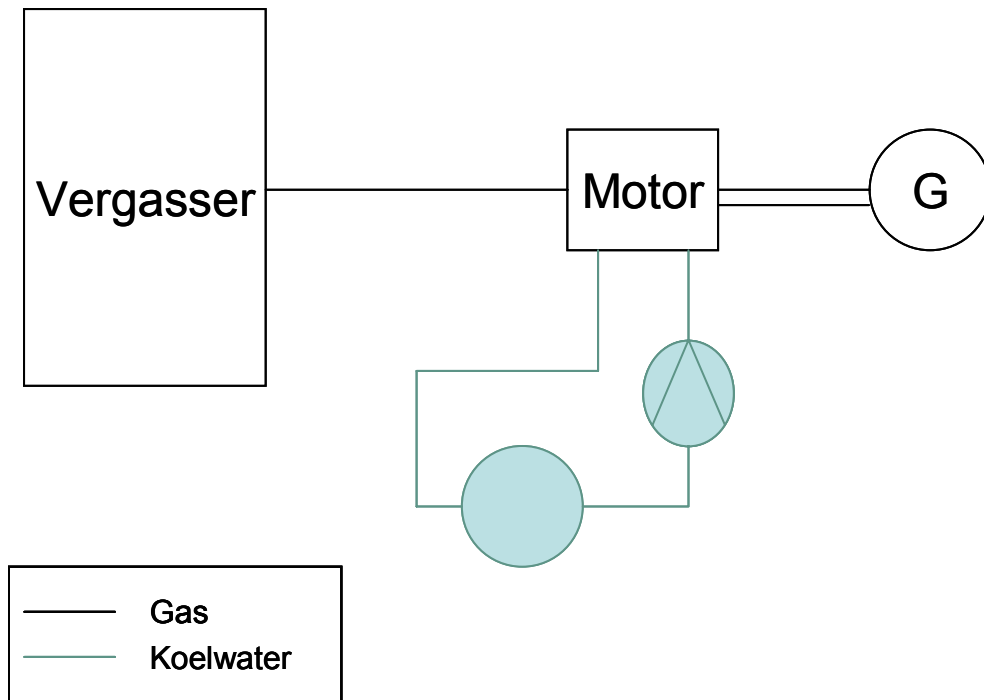
Figuur 11: Voorbeeld van een stoommotor

2.3.2 Energieproductie uitgaande van een brandbaar gas

Elektriciteit en warmte kan ook direct geproduceerd worden (zonder stoomcyclus), uitgaande van synthesegas bekomen via vergassing of pyrolyse van houtafval. Door directe verbranding van het stookgas komt warmte vrij, door direct gebruik in een interne verbrandingsmotor of gasturbine kan elektriciteit opgewekt worden in een elektriciteitscentrale of WKK-installatie.

Bij vergassing en pyrolyse wordt de brandstof (hout) gedeeltelijk omgezet naar een gas waar energie in een chemisch gebonden vorm aanwezig is naast de warmte die (bij vergassing) ook nog vrijkomt. Dit synthesegas kan dan onder andere omstandigheden verbrand worden (hogere druk en temperatuur), wat leidt tot toepassingen met hogere elektrische efficiënties. Deze technologieën worden momenteel slechts toegepast op pilotschaal en in demoprojecten.

a. Interne verbrandingsmotor



Figuur 12: Schematische voorstelling vergasser met gasmotor

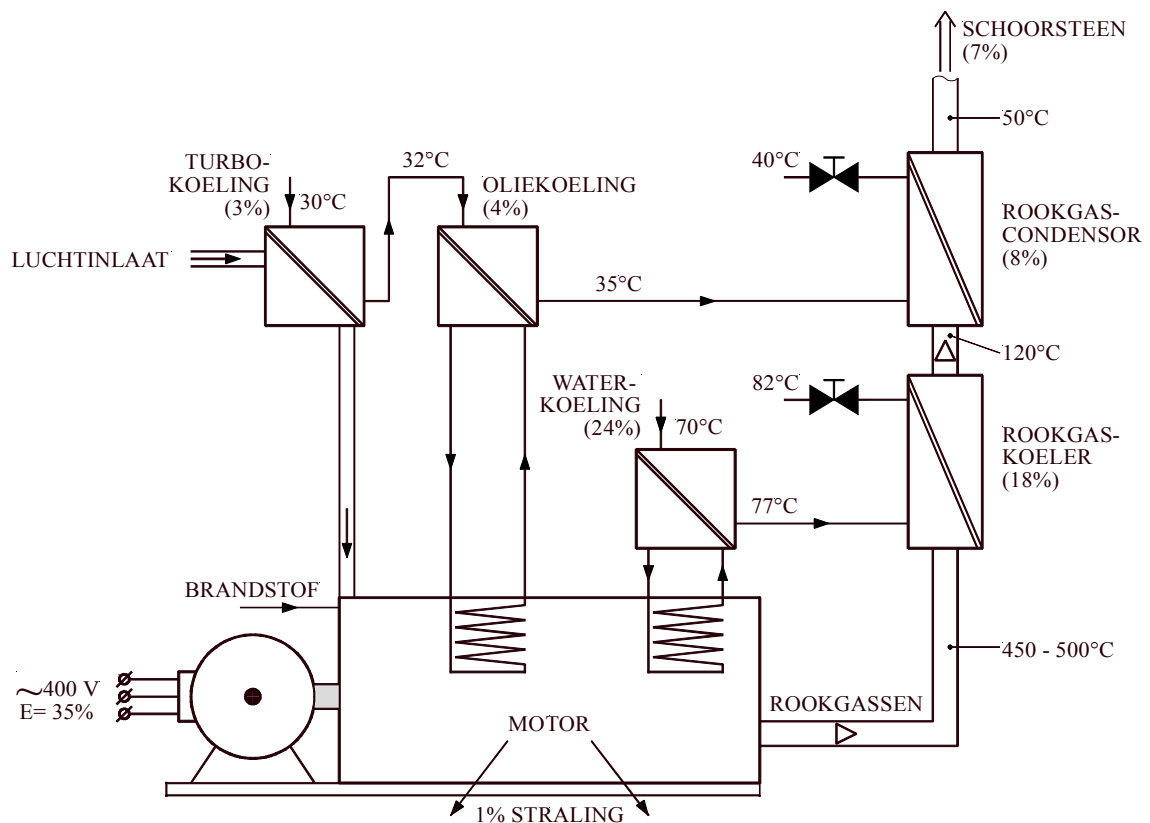
De interne verbrandingsmotor (IC, Internal Combustion engine) is geschikt voor kleinschalige elektriciteitsproductie uit synthesegas. Het elektrisch rendement van gasmotoren in een bereik van 0,1-1 MW_e bedraagt 30 tot 40% en is voornamelijk afhankelijk van de compressieverhouding (verhouding tussen volumes van de verbrandingsruimte en het slagvolume). Indien nodig, kan warmte gerecupereerd worden van de interkoeler, van de koeling van de smeeroilie, van het koelwater van het motorblok en van de uitlaatgassen.

Het thermisch rendement van een WKK met gasmotor is afhankelijk van de temperatuur die nodig is voor de warmtetoepassing. Tabel 7 toont de temperatuurniveaus van de genoemde warmtebronnen van de gasmotor. In deze tabel zijn bij de interkoeler, de oliekoeler en de koelwaterkoeling de maximum inlaattemperaturen en bij de rookgassen de gemiddelde rookgastemperaturen weergegeven.

Tabel 7: Temperatuurniveau van de verschillende warmtebronnen in gasmotor

Warmtebron	Temperatuur (°C)
Interkoeler	30 – 80
Smeeroilie	75 – 95
Koelwater	75 – 120
Rookgassen	400 – 550

Bij lage retourtemperatuur (70°C) ligt het thermisch rendement tussen 45 en 55% (bereik 0,1-1 MW_e). *Figuur 13* toont een 'ideaal' WKK-systeem waarbij de beschikbare energiebronnen van de WKK maximaal benut worden.



Figuur 13: 'Ideaal' voorbeeld van valorisatie energiebronnen bij een WKK-systeem

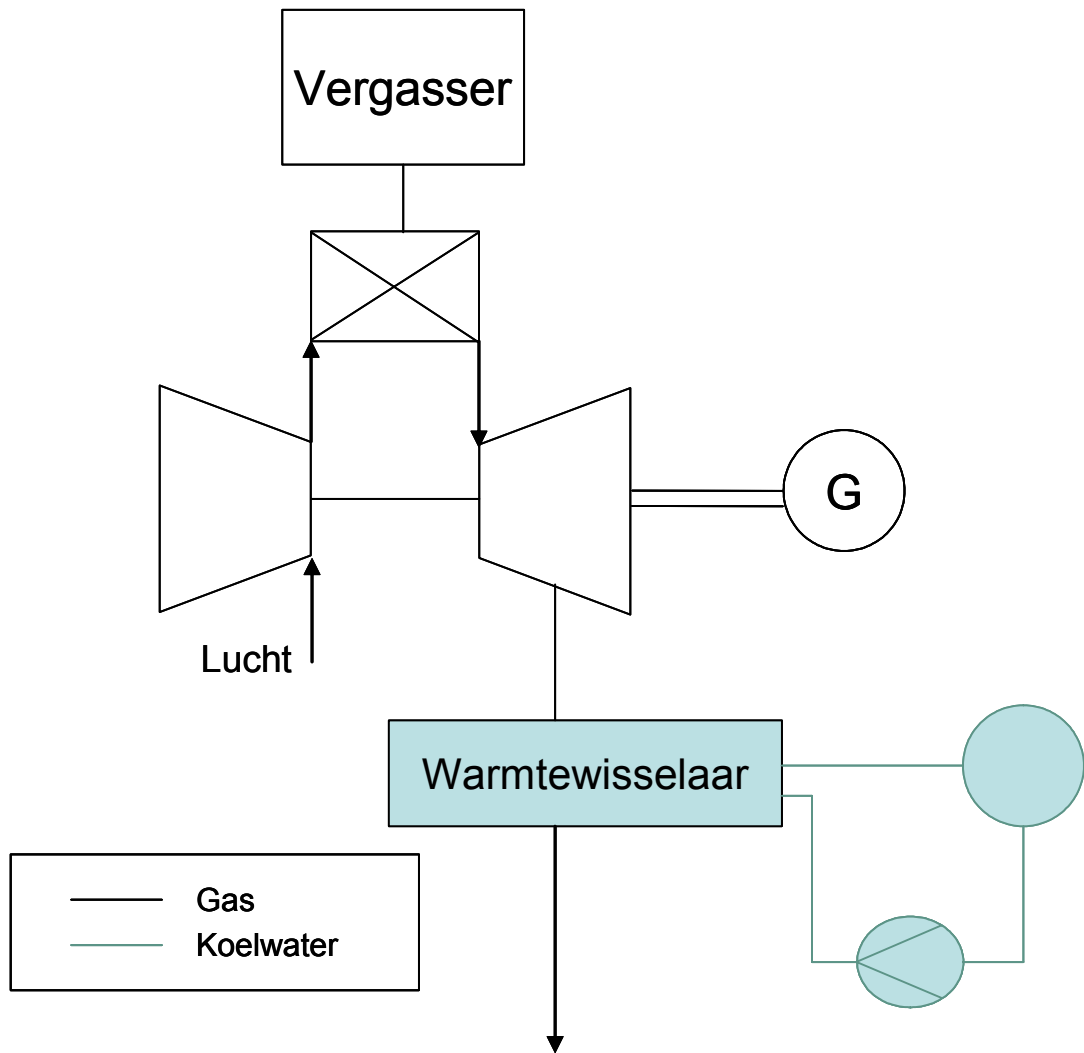
Er bestaan 2 soorten gasmotoren: de Otto-motor en de dual fuel motor. In een Otto-motor wordt lucht en gas gemengd, vervolgens gecomprimeerd en verbrand in de cilinder met behulp van een ontstekingskaars. In een dual fuel motor worden zowel de lucht als het stookgas in de cilinder geïnjecteerd, vervolgens gecomprimeerd en verbrand met behulp van toevoeging van diesel onder druk. Deze dual fuel motoren zijn qua constructie gelijkwaardig aan klassieke dieselmotoren. Otto-motoren kunnen afhankelijk van bouwwijze en grootte rendementen van 25% tot 40% behalen. Dual fuel motoren bereiken rendement van 40% voor de kleine tot 50% voor grote (enkele MW_{e1}) motoren. Deze rendementen zijn van toepassing in motoren op fossiele brandstoffen, voor stookgas ligt dit rendement lager aangezien de calorische waarden van stookgas beduidend lager ligt dan fossiele brandstoffen (40 tot 70% lager bij Otto-motoren, 10 tot 30% lager bij dual fuel motoren).

Wanneer in deellast wordt gedraaid, daalt het elektrisch rendement sneller dan het thermisch rendement.

Voor verbranding van pyrolyse-olie kunnen dual fuel motoren gebruikt worden. Aangezien de pyrolyse-olie moeilijk ontbrandt, is het nodig diesel toe te voegen. Er is echter nog

weinig ervaring met deze toepassing. De eerste testen hadden na enkele draaiuren al problemen met verstoppingen door polymerisatie en corrosie van de pomp en sproeikoppen.

b. Gasturbine

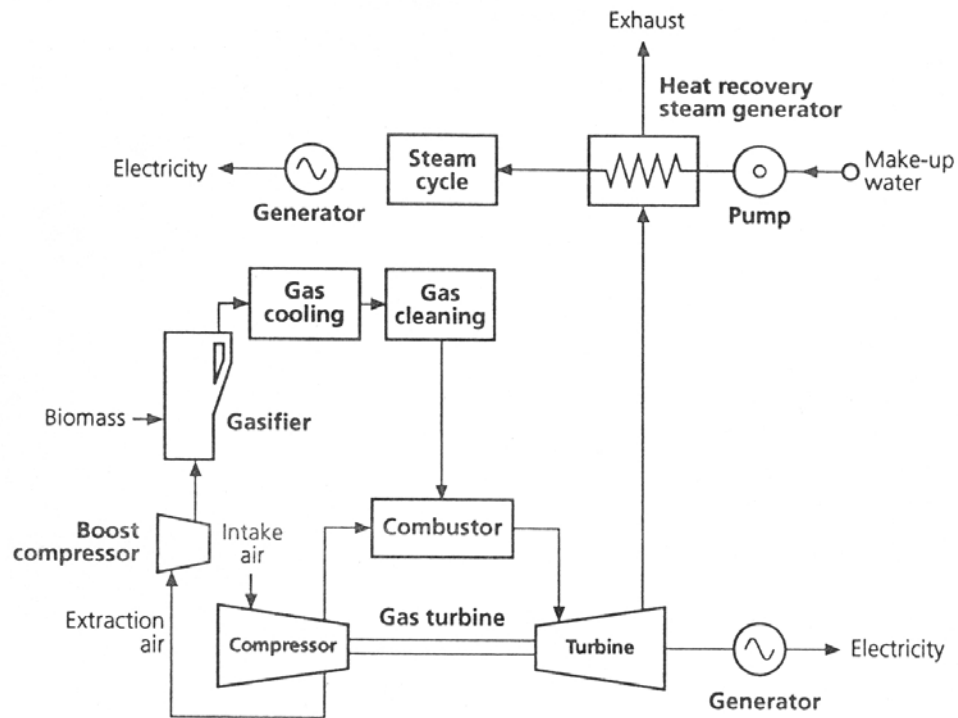


Figuur 14: Schematische voorstelling vergasser met gasturbine

Het stookgas dat de vergasser verlaat (zie paragraaf 1.3.2.) kan naar een gasturbine gestuurd worden. In deze turbine wordt het met een overmaat aan gecomprimeerde lucht verbrand. De verbrandingsgassen worden over de gasturbine geëxpandeerd. De uitlaatgassen kunnen ofwel door een uitlaatgassenketel gestuurd worden, waarin de warmte wordt overgedragen op een water-stoomcircuit (WKK), ofwel gebruikt worden in een verbrandingslucht/uitlaatgas warmtewisselaar om de verbrandingslucht op te warmen.

Grote gasturbines hebben een drukverhouding van rond de 20 bar en ingangstemperaturen van ca. 1200°C en een compressor efficiëntie van 77%. Kleinere turbines (1 MW_e) hebben

een drukverhouding van 4 bar, een ingangstemperatuur van 650°C en een compressor efficiëntie van 64%.



Figuur 15: Vergasser voor organisch-biologische stof met stoom- en gasturbine (ref. 5)

Door combinatie met een stoomturbine (STEG-principe, STEam and Gas turbine) wordt extra elektriciteit geproduceerd (*Figuur 15*). Een andere mogelijkheid om het energetisch rendement te verhogen, is injectie van gerecupereerde stoom in de gasturbine. Deze techniek wordt toegepast in het BIG/STIG proces (Biomass Integrated Gasifier/Steam Injected Gas Turbine system).

Het elektrisch rendement van een gasturbine hangt af van de ingangstemperatuur van de turbine, het drukverlies over de turbine, het rendement van de compressor en van de karakteristieken van de turbine zelf. De ingangstemperatuur van de turbine is afhankelijk van de gebruikte materialen en van de koeling van de schoepen. De keuze van het materiaal is op zijn beurt dan weer afhankelijk van de stookgassenstelling.

Het voordeel van een WKK met een gasturbine is dat bij deze systemen alle valoriseerbare warmte in de uitlaatgassen zitten en dus op hetzelfde temperatuurniveau beschikbaar is (tussen de 450°C en 500°C). Aangezien de vrijgekomen energie hoge temperatuurswarmte is, heeft men meer vrijheid bij het kiezen van de temperatuur voor de warmtetoepassing. Bovendien is ten gevolge van de hoge lambda-waarde (hoog zuurstofgehalte) bijstook mogelijk. Dit doet de temperatuur van de rookgassen stijgen en zo wordt het warmtevermogen gedeeltelijk onafhankelijk van het gasturbine vermogen. Een combinatie van gasturbine en bijstook is een systeem met grote moduleerbaarheid. Wanneer het thermisch rendement van een WKK met gasturbine vergeleken wordt met een WKK met gasmotor, kan dit rendement lager liggen. Dit wordt veroorzaakt omdat de gevaloriseerde

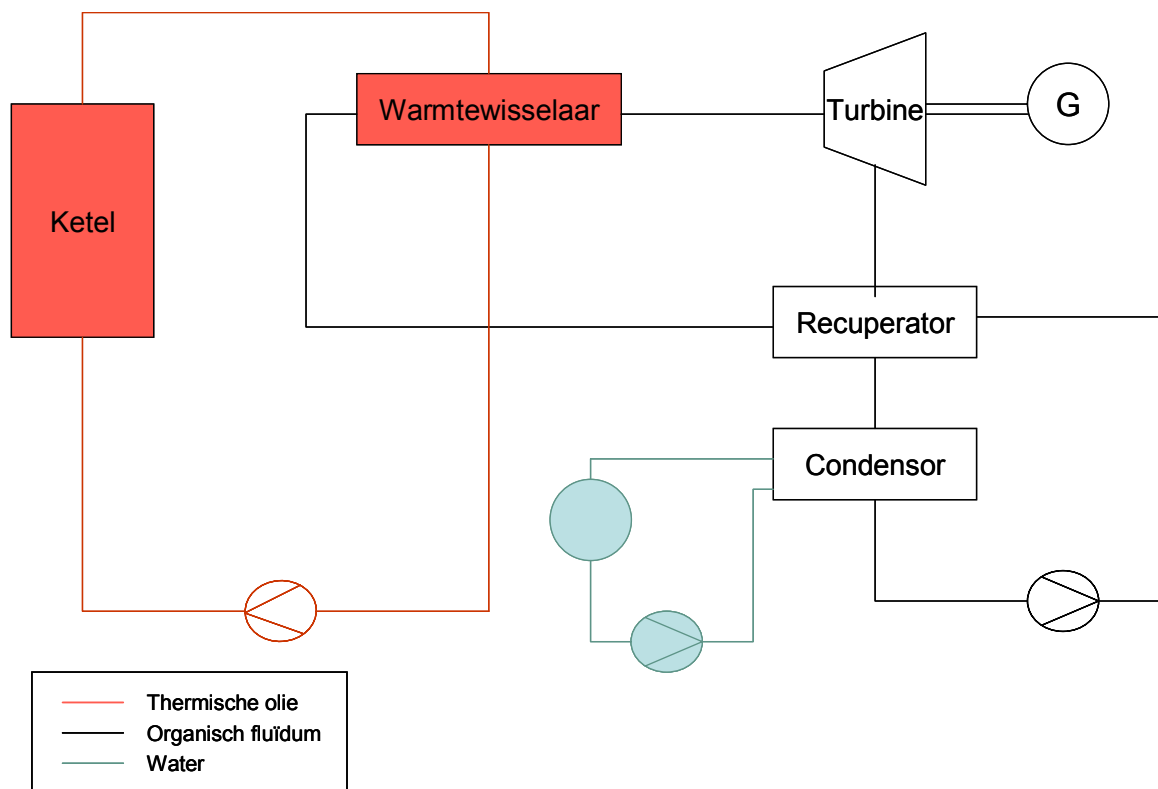
warmte bij de WKK met gasturbine op een aanzienlijk hoger temperatuurniveau ligt (enkel de hoge temperatuurswarmte wordt gebruikt, de rest van de warmte gaat verloren) en omwille van de grotere lambda-waarde.

Een gasturbine heeft minder gunstige deellastkarakteristieken dan een gasmotor.

2.3.3 Energieproductie uitgaande van een organisch fluïdum

In plaats van stoom als energiedrager te gebruiken kan ook gekozen worden voor een ander medium vb. thermische olie. Thermische olietelers worden in bepaalde toepassingen gebruikt voor de overdracht van warmte. Ook voor de opwekking van elektriciteit kan een organisch fluïdum gebruikt worden in een ORC.

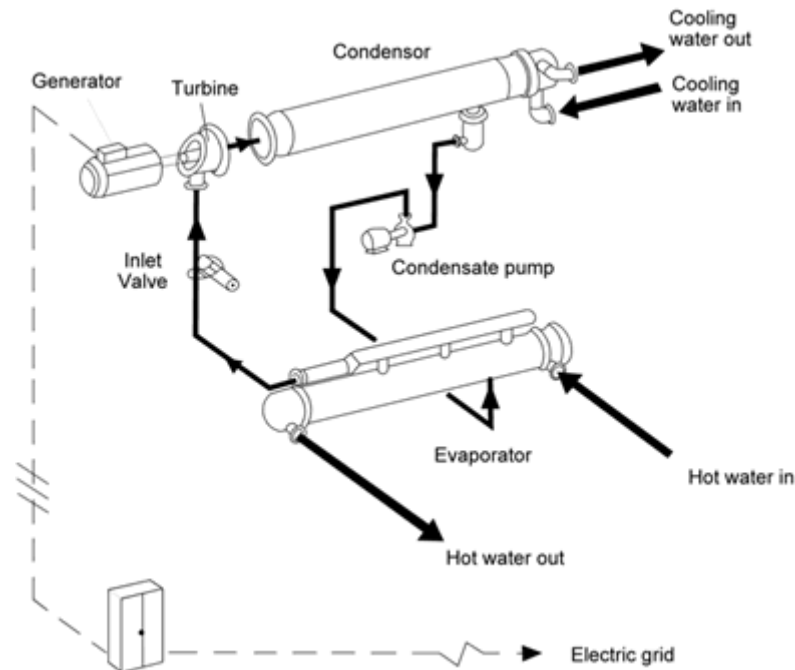
a. Organic Rankine Cycle (ORC)



Figuur 16: Schematische voorstelling van Organic Rankine Cycle

Door een klassieke Rankine cyclus uit te voeren met een ander dikwijls organisch fluïdum (o.a. ammoniak, propaan, n-pentaaan, n-hexaan, toluen, silicone olie, ...), in plaats van met water en stoom, zijn er belangrijke voordelen te behalen aangezien het proces met lagere temperaturen werkt (de organische stof verdampt en condenseert bij een lagere temperatuur dan water). De verdampingsenergie voor het organisch medium wordt gehaald uit een thermische olie ketel. In een thermische olie/organisch fluïdum verdamper wordt de energie overgedragen. De organische stof in de verdamper levert een hoge verdampingsdruk bij een veel lagere temperatuur dan stoom. De oververhitte damp wordt over een turbine gestuurd om elektriciteit te produceren. De resterende warmte van de nog oververhitte damp uit de turbine kan deels gebruikt worden om het condensaat naar de verdamper voor te

verwarmen, te verdampen en ev. deels te oververhitten. De organische stof condenseert in de condensor. De condensorwarmte kan gebruikt worden voor de warmtetoepassing.



Figuur 17: Voorstelling van de verschillende componenten waaruit een ORC is opgebouwd (ref. 44)

De verdampingsdruk verschilt naargelang welke organische stof wordt gebruikt, maar ligt rond de 10 bar bij een temperatuur tussen de 250°C en 300°C. Daarnaast hebben sommige organische stoffen zulke fysische eigenschappen dat oververhitting niet nodig is. Ten slotte is bij organische stoffen de verdampingswarmte minder hoog dan bij water (vanwege het ontbreken van waterstofbruggen) en is een groter aandeel van de warmte benutbaar voor opwarming van de vloeistof. Dat is een interessante eigenschap als het om benutting van restwarmte gaat.

Deze eigenschappen maken het mogelijk om een Organic Rankine Cycle te gebruiken om met laagwaardige warmte elektriciteit op te wekken. De minimum temperatuur waarbij dit proces nog praktisch mogelijk is, bedraagt ongeveer 80 °C. Uiteraard neemt het rendement toe naarmate de temperatuur van de beschikbare warmte hoger is. Bij lagere temperatuur kan ongeveer 10% van de warmte omgezet worden in elektriciteit. Bij hogere temperaturen neemt dit toe tot ruim 20%. Dan is het ook mogelijk om de condensor op een hogere temperatuur te houden, zodat de condensatiewarmte kan benut worden voor een warmtetoepassing. De afstemming van de condensatietemperatuur voor de warmtetoepassing bepalen het thermisch rendement.

Belangrijke voordelen bij een WKK-installatie met behulp van een ORC:

- Specifiek voor een ORC geldt dat lage temperatuurswarmte nog kan gebruikt worden voor elektriciteitsproductie door selectie van een organisch medium met geschikte karakteristieken. De ORC-technologie is voornamelijk ontworpen om (meer) elektriciteit te halen uit lage temperatuurswarmte. Een ORC als WKK is echter ook mogelijk.

- Deze vorm van WKK kan toegepast worden in kleinere biomassacentrales (tot 3 MWth), waar het ORC-proces technische voordelen biedt bij het ontwerp van de ketel. Bij de ORC kan de ketel op lagere temperatuur (300°C) gehouden worden dan bij een stoomketel. De rookgassen worden gekoeld in de thermische olie-ketel. De ketel is daardoor zo goed als drukloos. Dit heeft een positieve invloed op de levensduur van de ketel (vnl. de ketelpijpen). Ook de reglementering naar veiligheid toe is minder veeleisend bij lagere drukken.
- In de vuurhaard zijn speciale koelplaten aangebracht, die met thermische olie worden doorstroomd. Dat is gunstig voor de emissies en gaat slakvorming tegen, wat gunstig is voor de bedrijfszekerheid en wat tevens de onderhoudskosten verlaagt.
- Een ander voordeel van deze organische stof, ten opzichte van stoom, is dat er bij daling van druk en temperatuur in de expansieturbine geen condensdruppels ontstaan. Dit is gunstig voor de levensduur en het intern rendement van de turbine.

Volgende nadelen zijn verbonden aan het gebruik van een ORC:

- Een ORC is een secundaire thermodynamische cyclus. De warmte die ontstaat bij verbranding van houtafval verwarmt de thermische olie tot op een zekere temperatuur (ca. 300°C). Deze thermische olie geeft op zijn beurt de warmte af in een warmtewisselaar aan een organisch fluïdum. Bij elke omzetting moet er rekening gehouden worden met energetische verliezen. Ook de constructie en bouw van zulke installatie wordt complexer.
- Door het gebruik van een organisch fluïdum stijgt het brandgevaar. Extra veiligheidsvoorschriften en –maatregelen zijn in zulke installaties van toepassing.
- Een ORC-installatie is beperkt tot de kleinere vermogens omdat het te complex en dus te duur is voor de grotere vermogens.
- Er is nog maar weinig ervaring met biomassa gestookte ORC-installaties. In de geothermie is er met ORC-cycli al meer ervaring.

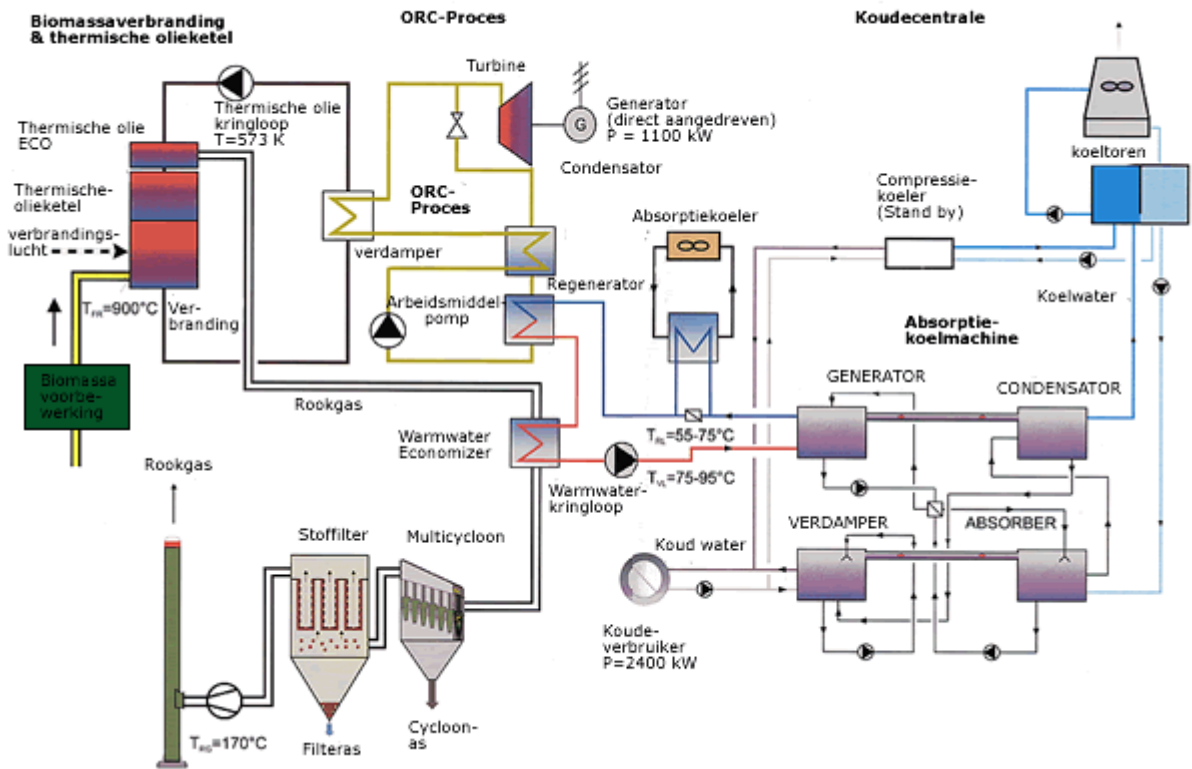
Momenteel zijn bepaalde ORC-fabrikanten aan het kijken of het mogelijk zou zijn om de thermische oliecycle weg te laten en dadelijk gebruik te maken van een ketel op het organisch fluïdum. Hier is echter tot nu toe weinig ervaring mee.

Een voorbeeldproject van een biomassagestookte ORC in trigeneratie is “Biostroom” te Hard (Oostenrijk). Dit project is in maart 2002 opgestart. Het netto elektrisch vermogen bedraagt 1100 kW. De condensor voert 4900 kW warmte af en kan hiermee een absorptiekoelmachine van 2400 kW en met een COP van 0,75 aandrijven, of de gebouwen verwarmen met CV-water op 80 °C. Het elektrisch rendement bedraagt ca. 18,3%. Per jaar gaat men 8,25 miljoen kWh duurzame elektriciteit opwekken bij Biostrom. De koudeproductie is 157.000 GJ per jaar. Hiermee wordt ca. 3,4 miljoen kWh elektriciteit uitgespaard, die men anders nodig zou hebben in een conventionele compressor-koelmachine. *Figuur 18* geeft het principeschema van dit project weer.

ORC is economisch rendabel bij een elektrisch vermogen van 200...4000 kW. Het thermisch vermogen van de brander zou minstens 5000 kW moeten bedragen¹.

¹ Ingwald Obernberger e.a. Decentralized Biomass Combustion: State of the Art Future Development, Biomass and Bioenergy Vol 14, Graz, 1997

Schematische weergave van de gehele opstelling



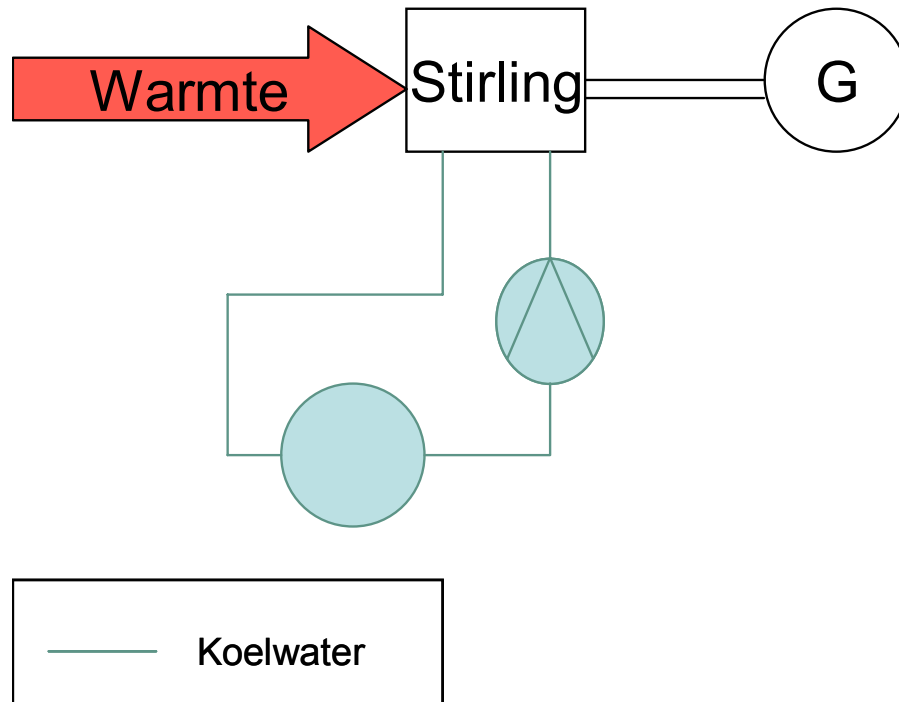
Figuur 18: Plant lay-out bij Biostrom, Hard (A)(ref. 4).

2.3.4 Energieproductie uitgaande van warmte

Naast het direct gebruiken van stookgas voor opwekking van elektriciteit kan ook de warmte van de verbranding van hout of van de verbranding van stookgas rechtstreeks gebruikt worden om bruikbare energie op te wekken zonder een tussenstap via stoom te maken.

a. Stirling motor (heteluchtmotor)

Een Stirlingmotor heeft warmte nodig. Deze warmte kan op verschillende manieren gewonnen worden. Er kan een warmtewisselaar (rookgas/water) in de rookgasstroom of zelfs in de verbrandingskamer geplaatst worden. Een andere mogelijkheid is eerst het hout vergassen en zonder rookgasreiniging kan dit stookgas in brander verbrand worden en gekoppeld worden aan een Stirlingmotor.



Figuur 19: Schematische voorstelling Stirling-motor

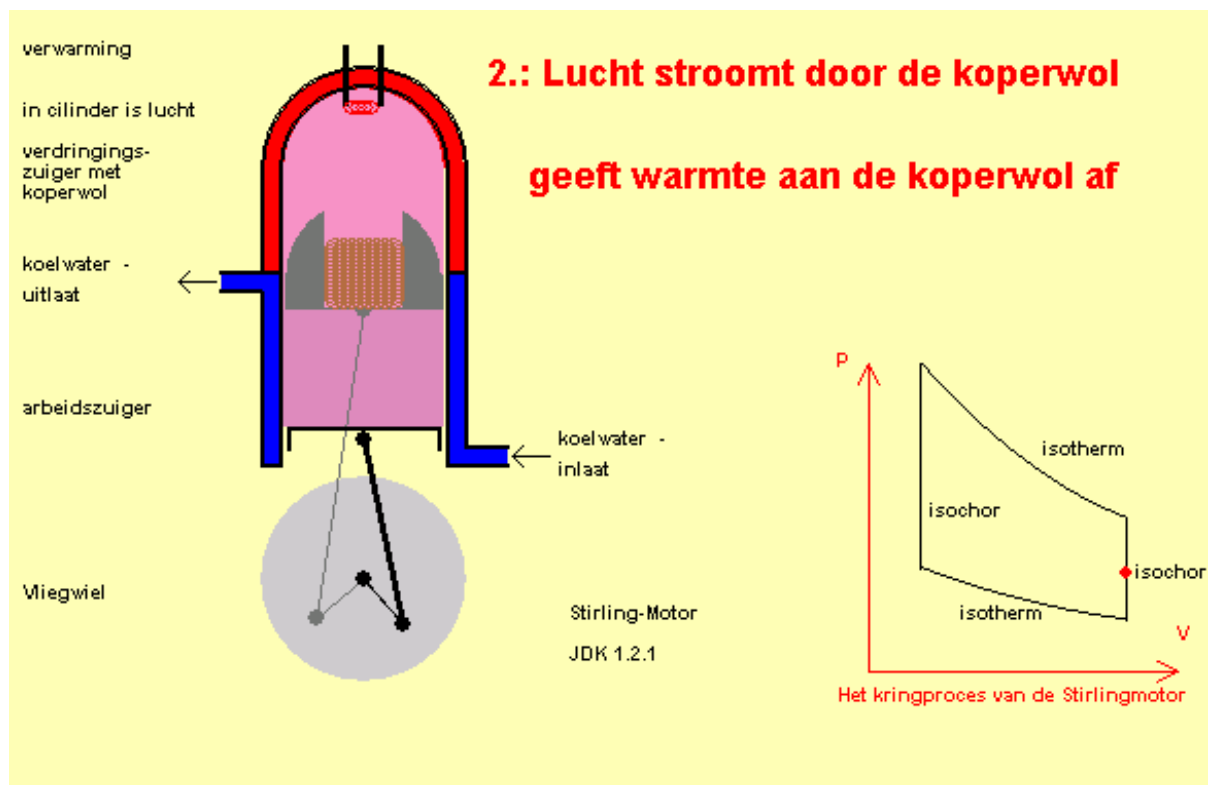
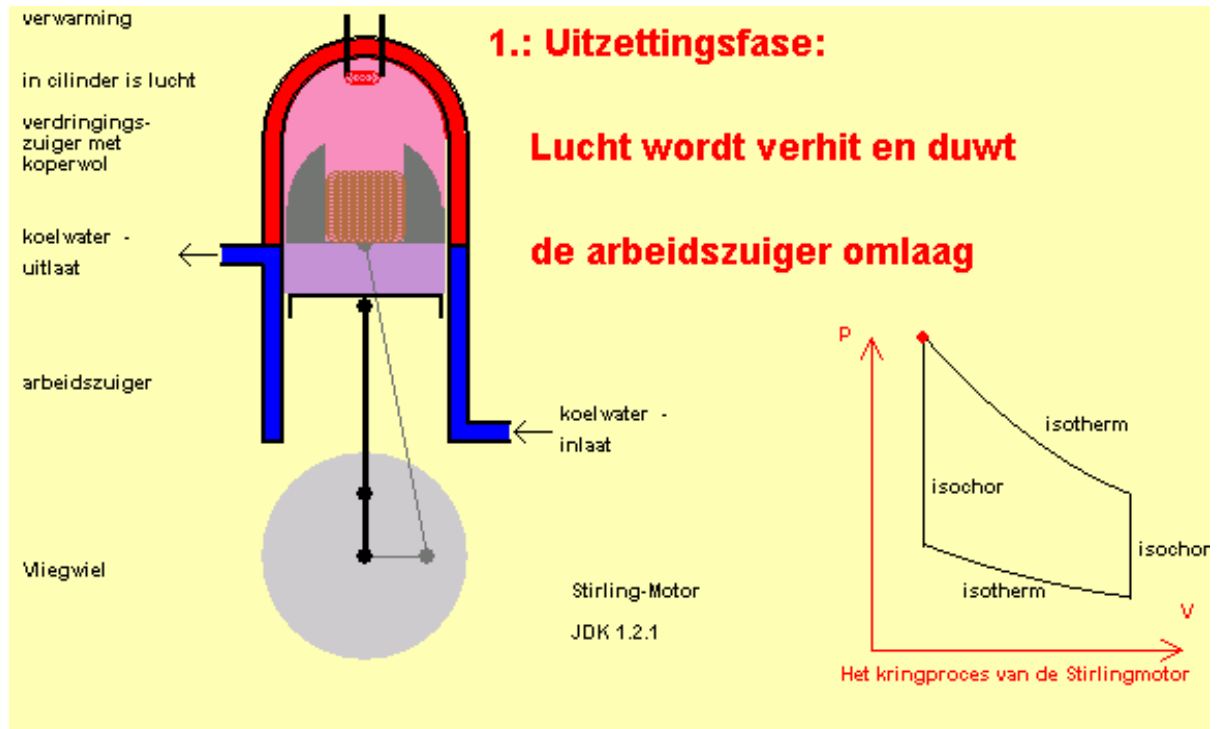
De Stirling-motor is gebaseerd op een gesloten thermodynamische cyclus, waarbij een werkgas (helium, lucht) afwisselend gecomprimeerd wordt als het koud is en geëxpandeerd als het warm is. Dit levert netto arbeid op, die gebruikt wordt om een elektromotor aan te drijven (Stirlingmotor).

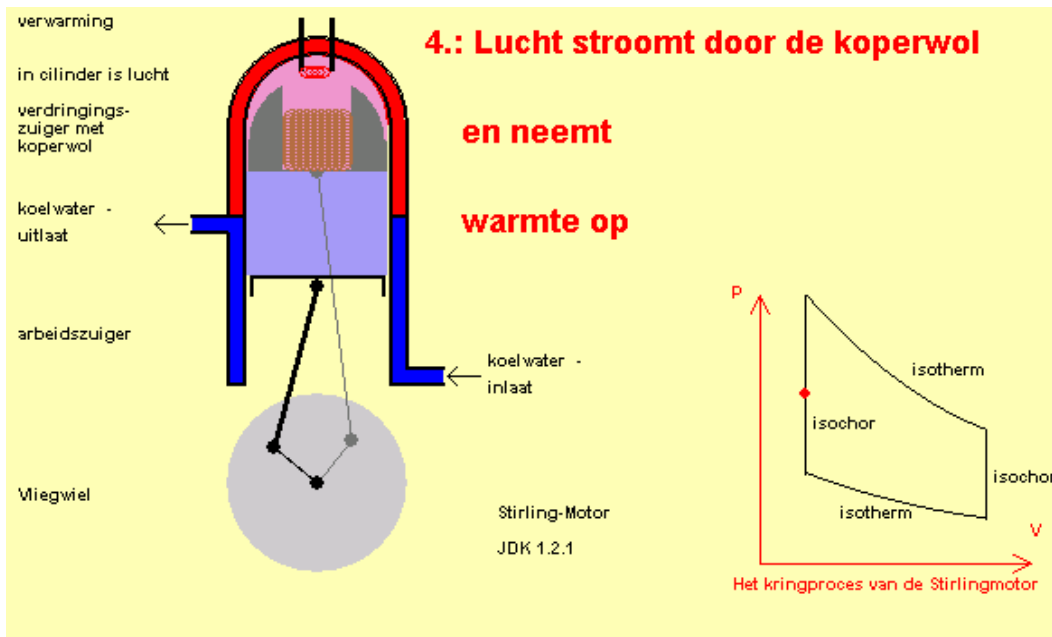
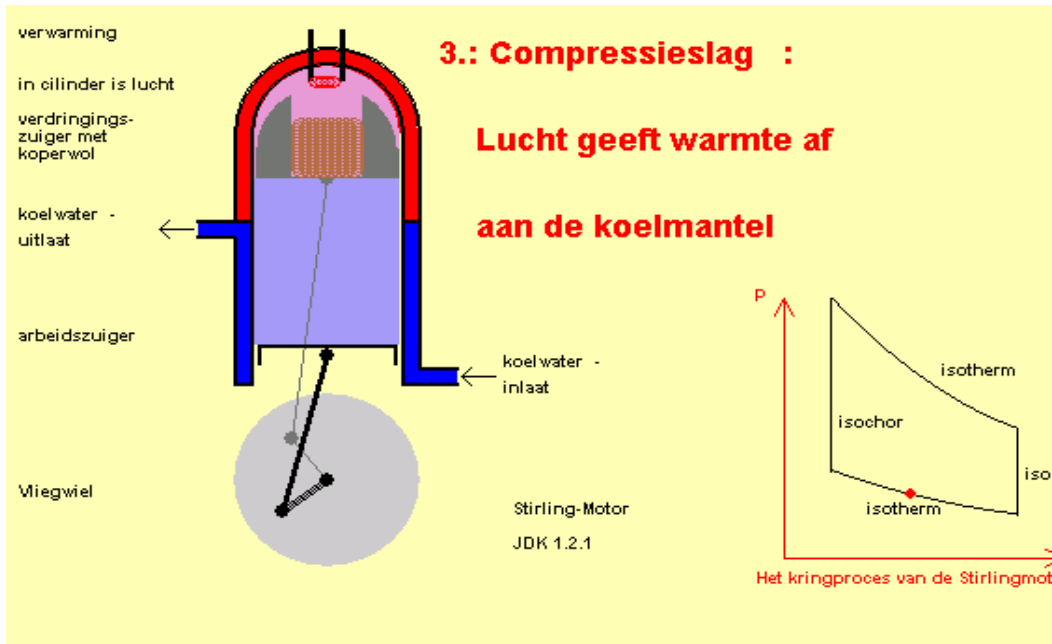
Er bestaan verschillende soorten stirlingmotoren. In *Figuur 20* is het β -type stirlingmotor te zien. Hij bestaat uit een cilinder, waarin een arbeidszuiger en een verdringingszuiger met een faseverschil van 90° bewegen. In het bovenste deel van de cilinder wordt de lucht verhit en in het onderste deel afgekoeld. De verdringingszuiger heeft als doel het afgesloten werkgas van het bovenste deel naar het onderste deel te verplaatsen en omgekeerd. Hier gebeurt dat door middel van een gat in de verdringingszuiger. Dit gat is met koperwol gevuld. Bij het verdringen van de lucht stroomt de lucht door het gat met de koperwol, die daarbij warmte van de lucht opneemt en later deze warmte weer kan afgeven; door deze eigenschap wordt de koperwol 'regenerator' genoemd. Bij een ideaal stirlingproces is er sprake van 4 achter elkaar verlopende toestandsveranderingen:

1. Het werkgas zet uit waarbij de temperatuur constant blijft (isotherm proces), dit heeft als gevolg dat in het bovenste deel van de cilinder het werkgas wordt verwarmd en door de druk beweegt de arbeidszuiger naar beneden.
2. Na de uitzetting wordt het werkgas in de regenerator afgekoeld waarbij het volume constant blijft (isochoor proces). De verdringingszuiger, die een kwartslag voorloopt, verplaatst zich naar boven. Het werkgas stroomt door de koperwol van de regenerator in het onderste deel van de cilinder en geeft aan het koper warmte af.
3. Bij constante temperatuur wordt het werkgas dan samengeperst. De arbeidszuiger beweegt naar boven en perst hierdoor het werkgas samen (compressiefase). De warmte die hierbij ontstaat wordt aan de koelmantel afgegeven.

4. Tenslotte wordt het werkgas weer verwarmd tot de begintemperatuur. De verdringingszuiger duwt het werkgas in het bovenste deel van de cilinder en neemt hierbij de warmte van de koperwol op.

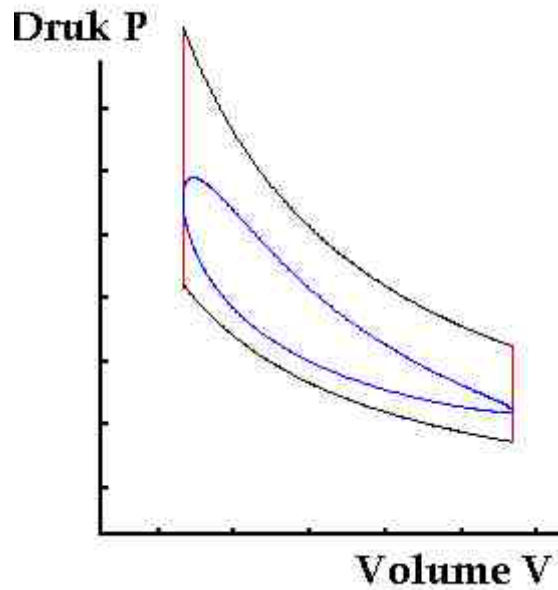
Deze kringloop herhaalt zich.





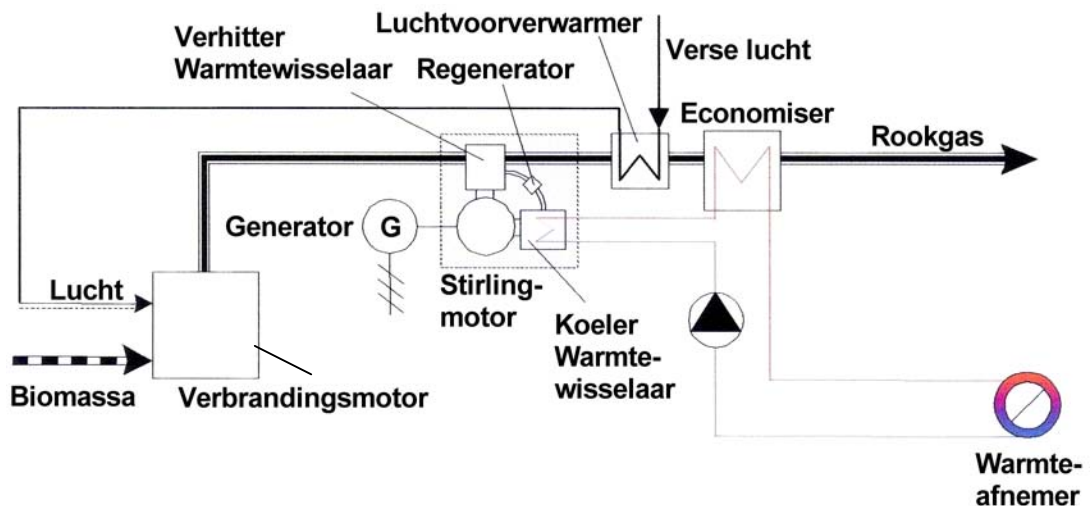
Figuur 20: Voorstelling werking van Stirlingmotor (verschillende fases)

De vier hierboven genoemde slagen vinden plaats in een ideale stirlingmotor. De getoonde motor benadert het ideale proces. De vier afzonderlijke slagen **overlappen** elkaar. Zo treedt bij de uitzetting tegelijkertijd ook een uitwisseling van het warme gas naar het koude op, en is tijdens de compressie nog niet alle lucht in het koude deel van de motor. Het werkelijke stirlingproces wordt door de ovaal uitzijnde curve in het p-V diagram weergegeven.



Figuur 21: p - V diagram met ideale en werkelijke cyclus van Stirling motor

De elektriciteit wordt in een Stirling-motor opgewekt door de zuiger die heen en weer beweegt, de warmte kan gedeeltelijk gerecupereerd worden uit de resterende warmte in de rookgassen. Indien men echter een echte kwalitatieve WKK met de hoogste energetische efficiëntie nastreeft, moet men ook gebruik maken van de warmte die door het koelmedium wordt afgevoerd uit de Stirling-motor. De warmte uit de rookgassen wordt in dit geval voornamelijk gebruikt om de verbrandingslucht voor te verwarmen.



Figuur 22: Schematische voorstelling van een WKK-installatie op biomassa met een Stirling-motor (ref. 7)

Het elektrisch rendement is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de warme en koude kant en de weerstand van de motor. Het elektrisch rendement kan schommelen tussen de 6.5% en de 28%. Het thermisch rendement is afhankelijk van de temperatuur nodig voor

de warmtetoepassing, de temperatuur aan de koude kant en de eventueel resterende warmte in de rookgassen.

Voor een Stirlingmotor is een hogere temperatuur warmte vereist in vergelijking met een ORC.

Belangrijke voordelen van een Stirling-motor :

- Zeer compacte bouw en gemakkelijk toe te voegen aan bestaande warmtesystemen om in eigen elektriciteitsvoorziening te kunnen voldoen.
- Lage onderhoudskosten.
- Gemakkelijk aan en af te schakelen om bijvoorbeeld piekverbruik op te vangen.
- Koppeling van meerdere motoren mogelijk
- Onafhankelijk van brandstof dus geen hoge eisen voor brandstof.

Nadelen van een Stirling-motor:

- De warmtewisselaar in de verbrandingskamer is zeer gevoelig voor depositie van stof cfr. warmtewisselaars in warm water/stoomketel.
- Afdichting van het arbeidsmedium in de motor moet zeer goed zijn.
- Enkel voor kleine installaties (momenteel tot 50 kWel, in de toekomst 150 kWel).
- De Stirling-motor is in demonstratiefase en heeft nog maar weinig draaiuren op zijn palmares.

b. Gasturbine voor vaste brandstof

Verschillende fabrikanten en onderzoeksinstituten zijn bezig met onderzoek naar hete lucht turbines. Zowel de rookgassen van een klassieke verbranding als de rookgassen na verbranding van stookgas zouden dan na reiniging kunnen gebruikt worden in een hete lucht turbine om elektriciteit op te wekken. De resterende warmte na de turbine dient dan voor de warmtetoepassing.

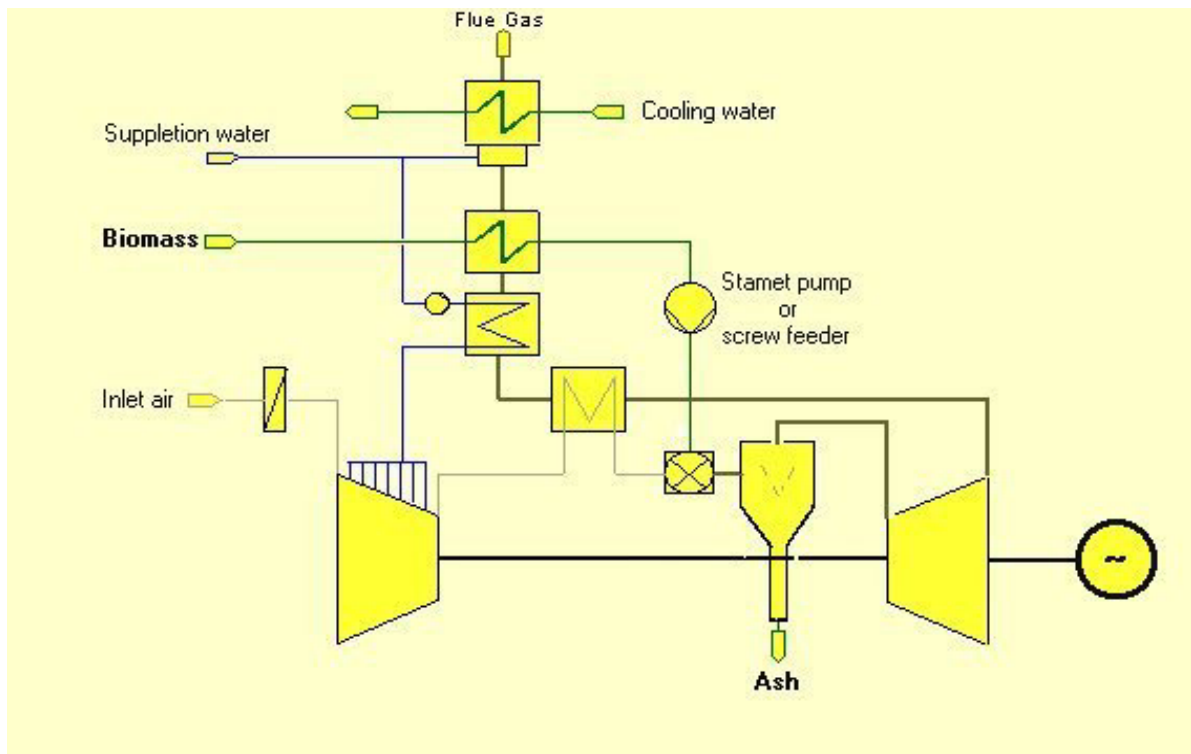
Voordelen van deze toepassing zijn dat een goede elektrische efficiëntie kan bekomen worden. Nadelen van deze toepassing is het feit dat het nog in onderzoeksstadium is, dat de installatie vrij complex is, dat de rookgassen moeten gereinigd worden vooraleer ze in de turbine kunnen en dat deze turbines (nog) niet goedkoop zijn.

TOPHAT-biomassa gasturbine (Kema – Alpha Power Systems NL)

Een veelbelovend project is de toepassing van een TOPHAT-cyclus op de verbranding van biomassa van de Nederlands fabrikant Alpha Power Systems.

In *Figuur 23* wordt een schematische voorstelling gegeven van de techniek. In de compressor wordt oververhit water geïnjecteerd. De compressor comprimeert de lucht tot ca 8 bar. Door de verdamping van het water komt de verbrandingslucht relatief koel uit de compressor. De koele gecomprimeerde lucht wordt gerecupereerd tegen de hete afgassen van de expansieturbine en vervolgens naar een TORBED-verbrandingskamer geleid. Na verbranding en reiniging van de rookgassen worden deze in een robuuste turbine met massieve beschoeping geëxpandeerd bij 900 °C. Het geëxpandeerde rookgas warmt de verbrandingslucht voor in de recuperator. Vervolgens wordt de lage temperatuur warmte

gebruikt om zowel het injectiewater voor te warmen als de biomassa te drogen en te verhitten. De biomassa wordt met een schroef in de TORBED verbrandingskamer gebracht en verbrand. Het rendement van de turbine is ca 43%, betrokken op de biomassa. Het systeem is aanmerkelijk minder complex dan vergassing van biomassa en een stuk goedkoper. Daarnaast is het een voordeel dat de TOPHAT turbine klein en economisch gebouwd kan worden met een aantrekkelijk rendement. De turbine kan dan naar de brandstof gebracht worden in plaats van de brandstof naar de turbine en dit is energetisch aantrekkelijk.



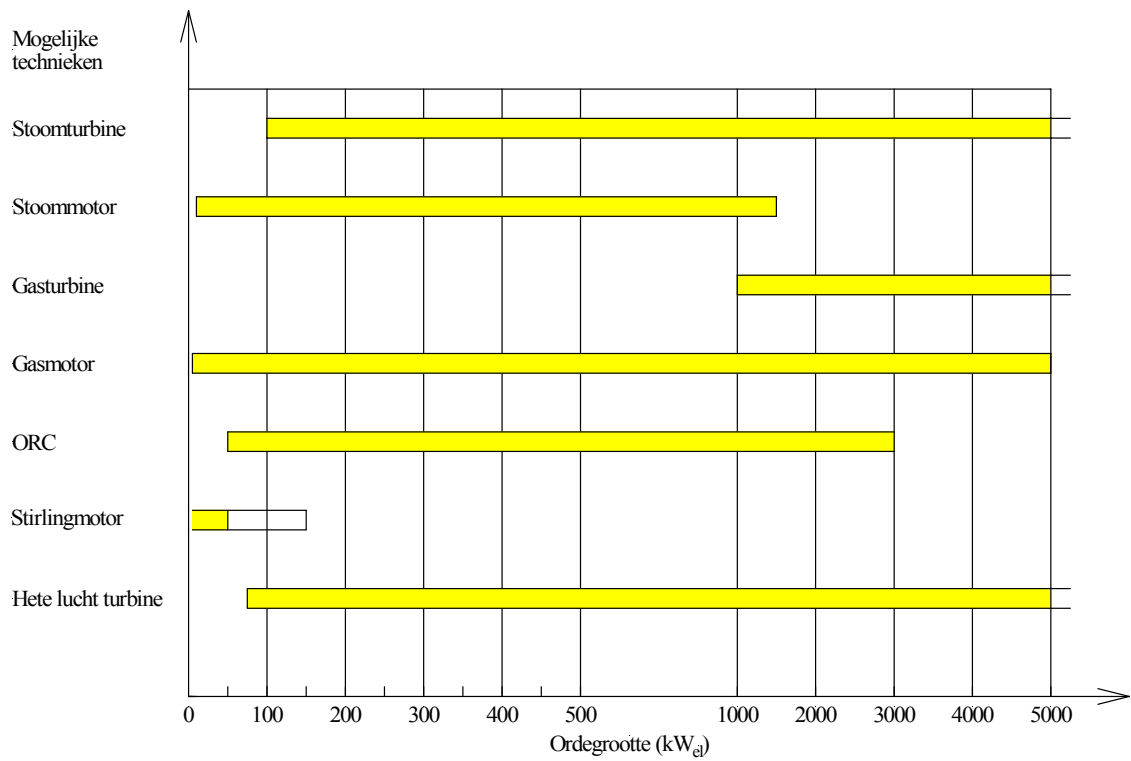
Figuur 23: TOPHAT-biomassa(ref. 45)

De TOPHAT-turbine kan uiteraard ook met een vergasser in plaats van een klassieke verbrandingskamer uitgerust worden. Dit heeft voordelen naar de standtijd van de turbine toe.

2.4 Besluit

Uit bovenstaand overzicht komt naar voor dat een stoom of warm water ketel de techniek is met de grootste betrouwbaarheid. Stoom wordt zowel gebruikt voor de warmtetoepassingen als voor elektriciteitsopwekking. Elektriciteitsproductie met stoom in kleine installaties is economisch (nog) niet interessant (cfr. hoofdstuk 4). Het onderzoek heeft zich dan ook toegespitst naar andere mogelijke technieken om aan elektriciteitsproductie te doen. Zo lijken vergassing met gasmotoren of gas turbines, ORC en Stirling veelbelovende technieken, het prijskaartje dat eraan vast hangt is echter nog zeer hoog en niet lager dan bij stroomproductie uit stoom.

In *Figuur 24* wordt een overzicht gegeven van de verschillende technieken met hun ranges.



Figuur 24: Mogelijke technieken voor opwekking van elektriciteit met hun vermogensrange

Tabel 8: Samenvatting en overzicht van verschillende technologieën met hun werkingsprincipe, vermogensrange en voor- en nadelen.

Technologie	Werkingsprincipe	Range	Voordelen	Nadelen	Opmerkingen
<i>Stoomturbine</i>	Oververhitte stoom ontspant over turbine die gekoppeld is aan generator	$> 0.1 \text{ MW}_{\text{el}}$	<ul style="list-style-type: none"> - betrouwbaar en bewezen - grote vermogens mogelijk - verbranding en elektriciteitsproductie gescheiden 	<ul style="list-style-type: none"> - lage elektrische efficiëntie - hoge kost - nominale warmteafname noodzakelijk bij tegendrukturbine 	2 types: <ul style="list-style-type: none"> - tegendrukturbine: $0.1 - 5 \text{ MW}_{\text{el}}$ - condenserende turbine: vanaf 2 MW_{el}
<i>Stoommotor</i>	Stoom expandeert in cilinder en verricht arbeid op zuiger, arbeid wordt omgezet in elektriciteit	$20 \text{ kW}_{\text{el}} - 1.5 \text{ MW}_{\text{el}}$	<ul style="list-style-type: none"> - betrouwbaar en bewezen - goed deellast rendement - kleine vermogens - verzadigde stoom bruikbaar 	<ul style="list-style-type: none"> - elektrische efficiëntie (6-20%) - geluidsintensief - hoge onderhoudskost 	
<i>Interne verbrandingsmotor</i>	Stookgas wordt gecomprimeerd en verbrand in motor	$10 \text{ kW}_{\text{el}} - 5 \text{ MW}_{\text{el}}$	<ul style="list-style-type: none"> - elektrisch rendement (geen omweg via stoomcyclus) 	<ul style="list-style-type: none"> - laagwaardige warmte voor WKK - stookgasreiniging 	2 types: <ul style="list-style-type: none"> - Otto-motor - Dual fuel motor
<i>Gasturbine</i>	Stookgas wordt verbrand in turbine met gecomprimeerde lucht	Vanaf 1 MW_{el}	<ul style="list-style-type: none"> - elektrisch rendement (geen omweg via stoomcyclus) - goede warmtebenutting mogelijk van uitlaatgassen 	<ul style="list-style-type: none"> - beperkt aantal draaiuren - stookgasreiniging - grootteorde (vanaf 1 MW_{el}) 	

<i>ORC</i> <i>(Organic Rankine Cycle)</i>	Thermische olietel verwarmt organisch fluïdum. Organisch fluïdum expandeert over turbine.	50 kW _{el} – 3 MW _{el}	<ul style="list-style-type: none"> - benutting laagwaardige warmte voor elektriciteit - lagere druk en temperatuur: positief voor biomassaketel - kleine vermogens 	<ul style="list-style-type: none"> - secundaire cyclus - kleine vermogens - beperkte ervaring biomassa 	
<i>Stirling motor</i>	Warmte doet het werkgas afwisselend uitzetten en inkrimpen waardoor arbeid op zuiger verricht en elektriciteit kan leveren.	10 kW _{el} – 150 kW _{el}	<ul style="list-style-type: none"> - benutting warmte voor elektriciteit - compacte bouw - lage onderhoudskost - onafhankelijk van brandstof 	<ul style="list-style-type: none"> - problemen met warmtewisselaar - kleine vermogens - demonstratiefase 	
<i>Gasturbine voor vaste brandstof</i>	Hete rookgassen expanderen in turbine.	> 75 kW _{el}	<ul style="list-style-type: none"> - elektrische efficiëntie - compacte bouw 	<ul style="list-style-type: none"> - onderzoeksfase 	

3 ENERGETISCHE ASPECTEN

In het voorgaande hoofdstuk werden de verschillende technieken besproken voor energieomzetting van houtafval. In dit hoofdstuk wordt hout vergeleken met andere fossiele brandstoffen en worden de beperkingen van hout op een rij gezet. Ook worden de energetische aspecten van installaties met enkel stoom/warm water, enkel elektriciteit en WKK vergeleken. Als laatste deel in dit hoofdstuk wordt uitgebreid ingegaan op de energetische aspecten van WKK-installaties in het kader van de WKK-certificaten die in de toekomst² ingevoerd zouden worden.

3.1 Bespreking van de mogelijke energiedragers voor houtafval

De bespreking van de energiedragers wordt beperkt tot de klassieke (commercieel beschikbare) dragers zoals vermeld in de inleiding en de moderne ontwikkelingen hierbij. Andere mogelijk toekomstige dragers onder vorm van vloeibare brandstoffen vb. voor transport (zoals pyrolyse-oliën, methanol) of gasvormige brandstoffen (andere dan stookgas, zoals syngas, waterstof) worden bondig behandeld.

3.1.1 Benutting van biomassa/houtafval voor productie van enkel warmte ($W/K=\infty$)

Houtafval wordt in Vlaanderen vnl. in de houtindustrie gebruikt voor dekking van de bedrijfsbehoeften (decentraal) aan:

- productie van proceswarmte onder vorm van stoom, thermische olie of oververhit water o.a. voor het drogen van hout, het persen van niet-veredelde spaanplaat, voor de spaanplaatveredeling etc.;
- verwarming.

Het aantal industriële houtafvalverbrandingsinstallaties in Vlaanderen wordt door OVAM op 150 geschat, het grootste deel hiervan in de categorieën stookinstallaties ($< 5 \text{ MW}_{\text{th}}$) en een beperkt deel tussen 5 en $50 \text{ MW}_{\text{th}}$ (dus geen grote stookinstallaties $>50 \text{ MW}_{\text{th}}$).

Voor de productie van proceswarmte is organisch-biologische stof en zeker houtafval uitermate geschikt omwille van het feit dat 1 kWh houtafval praktisch 0.9 kWh aardgas vervangt en dus hierbij met een hoog energetisch rendement kan ingezet worden.

Probleem bij verwarming (ook bij proceswarmte maar in mindere mate) is de sterk seizoensafhankelijk warmtebehoefte. Bedrijven in de houtindustrie leggen om deze reden meestal een grote stock aan voor houtafval. Mogelijk alternatieven om tot een meer continue warmtebehoefte te komen is de productie van koude via een absorptiekoelmachine (eventueel voor een naburig bedrijf) of warmte- of warmte-koude opslag vb. in de ondergrond.

² De kwaliteitscriteria van een kwalitatieve WKK werden reeds vastgelegd in het besluit van de Vlaamse regering van 7 september 2001. Het uitvoeringsbesluit ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties is op het moment van verschijnen van dit rapport nog niet goedgekeurd, maar verwacht wordt dat de WKK-certificaten medio 2004 van start kunnen gaan.

Indien de warmteafname geen probleem stelt, dan kan deze gemaximaliseerd worden door benutting van de condensatiewarmte (zoals toegepast in een aantal installaties in Oostenrijk).

3.1.2 Benutting van houtafval voor de productie van uitsluitend elektriciteit (W/K=0)

Voor de productie van uitsluitend elektriciteit uit houtafval kan onderscheid gemaakt worden tussen enerzijds specifieke houtafval krachtcentrales (op basis van vnl. hout of andere biomassa) en anderzijds meeverbranding of bijstook in steenkoolcentrales. Krachtcentrales op basis van enkel houtafval of biomassa komen slechts weinig voor (tot op heden geen in Vlaanderen, wel in Duitsland en Nederland: vb. de 25 MW_e – 100 MW_{th} - wervelbedcentrale van PNEM te Cuyck, op basis van dunningshout en houtafval van bosbouw). De bouw van dergelijke krachtcentrales op houtafval is volledig terug te voeren op de ondersteuning van groene stroom.

In de steenkoolcentrale van Ruien wordt meeverbranding van houtstof gedaan en daarnaast wordt eveneens aan bijstook van onbehandeld houtafval gedaan, na voorafgaande aparte vergassing van het houtafval via wervelbed met capaciteit van ca. 50 MW_{th}.

Houtafval krachtcentrales zoals in Cuyck vertonen een aantal belangrijke nadelen zoals:

- grote actieradius voor aanvoer van houtafval;
- hoge specifieke investeringskost;
- laag elektrisch rendement (max. 30 % en dus aanzienlijk lager dan voor steenkool).

Het lage elektrisch rendement van houtafval krachtcentrales vloeit voort uit de noodzaak tot beperkte stoomparameters ($T < 450^{\circ}\text{C}$ en $P < 70$ bar, t.o.v. resp. 540°C en 160 bar bij steenkool), omwille van gevaar voor corrosie, slakvorming en vervuiling in de ketel. Het hoge alkali gehalte van houtafval, vnl. kalium, is oorzaak van verhoogd corrosief gedrag in vergelijking met steenkool. Slakvorming en vervuiling in de ketel worden veroorzaakt door het lage verwekingspunt van de vliegassen uit houtafvalverbranding, eveneens ten gevolge van het hogere alkaligehalte. Oplossing van deze problematiek vereist een combinatie van corrosiebestendiger materialen en systemen voor het verhinderen van slakvorming en vervuiling van de ketel (gasfiltratie en/of reiniging ketelwand).

De nadelen inherent aan zuivere houtafval krachtcentrales worden sterk verminderd bij meeverbranding of bijstook van houtafval in steenkoolcentrales, mits het percentage houtafval voldoende beperkt wordt gehouden (tot ca. 10 % van de brandstofenergie). Tegelijkertijd biedt de co-verbranding van houtafval de mogelijkheid tot een vermindering van de SO₂- en eventueel de NO_x-uitstoot (mits aangepaste branderopstelling en -afstelling).

De ontwikkeling van steenkoolcentrales is gericht op een combinatie van enerzijds verhoging van het energetisch rendement en anderzijds van de verlaging van de milieubelasting en dit aan een zo competitief mogelijke economische kost. Op vlak van rendementsverbetering wordt op langere termijn gestreefd naar (naast een verdere geleidelijke verhoging van de stoomparameters met momenteel max. 40 % rendement):

- superkritische steenkoolcentrales (vb. in Duitsland het Westfalen D project, met superkritische stoom bij 290 bar en 600 °C en een netto rendement van 47 %)
- IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle (waarbij steenkool wordt vergast en het geproduceerde stookgas vervolgens in een STEG – combinatie van gasturbine en stoomcyclus- wordt gebruikt zoals reeds op grote schaal toegepast met aardgas en

zodanig dat een mogelijke rendementsverhoging tot max. 50 % kan bereikt worden; in Nederland werd een demonstratieproject op industriële schaal van 250 MW_{th} uitgevoerd in Buggenum waarbij de technische haalbaarheid werd aangetoond)

Naar analogie met steenkool wordt voor biomassa aan eenzelfde ontwikkelingstraject gedacht. Treffend detail hierbij is dat in Nederland momenteel door een internationaal consortium (Shell, BTG, Siemens, Stork) bekeken wordt om de centrale in Buggenum te gebruiken als demonstratieproject voor IGCC op basis van biomassa.

Op deze lange termijn ontwikkelingen wordt echter in deze studie niet dieper ingegaan, deze geven wel een aanduiding van de mogelijke verdere evolutie en het beschikbare potentieel.

3.1.3 Benutting van biomassa/houtafval voor de gecombineerde productie van warmte en elektriciteit: WKK (W/K >0 en <∞)

Bij klassieke WKK kan op vlak van energiebenutting onderscheid gemaakt worden tussen volgende varianten:

- WKK naar elektriciteit geoptimaliseerd (meestal met condensatie-aftapturbine en afvoer van niet benodigde warmte);
- WKK naar warmte geoptimaliseerd (met hoogste energetisch rendement vooral wanneer met een tegendrukturbine wordt gewerkt omdat de geproduceerde warmte dan bijna volledig kan benut worden, de afname van de nominale warmteproductie moet in alle omstandigheden gegarandeerd zijn).

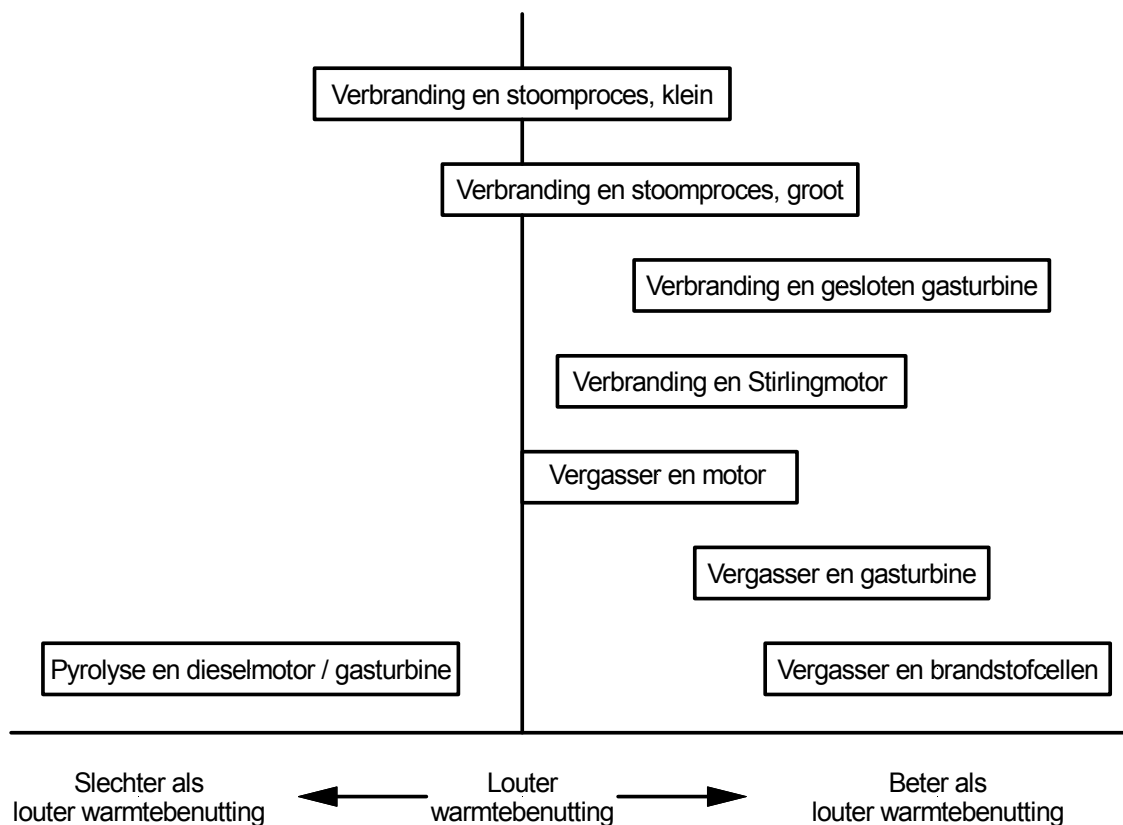
Probleem bij WKK in het algemeen (maar vooral indien warmte geoptimaliseerd) is dat een voldoende constante basislast van warmte nodig is teneinde een voldoende hoog energetisch en economisch rendement te bekomen. WKK installaties zijn dan ook meestal decentrale eenheden.

Een mogelijk alternatief om tot een beter gespreide warmtebehoefte te komen is de productie van koude via een absorptiekoelmachine in geval dit economisch zinvol is.

In dit geval wordt gesproken van poly- of trigeneratie (warmte/koude/elektriciteit). Andere alternatieven voor een meer continue energieproductie zijn:

- warmte-opslag of warmte-koude opslag in de ondergrond;
- maximale elektriciteitsproductie, vnl. uit laagwaardige warmte via ORC.

Een bijkomende voorwaarde voor de benutting van warmte is de nodige kwaliteit van de warmte. Indien de warmte als processtoom wordt gebruikt in een bestaande naburige installatie, dient de stoom op een bepaalde druk en temperatuur afgeleverd te worden. De stoomdrukken die nodig zijn in de industrie liggen tussen de 5 en 15 bar (overeenkomstig een temperatuur tussen de 160°C en 210°C). Ook wanneer de warmte gebruikt wordt in een verwarmingssysteem, mag de temperatuur van de aanwezige warmte niet zakken onder bepaalde grenzen. Dit om nog een energetische efficiënte en economisch haalbare warmtewisselaar te kunnen inzetten. De meeste verwarmingssystemen hebben een ingangstemperatuur van 90°C en een uitgangstemperatuur nodig van 110°C, d.w.z. dat de warmte uit de WKK-installatie minimum 5 tot 10°C groter moet zijn om een goede warmtewisseling te bekomen (hoe groter ΔT , hoe beter de warmtewisseling en hoe kleiner de warmtewisselaar).



Figuur 25: Mogelijkheden warmtebenutting bij verschillende technieken (ref. 2)

Uit bovenstaande overwegingen blijkt dat een warmtegestuurde WKK-installatie inderdaad energetisch het meest optimale alternatief is maar dat deze optimalisatie in de praktijk gebonden is aan bepaalde voorwaarden met betrekking tot de kwaliteit van de warmte. Laagwaardige warmte kan in vele gevallen dan ook niet nuttig aangewend worden.

Een hogere kwaliteit van warmte legt ook beslag op energie die normaal gebruikt werd voor elektriciteitsproductie. Een WKK-installatie met als warmte-toepassing processtoom, zal een lager elektrisch rendement hebben dan een installatie met verwarming.

Op vlak van energieconversie kan bij WKK onderscheid gemaakt worden tussen volgende varianten (in volgorde van de stand van ontwikkeling):

- de elektriciteitsopwekking gebeurt op de klassieke manier, d.w.z. indirect via een Rankine-cyclus met intermediaire stoomkring, waarbij voor kleine vermogens onder 5 MW_e beroep kan gedaan worden op stoommotoren en daarboven op stoomturbines;
- de elektriciteitsopwekking gebeurt indirect zoals in vorig punt met een intermediaire kring, maar met als fluïdum een organische stof i.p.v. water;
- de elektriciteitsopwekking gebeurt direct (zonder intermediaire kring, waardoor een belangrijke besparing mogelijk is) via een Stirling motor of via vergassing in een vast bed of wervelbed en gebruik van het stookgas na reiniging in een gasmotor of gasturbine.

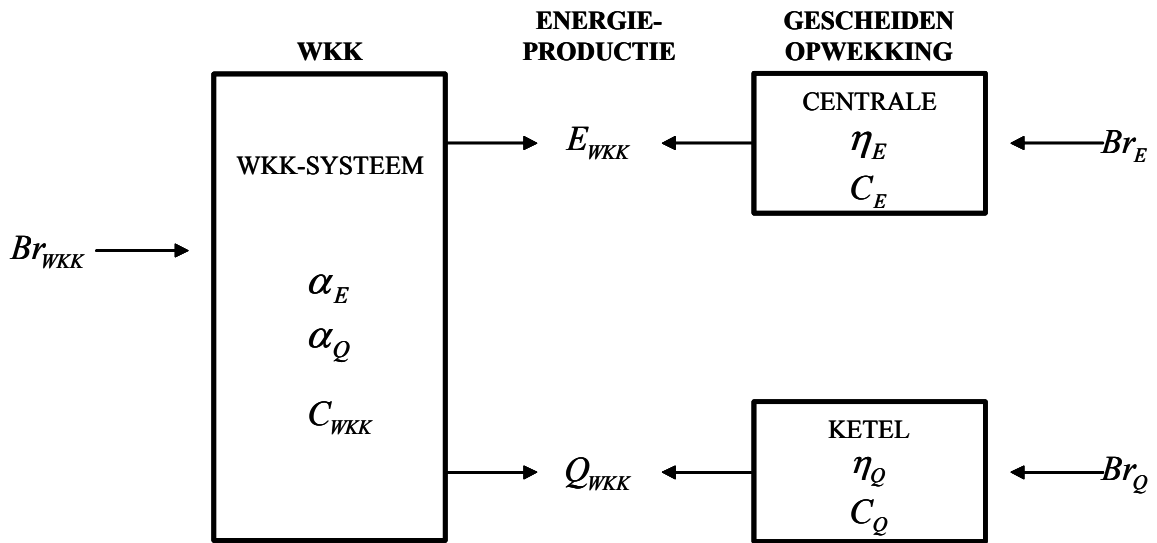
3.2 Kwalitatieve WKK

Warmte-kracht-koppeling (WKK) wordt beschouwd als één van de meest energie efficiënte technologieën en om deze reden neemt WKK dan ook een vooraanstaande plaats in in energiebesparingsprogramma's van de meeste landen.

Om te bepalen in hoeverre WKK een energiebesparing en CO₂-vermindering oplevert, moet men gaan kijken naar de prestaties van het WKK-systeem. Daarvoor is de referentiesituatie van gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte ten opzichte van WKK een belangrijke parameter. De eisen voor WKK om energiebesparend te zijn worden steeds strenger omdat vergeleken wordt met gescheiden opwekking van elektriciteit in een STEG-centrale en gescheiden opwekking van warmte in een hoge rendementsketel.

Omdat dus niet elke WKK-installatie per definitie energiebesparend is, is de kwaliteit van WKK een belangrijke maatstaf voor de bijdrage van WKK op het vlak van energiebesparing. Criteria om de kwaliteit van WKK te kunnen bepalen, zijn in verschillende landen ontwikkeld, zo ook in België.

In het 'Besluit van de Vlaamse regering tot bepaling van de voorwaarden waaraan een kwalitatieve warmte-kracht installatie moet voldoen' van 7 september 2001 worden de voorwaarden voor een kwalitatieve WKK vastgelegd voor Vlaanderen. Volgens artikel 3 §1 moet een kwalitatieve WKK-installatie een relatieve primaire energiebesparing realiseren die minimum 5% bedraagt. De relatieve primaire energiebesparing (PEB) wordt berekend door het elektrisch en thermisch rendement van een WKK te vergelijken met het elektrisch rendement van een referentie centrale en het thermisch rendement bij een referentieketel bij gescheiden opwekking.



Br_{WKK}	: brandstofverbruik WKK	[GJ]
α_E	: elektrisch rendement WKK	[fractie van 1]
α_Q	: thermisch rendement WKK	[fractie van 1]
C_{WKK}	: CO ₂ -emissiefactor WKK	[kg / GJ]
E_{WKK}	: elektriciteitsproductie	[GJ]
Q_{WKK}	: warmteproductie	[GJ]
Br_E	: brandstofverbruik elektriciteitscentrale	[GJ]
η_E	: elektrisch rendement elektriciteitscentrale	[fractie van 1]
C_E	: CO ₂ -emissiefactor elektriciteitscentrale	[kg / GJ]
Br_Q	: brandstofverbruik ketel	[GJ]
η_Q	: thermisch rendement ketel	[fractie van 1]
C_Q	: CO ₂ -emissiefactor ketel	[kg / GJ]

Figuur 26: Basisschema vergelijking WKK en gescheiden opwekking als referentiescenario op basis van ontwerpendementen

De gehanteerde formule voor de relatieve primaire energiebesparing voor WKK ten opzichte van de in *Figuur 26* gegeven referentiesituatie, is als volgt:

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

de uitdrukking $\alpha_e/\eta_e + \alpha_q/\eta_q$ geeft de gesubstitueerde hoeveelheid aardgas in GJ per GJ brandstof, bijvoorbeeld houtafval, ten opzichte van het referentiescenario met gescheiden opwekking met aardgas cfr. *Figuur 26*).

Voorbeeld

Een zuigermotor in warmtekrachttoepassing heeft volgende nominale rendementen:

Elektrisch rendement : 40%

Thermisch rendement : 45%

Referentierendementen

Elektriciteit (STEG) : 50%

Warmte (ketel) : 90%

Door toepassing van de principes in Figuur 26: Basisschema vergelijking WKK en gescheiden opwekking als referentiescenario op basis van ontwerpreeksrendementen kan berekend worden dat deze warmtekrachtinstallatie een primaire energiebesparing van 23% realiseert (ten opzichte van de brandstofinput in de WKK).

Om de gerealiseerde energiebesparing in absolute termen (GJ) correct te bepalen (bijvoorbeeld op jaarbasis) zijn meetgegevens noodzakelijk; hierbij dient de brandstofinput, de elektriciteitsproductie en de nuttig aangewende warmte gemeten te worden. Aannames inzake referentierendementen zijn hierbij nog steeds noodzakelijk.

Om in aanmerking te kunnen komen voor warmtekrachtcertificaten dient er aangetoond te worden dat de installatie een minimale primaire energiebesparing realiseert van 5% ten opzichte van de gekozen referentiesituatie. Hierbij worden volgende referentierendementen gehanteerd:

Elektriciteit:

Voor WKK-installaties aangesloten op een spanningsniveau > 15 kV η_e : 55%

Voor WKK-installaties aangesloten op een spanningsniveau ≤ 15 kV η_e : 50%

Warmte:

Voor warmtetoepassingen onder de vorm van stoom η_q : 85%

Voor warmtetoepassingen onder de vorm van warm water η_q : 90%

In het bovenstaande wordt WKK en ‘kwaliteit van WKK’ benaderd vanuit de context “klassieke” warmtekrachttoepassingen, met name gasturbines en zuigermotoren gevoed met klassieke brandstoffen (gasolie, aardgas) voor de productie van elektriciteit en warmte (onder de vorm van stoom of warm water). Diverse warmtekrachttoepassingen zijn echter niet direct (volledig) in dit schema onder te brengen: mechanische aandrijving, hete lucht, alternatieve brandstoffen zoals houtafval en andere vormen van organisch-biologische stof, etc.

De mate van energiebesparing is afhankelijk van diverse elementen: de technische kenmerken van de WKK-installatie, benutting van de geproduceerde warmte, de gehanteerde referentiesituatie, etc. De technische kenmerken van een WKK-installatie zijn op zich ook sterk afhankelijk van de gebruikte brandstof en zeker alternatieve brandstoffen zoals biomassaströmen hebben hun technische beperkingen.

3.3 Evaluatie van energetische omzettingsrendementen van hout t.o.v. andere fossiele brandstoffen

In het besluit van de Vlaamse regering van 7 september 2001 werd als referentiescenario bij gescheiden energieopwekking gekozen voor de fossiele brandstof nl. aardgas met de beste omzettingsrendementen naar warmte en elektriciteit. Wanneer echter een ander referentiescenario gekozen wordt, dit wil zeggen een andere referentiebrandstof, zien de relatieve energiebesparingen er anders uit.

In *Tabel 9* zijn gemiddelde omzettingcoëfficiënten van hout en de verschillende fossiele brandstoffen voor de productie van enkel warmte en van enkel elektriciteit weergegeven. Ook worden hier de gesubstitueerde hoeveelheden fossiele brandstof berekend voor de productie van warmte en elektriciteit (mono- en co-verbranding). In *Tabel 10* zijn de gesubstitueerde hoeveelheden brandstof van een WKK ten opzichte van gescheiden opwekking berekend voor verschillende combinaties van brandstoffen. Voor de omzettingrendementen van hout wordt in deze tabellen gerekend met de gemiddelde efficiënties van een klassieke houtverbrandingsketel die stoom opwekt en waar de stoom gebruikt wordt in een stoomturbine in geval van elektriciteitsopwekking. Deze technologie werd gekozen voor hout aangezien deze in de praktijk het meest voorkomt.

Tabel 9: Energetische evaluatie van verschillende energiedragers

Opties	Hout t.o.v. aardgas			Hout t.o.v. stookolie		Hout t.o.v. steenkool		Hout t.o.v. hout	
	R hout (%)	R aardgas (%)	GE (-)	R stookolie (%)	GE (-)	R steenkool (%)	GE (-)	R hout (%)***	GE (-)
1. Productie proceswarmte (100% hout)	$\eta_{qh} \sim 80\%$	$\eta_{qh} = 85\%$	0,94	$\eta_{qh} = 85\%$	0,94	$\eta_{qh} = 80\%$	1	$\eta_{qh} = 80\%$	1
2. Productie van elektriciteit (alleen) (a) 100% hout: $\eta_{eh}: 25 \dots (\text{max. } 30\%)$ (b) co-verbranding in elektriciteitscentrale · na vergassing · direct als brandstof → $\eta_{eh}: 35 \dots 38\%$	$\eta_{eh} \sim 27\%$	$\eta_{eh} = 50\%$	0,54	$\eta_{eh} = 42\%$	0,64	$\eta_{eh} = 38\%$	0,71	$\eta_{eh} = 27\%$	1
	$\eta_{eh} \sim 36\%$	$\eta_{eh} = 50\%$	0,72	$\eta_{eh} = 42\%$	0,86	$\eta_{eh} = 38\%$	0,95	$\eta_{eh} = 36\%$	1
3. WKK (met 100% hout) WKK karakt. : $\alpha_e \sim 15\%$, $\alpha_q \sim 60\%$, $1 \text{ GJ}_{\text{hout}} \rightarrow 0.15 \text{ GJ}_{\text{el}} + 0.60 \text{ GJ}_{\text{th}}$	$\alpha_e \sim 15\%$ $\alpha_q \sim 60\%$	$\eta_{qh} = 85\%$ $\eta_{eh} = 50\%$	1,01	$\eta_{qh} = 85\%$ $\eta_{eh} = 42\%$	1,06	$\eta_{qh} = 80\%$ $\eta_{eh} = 38\%$	1,15	$\eta_{qh} = 80\%$ $\eta_{eh} = 27\%$	1,31

* R = rendement

** GE = Gesubstitueerd Equivalent brandstof

$$\text{GJ}_{\text{brandstof}}/\text{GJ}_{\text{hout}} = \alpha_e/\eta_e + \alpha_q/\eta_q$$

*** Gemiddelde waarden uit de literatuur.

Tabel 10: Gesubstitueerd equivalent brandstof ($GE = \text{Gesubstitueerd Equivalent brandstof}$, $GJ_{\text{brandstof}}/GJ_{\text{hout}} = \alpha_e/\eta_e + \alpha_q/\eta_q$) en RPEB (relatieve primaire energiebesparing) bij een WKK ten opzichte van gescheiden opwekking

Gescheiden opwekking	Aardgas $\eta_e = 50\%$ $\eta_q = 85\%$	Stookolie $\eta_e = 42\%$ $\eta_q = 85\%$	Steenkool $\eta_e = 38\%$ $\eta_q = 80\%$	Hout $\eta_e = 27\%$ $\eta_q = 80\%$
WKK				
Aardgas $\alpha_{e, \text{gas}} \sim 35\%$ $\alpha_{q, \text{gas}} \sim 60\%$	GE = 1.41 RPEB = 29%			
Stookolie $\alpha_{e, \text{stookolie}} \sim 40\%$ $\alpha_{q, \text{stookolie}} \sim 45\%$	GE = 1.33 RPEB = 25%	GE = 1.48 RPEB = 32%		
Steenkool $\alpha_{e, \text{steenkool}} \sim 30\%$ $\alpha_{q, \text{steenkool}} \sim 60\%$	GE = 1.31 RPEB = 24%	GE = 1.42 RPEB = 30%	GE = 1.54 RPEB = 35%	
Hout $\alpha_{e, \text{hout}} \sim 15\%$ $\alpha_{q, \text{hout}} \sim 60\%$	GE = 1.01 RPEB = 1%	GE = 1.06 RPEB = 6%	GE = 1.15 RPEB = 13%	GE = 1.31 RPEB = 24%

Wat dadelijk naar voor komt uit de tabellen is dat de volgorde van meest optimale energetisch benutting onafhankelijk met welke fossiele brandstof hout wordt vergeleken, altijd dezelfde blijft, nl.:

WKK >
 proceswarmte >
 elektriciteit (co-verbranding) >
 elektriciteit (mono-verbranding)

Uit *Tabel 9* kan duidelijk gezien worden dat hout lagere omzettingsefficiënties heeft dan de fossiele brandstoffen. Enerzijds kan hout, als hernieuwbare energiebron, wel op dezelfde manier als fossiele brandstoffen energetisch benut worden, maar deze energetische benutting kan echter (nog) niet met dezelfde rendementen aangezien er rekening moet gehouden worden met de specifieke eigenschappen van hout. Anderzijds vertoont hout als hernieuwbare energiebron ten opzichte van de andere hernieuwbare bronnen zoals wind, zon, waterkracht een aantal voordelen, voornamelijk met betrekking tot de stockeerbaarheid en de afstemming op de energiebehoeften.

Een eerste verschil van hout ten opzichte van steenkool, stookolie en aardgas, is het feit dat hout een lagere calorische waarde heeft (*Tabel 11*). Dit heeft als gevolg dat voor een ketel met een bepaald vermogen, de houtgestookte ketel een grotere doorzet moet aankunnen.

Tabel 11: Calorische waarden van hout en verschillende fossiel brandstoffen

	Aardgas (MJ/Nm ³)		Stookolie (MJ/kg)	Steenkool (MJ/kg)	Hout (20% vocht) (MJ/kg)
	Type L	Type H			
LHV	37.7	33.9	40	32	15
HHV	43.7	39.4	43	33	

Bij het stoken van hout moet er met een hogere luchtvermaat (typisch 1.6 tot 1.8) gewerkt worden. Dit is noodzakelijk om een volledige uitbrand van de brandstof te bekomen die minder homogeen is dan fossiele brandstof. Een derde specifiek kenmerk van houtgestookte ketels is het feit dat bij de condensatie van de rookgassen aan de uitgang moet rekening gehouden worden met mogelijke corrosie indien watercondensatiepunt bereikt wordt. Soms kan ook omwille van de rookgasreiniging de rookgastemperatuur in een ketel niet te laag zinken. Rookgascondensatie wordt in bepaalde omstandigheden toegepast in houtverbrandingsinstallaties, maar heeft nog geen volledige ingang gevonden.

Het verschil in efficiëntie tussen een houtgestookte ketel en een fossiele brandstof gestookte ketel voor opwekking van warmte is niet zo groot (cfr *Tabel 9*) en ook onafhankelijk van de capaciteit van de ketel. Voor de opwekking van warmte wordt voor alle brandstoffen gebruik gemaakt van een warm water of stoomketel. Voor de productie van elektriciteit is er een duidelijker verschil tussen hout en fossiele brandstoffen. Hier komt ook een duidelijker onderscheid tussen de omzettingsefficiënties naar voren van fossiele brandstoffen onderling. Dit onderscheid is het gevolg van een verschil in gebruikte technologie. De huidige standaard techniek om aardgas om te zetten naar elektriciteit is een STEG-centrale (Stoom en Gas – centrale), waar het gas eerst in een gasturbine elektriciteit opwekt en met de hete rookgassen en mits enige bijstook van aardgas wordt bijkomend nog stoom opgewekt die in een

stoomturbine ook nog elektriciteit opwekt. Steenkool wordt ofwel verbrand en de hete rookgassen wekken stoom op voor in een stoomturbine, ofwel wordt steenkool vergast en gaat het stookgas rechtstreeks in een gasturbine. De meest toegepaste techniek op dit moment in een houtcentrale is de verbranding van hout waarbij de hete rookgassen stoom opwekken voor in een stoomturbine. Het grote probleem bij verbranding van hout in een ketel zijn de begrensde stoomparameters. Deze stoomcondities zijn beperkt omwille van het gevaar voor hoge temperatuurscorrosie. Een lagere stoomdruk en stoomtemperatuur heeft op zijn beurt dan ook gevolgen voor de efficiëntie van de turbine. Deze beperking wordt gedeeltelijk omzeild bij het bijstoken van hout in steenkool gestookte centrales. Zolang het aandeel hout dat bijgestookt wordt beperkt blijft is er minder gevaar voor hoge temperatuurscorrosie en kan er gewerkt worden met hogere stoomparameters.

Wegens dit lagere ketelrendement en de begrensde stoomcondities van een houtverbrandingsinstallatie is de gesubstitueerde hoeveelheid fossiele brandstof altijd klein. Bij warmteproductie echter is het verschil tussen hout en fossiele brandstof minimaal (0.94 tot 1), voor elektriciteitsproductie is dat verschil al aanzienlijk groter (0.54 - 0.68 bij mono-verbranding). Dit wil zeggen dat bij opwekking van warmte, een energie-eenheid hout bijna een zelfde energie-eenheid fossiele brandstof vervangt (94% tot 100%), bij elektriciteitsopwekking vervangt een energie-eenheid hout slechts gedeeltelijk (54% tot 68%) een zelfde energie-eenheid fossiele brandstof.

In de tabellen *Tabel 9* en *Tabel 10* is ook te zien dat naargelang hout wordt vergeleken met de verschillende fossiele brandstoffen, de hoeveelheden gesubstitueerde equivalenten fossiele brandstof bijna 1 (indien vergeleken wordt met steenkool), kleiner dan 1 (indien vergeleken wordt met aardgas) zijn. Dit heeft te maken met het verschil in omzettingsefficiënties tussen aardgas en steenkool (andere gebruikte technieken bij elektriciteitsopwekking).

Wanneer uit deze gesubstitueerde equivalenten de primaire energiebesparingen worden berekend als besparing van fossiele brandstof bij gescheiden opwekking, bekomen we volgende PEB's volgens de formule in paragraaf 3.2:

Tabel 12: Primaire energiebesparing bij WKK op hout t.o.v. verschillende brandstoffen

WKK op	t.o.v. gescheiden opwekking met brandstof	PEB
Hout	Aardgas	1 %
Hout	Stookolie	6 %
Hout	Steenkool	13%
Hout	Hout	24 %

De primaire energiebesparing is dus duidelijk afhankelijk van de gekozen referentie-brandstof. Naarmate het omzettingsrendement van de brandstof stijgt, daalt de primaire energiebesparing bij gebruik van hout in een WKK. Bij het vergelijken van deze cijfers moet dan ook omzichtig omgesprongen worden en moet de referentie-brandstof duidelijk aangegeven worden.

In het Besluit van de Vlaamse regering van 7/09/2001 voor WKK-certificaten is als referentie-brandstof aardgas vastgelegd. Dit is de fossiele brandstof met de beste energetische omzettingsefficiënties. Het is dan ook niet evident om met een WKK op hout een kwaliteit van meer dan 5% te halen zoals is vastgelegd voor het bekomen van WKK-certificaten.

3.4 Evaluatie van 5% relatieve primaire energiebesparing bij WKK-systemen met hout

Voor de WKK-systemen (stoomturbine en ORC) met biomassa zijn simulaties gedaan met EES (Engineering Equation Solver, zie bijlage 1). De belangrijkste parameters die een invloed hebben op de omzettingsefficiëntie naar warmte en elektriciteit en zodoende hun invloed hebben op de Primaire Energie Besparing, heeft men laten variëren tussen bepaalde grenzen. Hieruit kan worden opgemaakt wanneer de 5% PEB mogelijk was. Ook werden de meest optimale situatie berekend per WKK-systeem.

Voor bepaalde systemen was het niet mogelijk simulaties te doen aangezien de energetische omzettingsrendementen voornamelijk afhankelijk zijn van merkafhankelijke karakteristieken van de techniek. In deze gevallen werden verschillende praktijkvoorbeelden doorgerekend en geëvalueerd op relatieve PEB.

3.4.1 Stoomturbine

Zoals reeds vermeld in paragraaf 2.4.1.a bestaan er twee soorten stoomturbines. Deze worden afzonderlijk geëvalueerd.

Tegendrukturbine

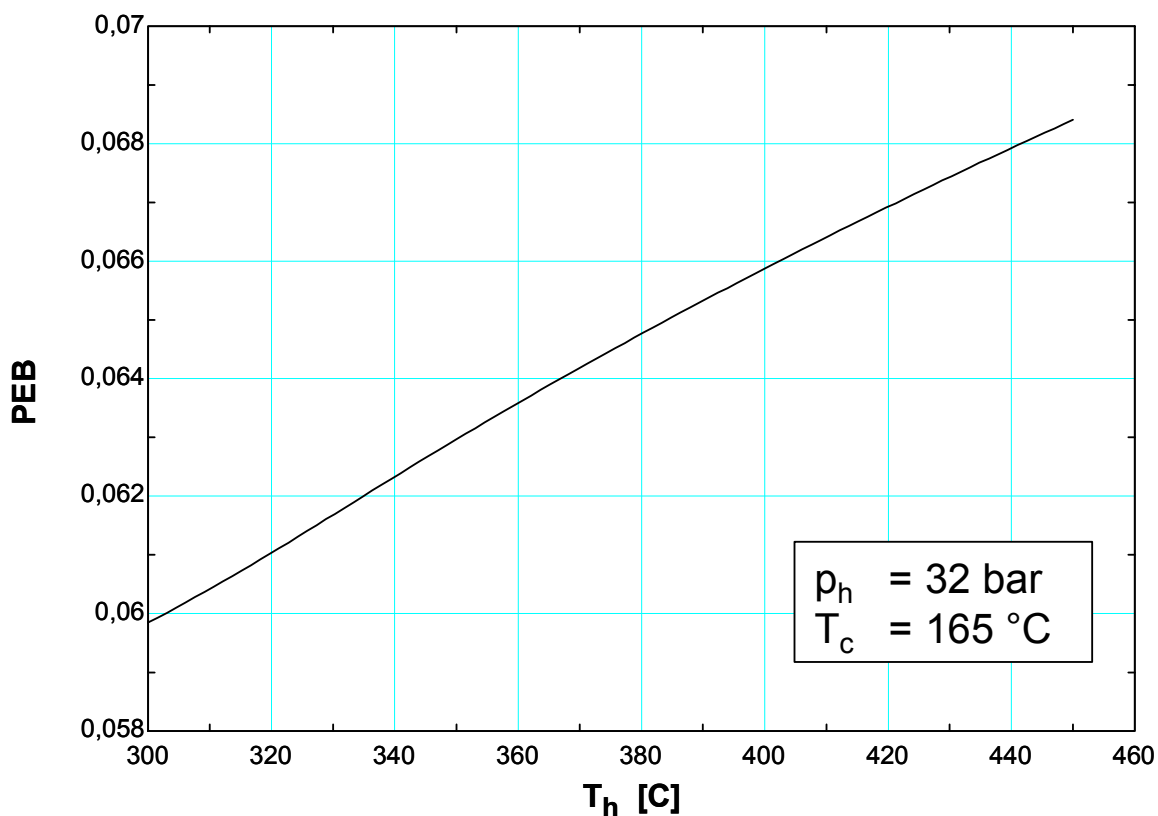
Bij het ontwerp van een WKK-installatie op hout met een tegendruk turbine is men gebonden aan bepaalde fysische grenswaarden. Momenteel wordt een maximum druk van 70 bar en een temperatuur van 450°C in acht genomen bij het dimensioneren van een houtketel dit omwille van het gevaar op hoge temperatuurscorrosie. In deze studie worden deze grenzen gerespecteerd. Indien men nog niet gebonden is aan een bepaalde druk of temperatuur voor de levering van de warmte of stoom kan men hierin variëren tot men de meest optimale situatie verkrijgt.

Volgende parameters werden als vaste waarden gebruikt in de simulatie:

Rendement ketel/oven-installatie	η_k	85%
Rendement ketelvoedingswaterpomp	η_p	85%
Rendement Turbine	η_m	85%
Rendement Generator	η_t	96%

Een eerste parameter die kan variëren is de stoomtemperatuur bij ingang van de turbine. De minimale ingangstemperatuur wordt bepaald door het minimum aan oververhitting dat nodig is om stoom te laten expanderen in een turbine. De maximum temperatuur wordt begrensd door het gevaar op hoge temperatuurscorrosie in de ketel. Bij een stoomdruk van 32 bar en een temperatuur van 165°C (7 bar) na de turbine, kan de stoomtemperatuur variëren tussen de 300°C en 450°C.

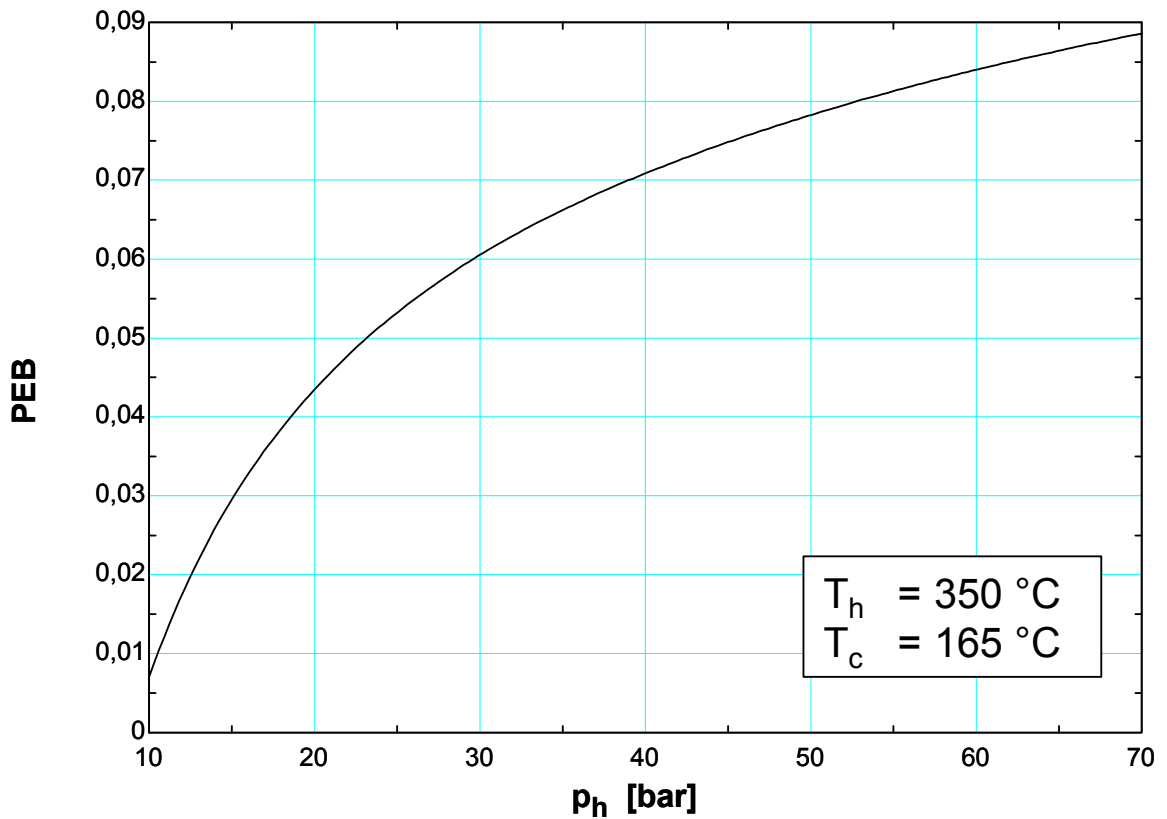
In volgende grafiek wordt de evolutie van de PEB uitgezet in functie van de stijgende ingangstemperatuur.



Grafiek 1: Relatieve PEB in functie van een toenemende ingangstemperatuur

Hieruit blijkt dat bij een stijgende temperatuur de primaire energie besparing lichtjes toeneemt (van 0.06 tot 0.068 bij een stijging van 140°C). In deze omstandigheden is de PEB overall groter dan 5% zoals gevraagd voor WKK-certificaten. In tegenstelling tot *Tabel 12* waar de 5% PEB niet gehaald wordt. Beide situaties mogen echter niet zomaar met elkaar vergeleken worden. In *Tabel 12* wordt uitgegaan van een gemiddelde rendement voor een WKK-installatie op houtafval, in deze berekening wordt uitgegaan van een welbepaalde techniek met welbepaalde vastgelegde parameters (temperatuur en druk).

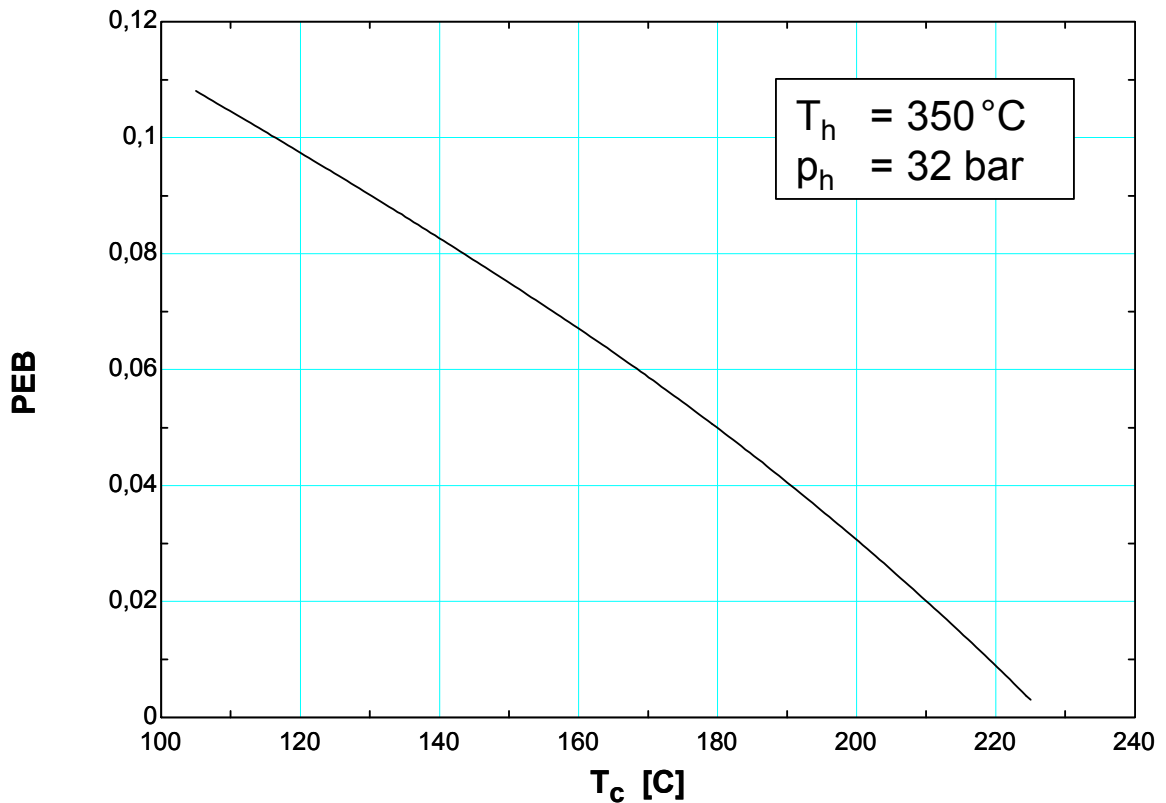
De *stoomdruk* kan variëren tussen de 10 bar (minimum wordt bepaald door een minimum aan drukval die nodig is over turbine en nog hoog genoeg voor de warmtetoepassing) en 70 bar bij een stoomtemperatuur van 350°C en een uitgangstemperatuur van 165°C.



Grafiek 2: Relatieve PEB in functie van toenemende ingangsdruk

Ook hier bij een stijgende druk een stijgende relatieve PEB, tot een druk van 25 bar komt dit zeer sterk naar voor, daarna is deze toename geleidelijker. De 5% PEB wordt slechts bereikt vanaf 23 bar.

De laatste variërende parameter is de temperatuur na de turbine. Deze moet boven de 105°C zijn aangezien anders de stoom reeds condenseert in de turbine (tegedrukturbine is hier niet voor geschikt) en niet hoger dan 225°C bij een ingangstemperatuur van 350° en druk van 32 bar (anders is de druk in de condensor groter dan de ingangsdruk).



Grafiek 3: Relatieve PEB in functie van toenemende condensortemperatuur

Uit de grafiek blijkt dat een stijgende uitgangstemperatuur gepaard gaat met een afnemende PEB, dit is logisch aangezien bij een stijgende uitgangstemperatuur ook de uitgangsdruk stijgt en er minder drukval is over de turbine en dus minder elektriciteitsproductie. De winst aan thermische efficiëntie weegt niet op tegen het verlies aan elektrisch rendement volgens de formule van de berekening van de PEB. Verwarming als warmtetoepassing (120°C) zou in dit geval nog een PEB van 9.7% geven, processtoom van 7 bar (165°C) haalt nog een PEB van 6.2%, bij processtoom hoger dan 10 bar (180°C) zakt de PEB onder de 5%.

Wanneer het meest optimale punt wordt berekend door stoomdruk, -temperatuur en uitgangstemperatuur te laten variëren, wordt een maximalisatie van de stoomparameters bekomen binnen de opgelegde grenzen (70 bar, 450°C) en een minimalisatie van de uitgangstemperatuur (105°C). Een maximalisatie van de stoomparameters is te verklaren omdat door een grotere oververhitting, een groter enthalpieverschil over de turbine kan gerealiseerd worden en als gevolg een hogere elektriciteitsproductie bereikt wordt. Een minimalisatie van de temperatuur na de turbine is ook logisch aangezien een lage temperatuur na de turbine ook bijdraagt tot een groter enthalpieverschil over de turbine.

De hierna berekende waarde van de PEB (13.19%) gaat uit van de veronderstelling dat de resterende warmte-inhoud van de stoom na de tegendrukturbine volledig benut wordt door de warmteafnemer. Deze veronderstelling is meestal te optimistisch, zeker voor lage temperatuurswarmte zoals vereist voor verwarming. Hierdoor zal de effectieve PEB beduidend lager liggen.

In *Tabel 13* worden de verschillende factoren en hun variatie op een rijtje gezet en de gevolgen op de relatieve PEB. Naast de verschillende factoren die hierboven werden nagegaan werd ook het ketelrendement in deze tabel mee opgenomen en werd deze ook gevarieerd.

Tabel 13: Invloed van de verschillende factoren op relatieve PEB

Variabele	Eenheid		Perturbatie	% of perturbatie
Rendement ketel	%	85	5	96.77%
Ingangsdruk	bar	70	5	0.08%
Ingangstemperatuur	°C	450	50	0.40%
Temperatuur na turbine	°C	105	15	2.75%
Totale onzekerheid				100%
Totale invloed op PEB	%	13.19	5.19	

Een relatieve PEB van 13.19% in het meest optimale punt kan nog met 5% stijgen. De huidige grenzen zouden kunnen uitgebreid worden (tot 500°C stoomtemperatuur, 75 bar stoomdruk, enz.). De makkelijker beïnvloedbare parameters blijken echter weinig invloed te hebben op de PEB in vergelijking met het ketelrendement (96.77 %). Dit rendement is een parameter die afhangt van de stand en beperkingen der techniek en de fysische eigenschappen van de brandstof. Een kleine verbetering in het ketelrendement heeft een grote weerslag op de relatieve PEB.

Reeds enkele praktische bezwaren die kunnen rijzen bij het streven naar het energetisch meest optimale punt. Bij het gebruik van deze hoge stoomparameters is het noodzakelijk een waterpijpketel te gebruiken en hoogwaardige materialen wat een zeer grote invloed heeft op het kostenplaatje. De temperatuur en druk van de warmtetoepassing voor gebruik in een bestaand proces is niet vrij te kiezen. Een energetische optimalisatie moet rekening houden met deze randvoorwaarden. Daarnaast mag niet uit het oog verloren worden dat een tegendrukturbine slechts kan draaien (elektriciteitsproductie) op voorwaarde dat de volledige warmte-productie afgenomen wordt. Dit is belangrijk voor het aantal draaiuren en dus het financiële aspect. De uitgangscondities van de stoom moeten bij een tegendrukturbine binnen nauwe grenzen gehouden worden zodat de flexibiliteit bij schommelende warmtevraag zeer beperkt is. Om deze reden worden tegendrukturbines weinig toegepast.

Condenserende turbine met aftap

Een condenserende turbine met aftap kan flexibeler reageren bij veranderende bedrijfsomstandigheden (voornamelijk schommelende warmtevraag). De aftap van de turbine wordt gedimensioneerd zowel naar aftapdruk als naar debiet conform de vereisten van het eraan gekoppelde proces.

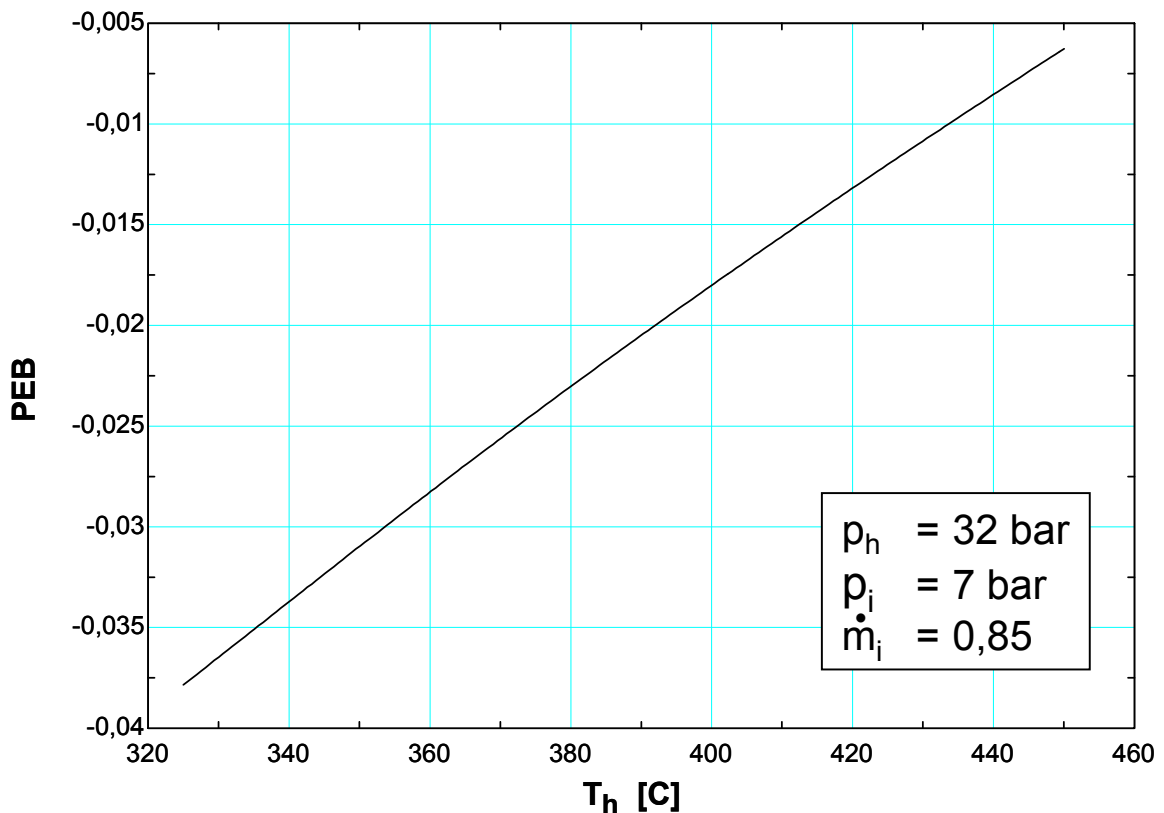
Volgende parameters werden als vaste waarden gebruikt in de simulatie:

Rendement ketel/oven-installatie	η_k	85%
Rendement ketelvoedingswaterpomp	η_p	85%
Rendement Turbine	η_m	85%
Rendement Generator	η_t	96%
Temperatuur na condensor	$^{\circ}\text{C}$	45

De temperatuur na de condensor wordt beschouwd als vaste waarde. Het is niet nodig deze parameter te laten variëren omdat deze temperatuur vanuit energetisch standpunt zo laag mogelijk wordt gekozen en omdat deze waarde niet van belang is bij de warmte/stoomafname.

Wanneer de stoomdruk op 32 bar wordt vastgelegd, de aftapdruk op 7 bar (165°C) en het aftapdebiet op 85 % van het ingangsdebiet, kan de stoomtemperatuur variëren tussen de 325°C (minimum aan oververhitting nodig) en 450°C (maximum voor hoge temperatuurscorrosie).

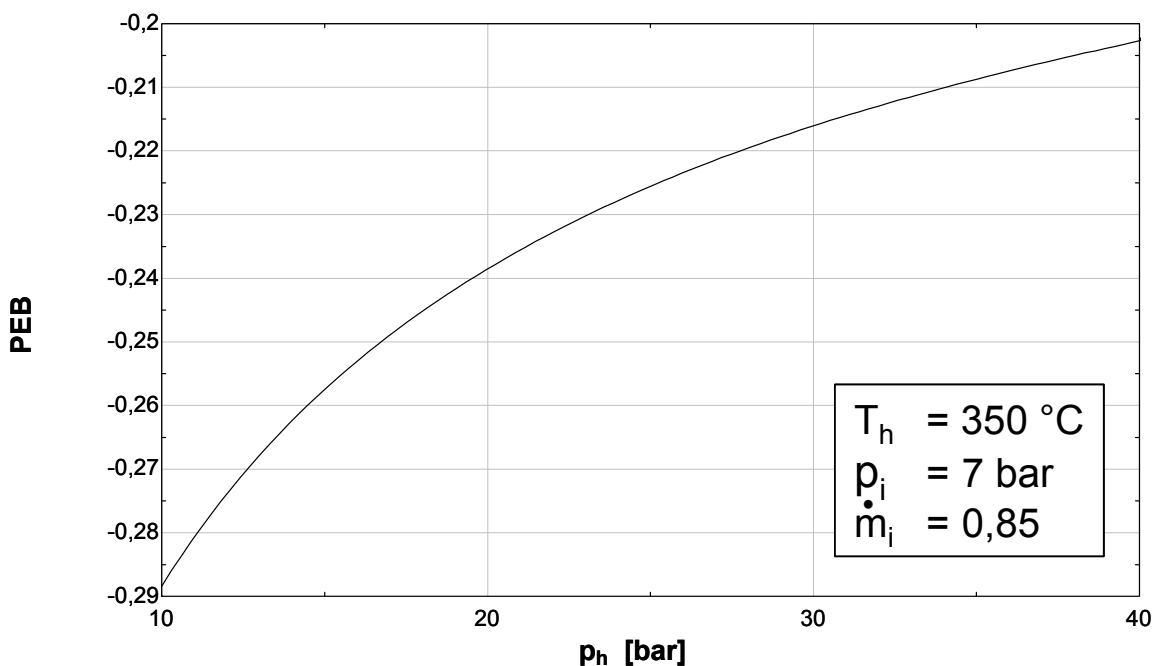
Bij het uitzetten van de relatieve PEB in functie van de stijgende stoomtemperatuur, wordt duidelijk dat de PEB stijgt naarmate de temperatuur toeneemt, maar nergens stijgt de PEB boven de 5%, de PEB is zelfs overal negatief.



Grafiek 4: Relatieve PEB in functie van stijgende ingangstemperatuur

De stoomdruk kan variëren tussen de 10 bar (minimum druk moet boven aftap druk liggen) en 70 bar bij een stoomtemperatuur van 350°C, een aftapdruk van 7 bar en een aftapdebiet van 85 % van het ingangsdebiet.

In *Grafiek 5* valt een stijging van de relatieve PEB op te merken in functie van de stijgende druk tot een stoomdruk van 40 bar. Een stijgende ingangsdruk brengt een toenemende drukval over de turbine te weeg wat gepaard gaat met een hogere elektriciteitsproductie. Vanaf 40 bar gaat dit niet meer op omdat bij deze hogere druk een temperatuur van 350°C niet hoog genoeg is om voldoende oververhitting te krijgen van de stoom en zal men vroegtijdig (bij een temperatuur hoger dan 45°C) condenseren in de turbine wat vermeden dient te worden omdat dit schade berokkent aan de turbine*. De PEB blijft overal negatief.

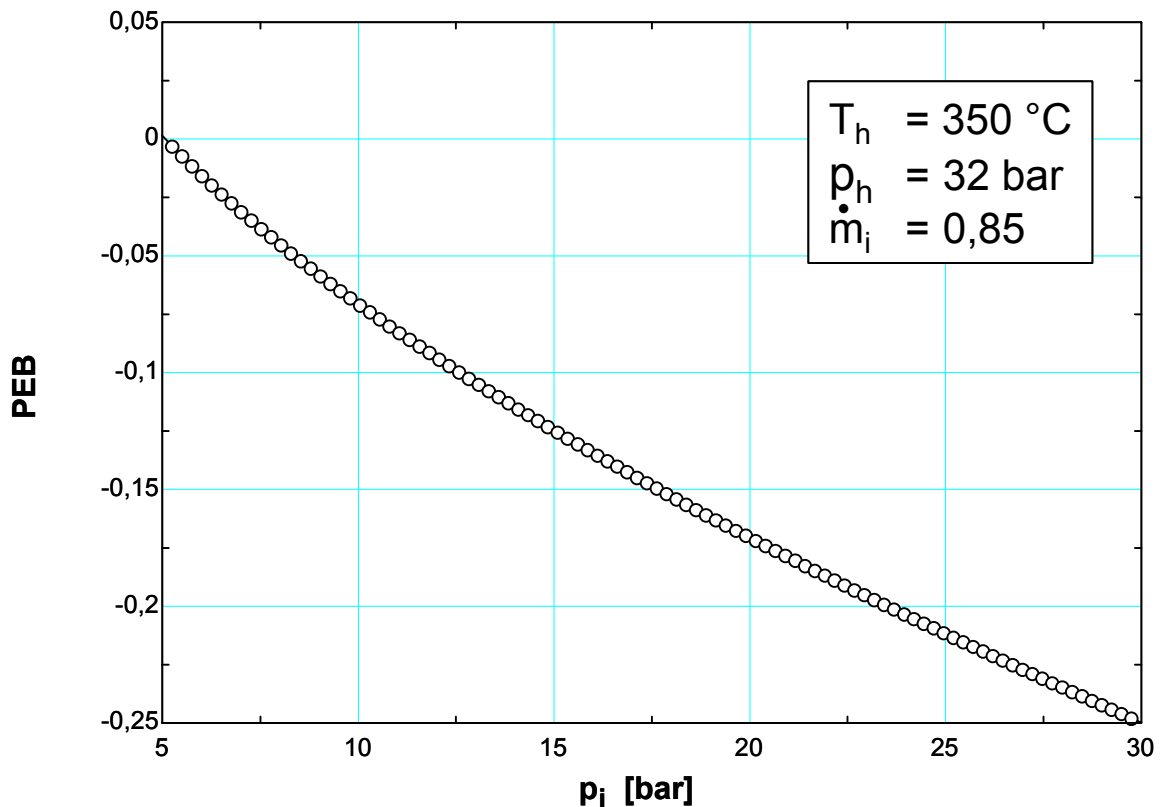


Grafiek 5: Relatieve PEB in functie van stijgende ingangsdruk

De aftapdruk van de turbine kan variëren tussen de 5 bar (minimum bepaald door kwaliteit stoom, indien lager dan reeds gedeeltelijk gecondenseerd) en 30 bar (maximum bepaald door ingangsdruk turbine) bij stoomparameters van 350°C en 32 bar en een aftapdebiet van 85 % van het ingangsdebiet.

Bij een stijgende aftapdruk daalt de PEB, dit is te verklaren door het feit dat bij een hogere aftapdruk er een kleinere drukval is voor het totale debiet en dus minder elektriciteitsproductie, de verhoogde hoeveelheid warmte compenseert hiervoor niet. Nergens haalt de PEB de drempel van 5%.

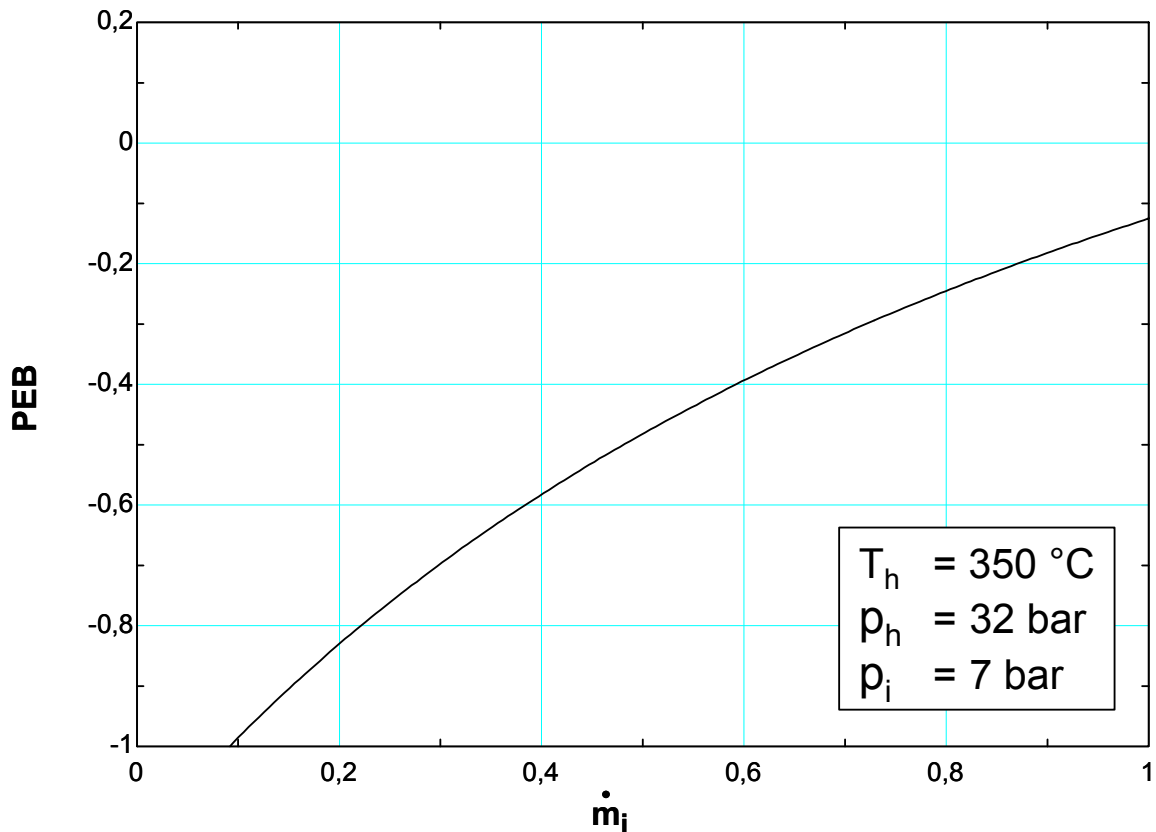
* In praktijk bestaan er echter condenserende turbines die toelaten dat de stoom reeds gedeeltelijk condenseert in de turbine zodat de stoomkwaliteit daalt van 100% tot minimum 85%. In deze berekening wordt hiermee geen rekening gehouden aangezien het van ondergeschikt belang is in deze context.



Grafiek 6: Relatieve PEB in functie van een stijgende aftapdruk

Het aftapdebiet van de turbine kan men laten variëren. Het theoretisch minimumscenario is geen aftap nemen, dan is er geen sprake meer van WKK maar enkel van elektriciteitsproductie. Het theoretisch maximum is het volledige debiet via de aftap laten passeren en kan deze situatie van de condenserende turbine beschouwd worden als een tegendrukturbine. In deze simulatie werden de andere parameters vastgehouden op 350°C stoomtemperatuur, 32 bar stoomdruk en 7 bar aftapdruk.

In *Grafiek 7* is er een stijging waar te nemen bij een groter wordend debiet dat naar de aftap gaat. Nergens stijgt echter de PEB boven de 5%.



Grafiek 7: Relatieve PEB in functie van een toenemend aftapdebiet

Bij het berekenen van het meest optimale punt werden de stoomdruk, -temperatuur, de aftapdruk en het aftapdebiet vrij gelaten. De hoogste PEB-waarde bereikt bij een maximalisatie van de stoomdruk en -temperatuur binnen de opgelegde grenzen (70 bar en 450°C) en een minimalisatie bij een minimum aftapdruk (5 bar) en een maximum in aftapdebiet. Dit is logisch aangezien er op deze manier het totale debiet een zo groot mogelijke drukval over de turbine maakt vooraleer het wordt afgetapt. Het meest optimale punt van een condenserende turbine met aftap is dus een tegendrukturbine. De vereiste aftapcondities worden evenwel bepaald door het eraan gekoppelde proces.

Wanneer de minimumgrens van de aftapdruk wordt aangepast nl. lager tot 1 bar d.w.z. geen nood meer aan kwaliteitsstoom, de aftap kan enkel nog gebruikt worden als laagwaardige warmte, krijgt men een optimaal punt bij 70 bar stoomdruk, 450°C stoomtemperatuur, 1 bar aftapdruk en het volledige debiet over de aftap. De PEB is dan 5.66 %, juist boven de 5% drempelwaarde voor een WKK-certificaat.

Uit de simulatie van een condenserende stoomturbine blijkt dat de 5% primaire energiebesparing halen zeer moeilijk te bereiken is, zeker indien men kwaliteitsstoom nodig heeft in het warmteproces.

Bij het uitvoeren van een onzekerheidsanalyse kan nagegaan worden in hoeverre een variatie van de verschillende parameters, invloed heeft op de PEB.

In *Tabel 14* werden de verschillende factoren die kunnen variëren op een rijtje gezet met hun mogelijke invloed op de relatieve PEB. Naast de verschillende factoren die hierboven werden nagegaan werd ook het ketelrendement in deze tabel mee opgenomen en werd deze ook gevarieerd maar slechts met 5%.

Tabel 14: Invloed van de verschillende factoren op relatieve PEB

Variabele	eenheid		Perturbatie	% perturbatie
Rendement ketel	%	85	5	51.52%
Debiet aftap	kg/s	0.9	0.1	45.49%
Ingangsdruk	bar	70	5	0
Druk aftap	bar	1	0.2	1.39%
Ingangstemperatuur	°C	450	50	3.87%
Totale onzekerheid				100%
Totale invloed op PEB	%	5.66	7.731	

De PEB van 5.66% in het meest optimale punt kan met 7 procentpunten stijgen dit betekent meer dan een verdubbeling van de PEB. De huidige grenzen moeten dan echter wel uitgebreid worden (tot 500°C stoomtemperatuur, 75 bar stoomdruk, enz.). Buiten het ketelrendement blijkt het aftapdebiet de meeste invloed te hebben. Deze parameter wordt bepaald door de warmtetoepassing. De grootste invloed op de PEB is echter het rendement van de ketel (51, 52 %). Dit is echter een parameter die afhangt van de stand en beperkingen der techniek en de fysische eigenschappen van de brandstof. Een kleine verbetering in het ketelrendement heeft een grote weerslag op de PEB.

3.4.2 Stoommotor

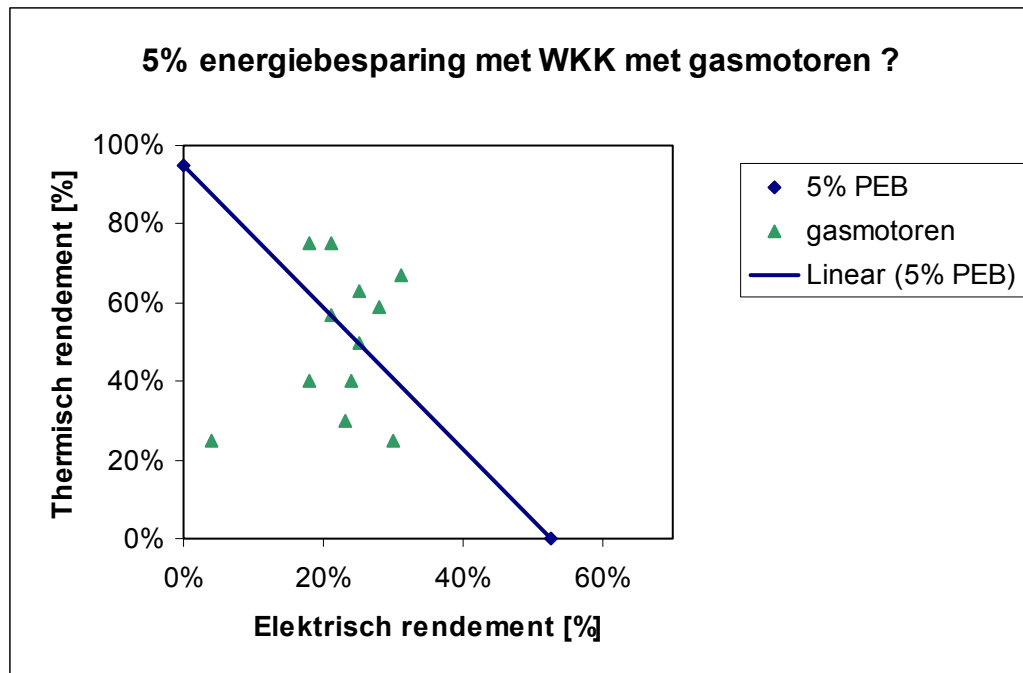
De stoommotor werd niet apart gesimuleerd omdat het werkingsprincipe gelijkaardig is met dat van een tegendrukstoomturbine en dus dezelfde parameters een invloed hebben op de relatieve PEB. De inlaatdruk van deze motor wordt maximaal 60 bar ondersteld, het meest optimale punt ligt op 60 bar, 450°C en 100°C aftaptemperatuur (is 1.4 bar aftapdruk). De relatieve PEB is in dit punt 13.17% met een elektrisch rendement van 19.6% en een thermisch rendement van 65.57% in de veronderstelling dat de lage temperatuurwarmte praktisch integraal kan benut worden, wat een zeer optimistische onderstelling is daar deze alleen geschikt is voor verwarming.

3.4.3 Gasmotor

Een variërende samenstelling van het stookgas en de daarmee gepaard gaande invloed op de compressieverhouding en de type-afhankelijke kenmerken van een gasmotor, maakte het niet mogelijk om een simulatie te doen van een vergassing met daaraan een gasmotor gekoppeld.

Om een idee te krijgen van de primaire energie besparing die met een vergassing en gasmotor mogelijk is, werden zoveel mogelijk praktijkvoorbeelden doorgerekend (zie bijlage 2). Dit aantal is echter beperkt omdat vergassing nog geen wijd verspreide techniek is en omdat bij de bestaande vergassingsinstallaties niet altijd wordt gekozen voor WKK met gasmotor als energie benutting (andere energiebenuttingen zijn enkel warmte, enkel elektriciteit, energiebenutting via stoomcyclus, gasturbine).

Uit de berekening van de PEB in de voorbeelden komt naar voor dat bij 5 installaties de PEB besparing onder de 5% ligt en bij 7 installaties juist 5% of boven 5% (Figuur 27). Wanneer het gemiddelde wordt berekend van enkel de installaties boven de 5% krijgt men een PEB van 15%, wat vrij behoorlijk is. In de gevallen waar de PEB onder de 5% ligt valt op dat de elektrische efficiëntie behoorlijk is maar dat de warmtebenutting vrij laag is. Aangezien er niet meer gegevens beschikbaar zijn, kan niet worden ingeschat wat hier de echte oorzaak van is. De meest voor de hand liggende verklaring is waarschijnlijk dat het hierbij gaat om verwarming waarbij de warmtebehoefte in de zomermaanden terugvalt op een fractie van deze in de winter.



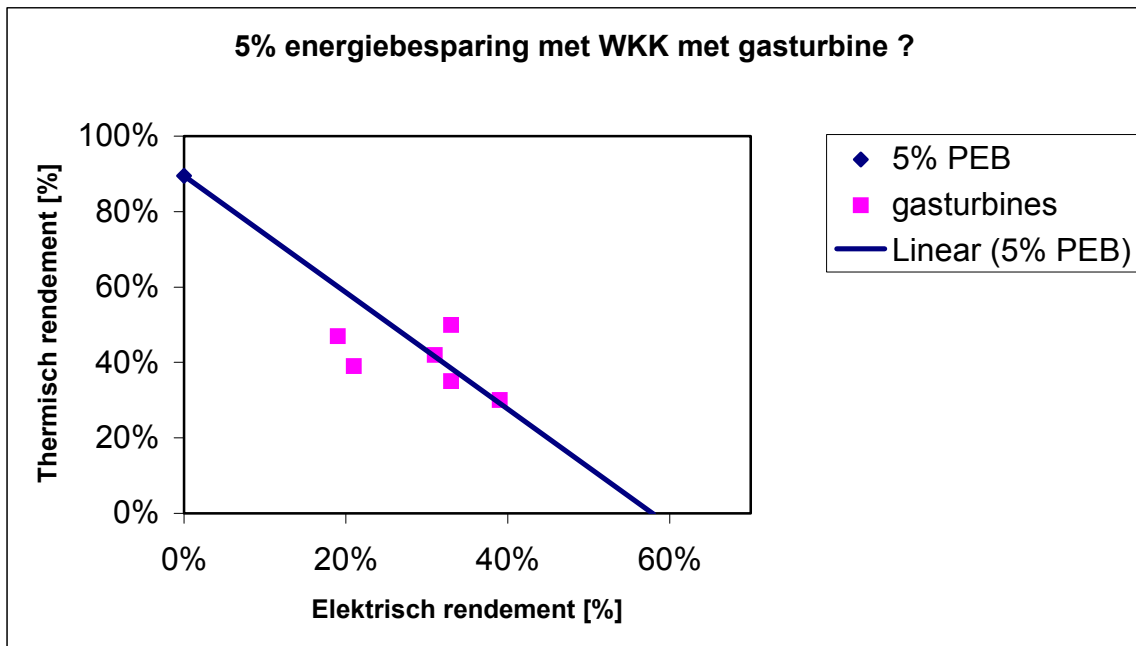
Figuur 27: Evaluatie mogelijkheid 5% relatieve PEB bij gasmotoren

Bij de berekening van de input aan thermische energie bij dual fuel motoren die diesel gebruiken om het gasmengsel te laten ontbranden, moet er rekening gehouden met de input aan biomassa en diesel. In de twee voorbeelden met dual fuel motoren die er gebruikt zijn, is er gerekend met de thermische input maar uit de beperkte gegevens die beschikbaar waren, was het niet duidelijk of de dieselbrandstof erbij geteld was. Indien dit niet het geval was dan zullen deze resultaten in werkelijkheid lager liggen.

3.4.4 Gasturbine

Ook bij een gasturbine was het niet mogelijk een simulatie te doen en werd er met voorbeelden gewerkt (zie bijlage 2). Het aantal gegevens die hier voor handen is, is echter nog veel kleiner aangezien bij het gebruik van een gasturbine de productie van elektriciteit absoluut primeert zijn er weinig installaties met WKK. Veel kan er dan ook niet uit deze voorbeelden geconcludeerd worden. Bij de zes voorbeelden die werden bekeken, hebben er drie installaties een PEB groter of gelijk aan 5%. Ook hier valt op te merken dat de andere drie installaties onder deze 5% vallen omdat de warmtebenutting zeer minimaal is. Bij gasturbines kan een hogere temperatuur warmte/stoom bekomen worden in vergelijking met

een gas motor zodat een betere warmtebenutting mogelijk is. De reden van de lage warmtebenutting in deze voorbeelden kan niet nagaan door het gebrek aan gegevens.



Figuur 28: Evaluatie mogelijkheid 5% relatieve PEB bij gasturbines

3.4.5 ORC

Bij het ontwerp van een houtverbrandingsinstallatie met een thermische olietel gekoppeld aan een ORC is de belangrijkste parameter die moet gekozen worden in functie van de energetische situatie, het organisch fluïdum. Het organisch fluïdum wordt gekozen op basis van haar specifieke verdampingstemperatuur en druk. Eenmaal het arbeidsmedium gekozen is kan er nog gespeeld worden met de ingangsdruk, ingangstemperatuur en de temperatuur na de condensor om de energetisch cyclus te optimaliseren.

Er werd een simulatie uitgevoerd voor een ORC-cyclus op isopentaan om de invloed van ingangsdruk, ingangstemperatuur en temperatuur na de condensor na te gaan.

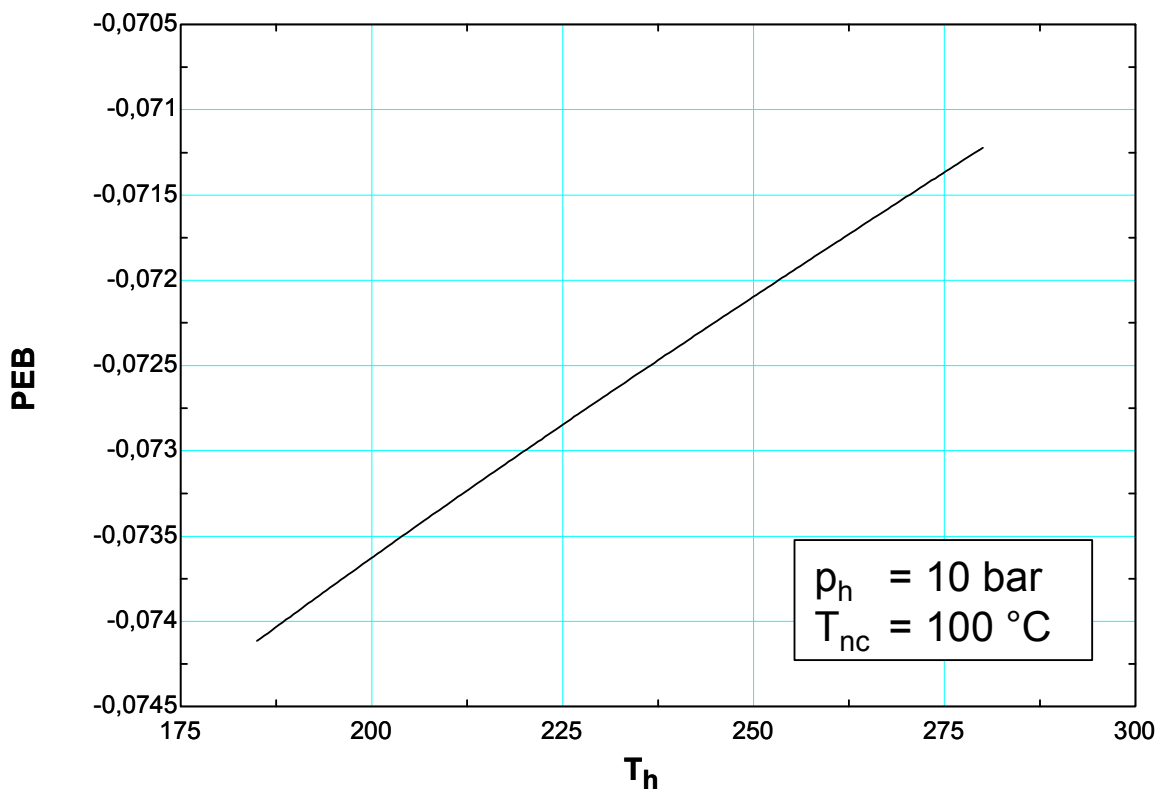
Volgende parameters werden als vaste waarden gebruikt in de simulatie:

Rendement ketel/oven-installatie	η_k	85%
Rendement thermische olie cyclus	η_{to}	83%
Rendement pomp	η_p	85%
Rendement turbine	η_m	80%
Rendement generator	η_t	96%
Rendement recuperator	η_r	80%

Een eerste parameter die kan variëren is de *temperatuur* van het organisch fluïdum bij ingang van de turbine. De minimale ingangstemperatuur wordt bepaald door het minimum aan oververhitting dat nodig is om stoom te laten expanderen in een turbine. De maximum

temperatuur wordt begrensd door de temperatuur van de thermische olie. Er werd gekozen voor een druk van 10 bar geschikt voor dit organisch fluïdum. De temperatuur na de condensor werd op 100°C vastgelegd, een hogere temperatuur is hier niet mogelijk omdat anders de druk groter wordt dan 10 bar en er geen drukval meer mogelijk is over de turbine. Deze 100°C heeft als consequentie dat als warmtetoepassing geen processtoom kan gebruikt worden, enkel verwarming op een aangepaste lage temperatuur. De ingangstemperatuur van de turbine kan variëren tussen de 168°C en 280°C.

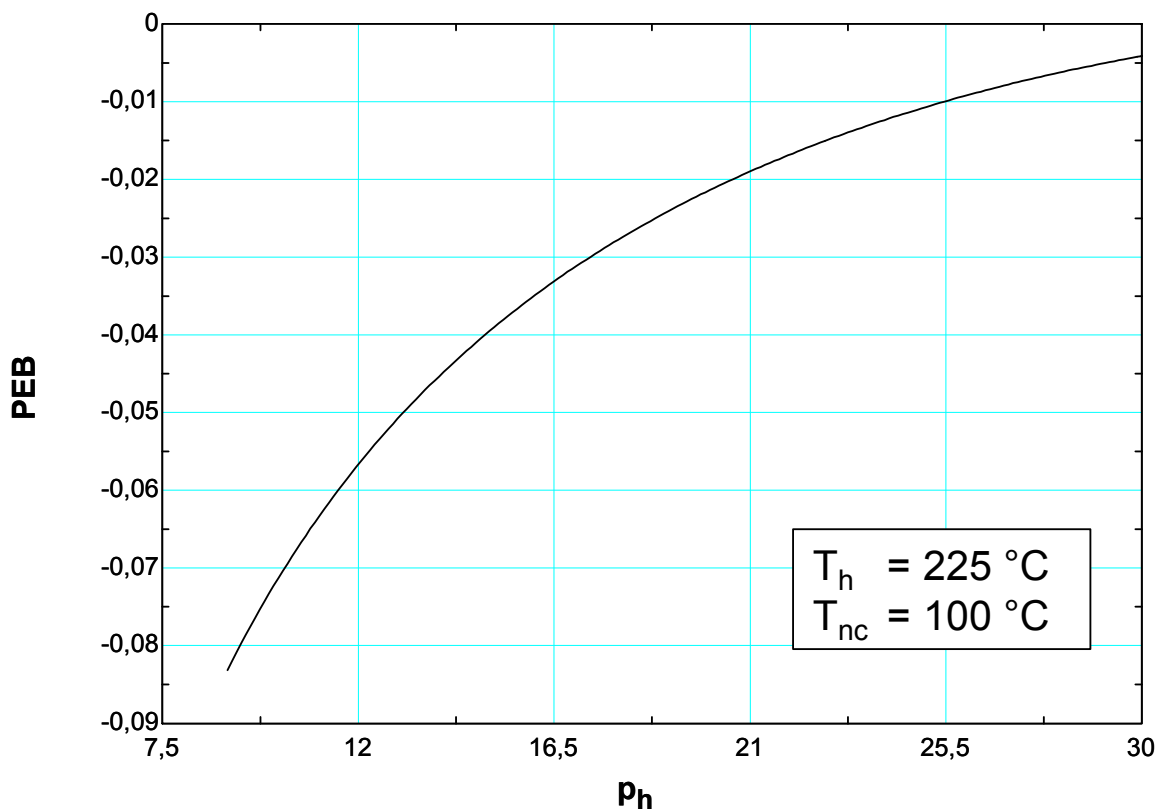
In volgende grafiek wordt de evolutie van de PEB uitgezet in functie van de stijgende ingangstemperatuur.



Grafiek 8: Relatieve PEB in functie van stijgende ingangstemperatuur

Hieruit blijkt duidelijk dat bij een stijgende temperatuur de primaire energie besparing toeneemt. In deze omstandigheden is de PEB nergens hoger dan 5% zoals noodzakelijk voor het bekomen van WKK-certificaten.

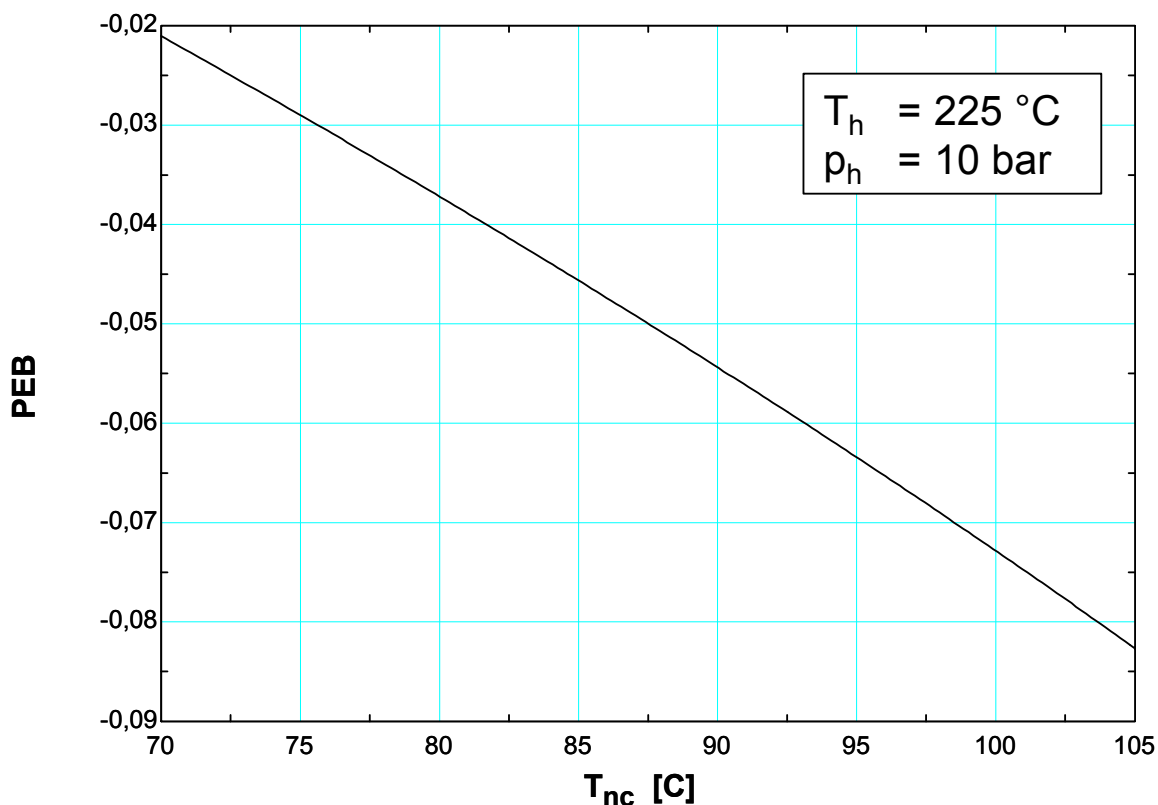
De *ingangsdruk* kan variëren tussen de 9 bar (lager kan niet want anders zit verdampingsdruk onder condensordruk) en 30 bar (het maximum wordt begrensd door het coëxistentiegebied van iso-pentaaan) bij een temperatuur van 225°C en een temperatuur na de condensor van 100°C.



Grafiek 9: Relatieve PEB in functie van stijgende ingangsdruk

Bij een stijgende druk, neemt de relatieve PEB toe, deze stijging verloopt in het begin sterk en zwakt af naarmate de drukken hoger worden. De 5% PEB wordt nergens bereikt met deze randvoorwaarden.

De laatste variërende parameter is de temperatuur na de condensor. Deze moet boven de 70°C zijn aangezien anders deze laagwaardige warmte niet meer nuttig kan gebruikt worden en niet hoger dan 105°C bij een ingangstemperatuur van 225° en druk van 10 bar (anders is de druk in de condensor groter dan de ingangsdruk).



Grafiek 10: Relatieve PEB in functie van stijgende temperatuur na condensor

De relatieve PEB daalt bij een stijgende temperatuur na de condensor. Dit is normaal want het elektrisch vermogen dat kan opgewekt worden is groter naarmate de condensatietemperatuur lager is en de hoeveelheid benutte warmte daalt omdat het verschil met de recuperator dan kleiner wordt en er minder warmte kan uitgewisseld worden. Ook hier is de PEB nergens groter dan 5%.

Wanneer het *meest optimale punt* wordt berekend door ingangsdruk, -temperatuur en temperatuur na condensor te laten variëren, worden volgende ingangsparementen bekomen 280°C en 30 bar en een minimalisatie van de temperatuur na de condensor waar volledige benutting van de warmte mogelijk is (70°C). Een minimalisatie van de temperatuur na de condensor is ook logisch aangezien een lage temperatuur na de turbine ook bijdraagt tot een groter enthalpieverschil over de turbine. Met deze parameters wordt een relatieve PEB bereikt van 4.25%, wat onder de 5% ligt voor WKK-certificaten.

In *Tabel 15* worden de verschillende factoren en hun variatie op een rijtje gezet en de gevolgen op de relatieve PEB. Naast de verschillende factoren die hierboven werden nagegaan werd ook het ketelrendement in deze tabel mee opgenomen en werd deze ook gevarieerd.

Tabel 15: Invloed van de verschillende factoren op relatieve PEB

Variabele	eenheid		Perturbatie	% perturbatie
Ingangsdruk	bar	30	5	4.18%
Ingangstemperatuur	°C	280	50	24.53%
Temperatuur na condensor	°C	70	20	65.57%
Efficiëntie turbine	%	80	5	5.71%
Totale onzekerheid				100%
Totale invloed op PEB	%	4.25	2.58	

Een relatieve PEB van 4.25% in het meest optimale punt kan met 2.58% stijgen zodat de 5% relatieve PEB kan bereikt worden. Van de onderzochte parameters heeft voornamelijk de temperatuur na de condensor een bepalend invloed. Deze temperatuur wordt echter gekozen in functie van de warmtetoepassing en in praktijk zal bij daling van de temperatuur onder de 70°C nog weinig nuttige toepassingen voor handen zijn.

3.4.6 Stirling-motor

Ook van deze technologie is het moeilijk om een simulatie te doen aangezien er heel wat factoren spelen bij het toepassen van deze technologie: temperatuursverschil dat gebruikt wordt, welke warmte wordt gebruikt voor de warmte-toepassing (resterende warmte in rookgassen of warmte van het koelwater), De PEB hangt in grote mate af van de warmte benutting.

Een enkel voorbeeld op biomassa werd gevonden en doorgerekend en hier werd een relatieve PEB bekomen van 15%, waarbij een hoge benuttingsgraad van de warmte werd verondersteld (wat onrealistisch is indien het gaat om ruimteverwarming).

3.4.7 Gasturbine voor vaste brandstoffen

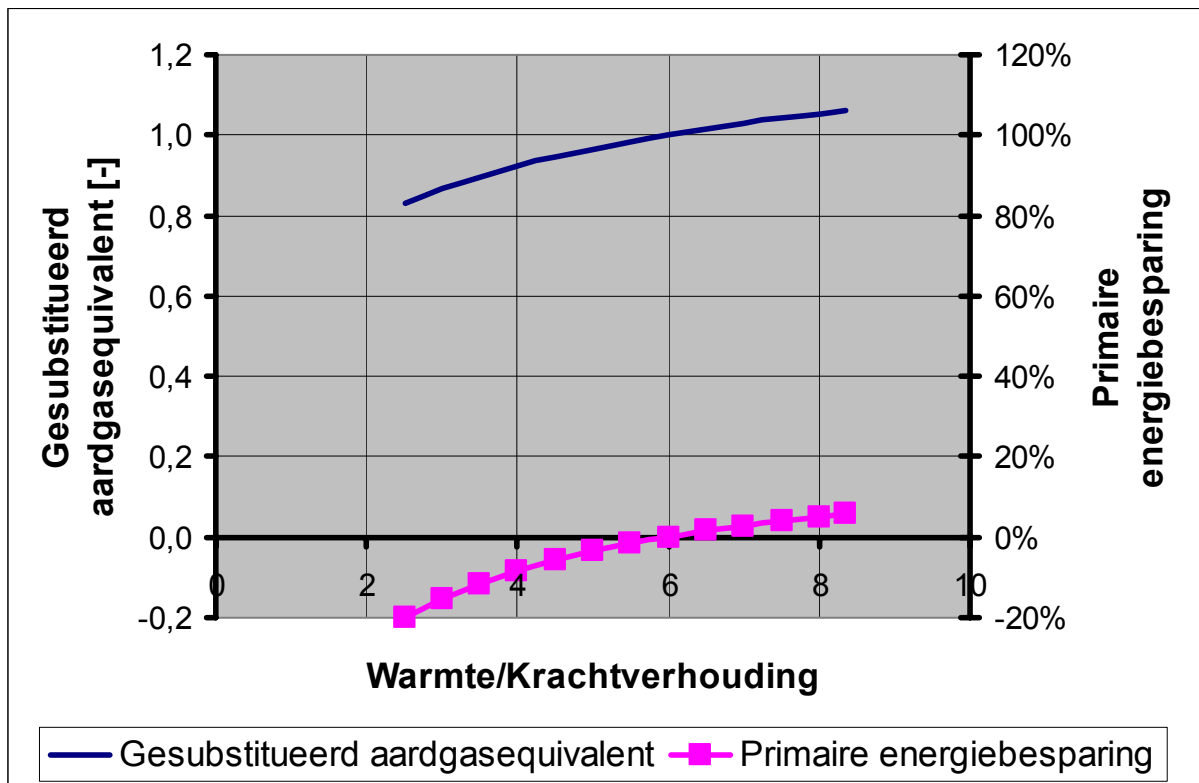
Deze technologie is nog in een prille ontwikkelingsfase, echte projecten zijn hier nog niet uitgetest. Hier is dan ook geen relatieve PEB berekening van mogelijk.

3.5 Besluit

Uit het voorgaande kan besloten worden dat de productie van elektriciteit alleen op basis van 100% hout vanuit energetisch oogpunt ongunstig is (omwille van de vereiste gematigde stoomcondities omwille van gevaar voor slakvorming en corrosie). Bij biomassacentrales op basis van 100% hout cfr. de EPON centrale bij Cuyck, wordt uitgegaan van 25 tot max. 30% elektrisch rendement bij uitsluitend elektriciteitsproductie (bij deze centrale is ook werking als WKK mogelijk, maar nog niet toegepast). De gesubstitueerde hoeveelheid aardgas bij houtcentrales ligt laag en bedraagt slechts 0,5 tot 0,6 GJ per GJ houtbrandstof.

Bij directe of indirecte co-verbranding van hout in een steenkoolcentrale is het elektrisch rendement ruim hoger (ca. 35%) ten opzichte van mono-verbranding van houtafval. Mono-verbranding van houtafval voor warmteproductie scoort beter t.o.v. co-verbranding in steenkoolcentrales op basis van de aangenomen rendementen. Wanneer rekening gehouden wordt met de stabiele continue benutting van het houtafval bij co-verbranding in steenkoolcentrales ten opzichte van de meer variabele benutting voor gebruik van warmte, dan kunnen beide als praktisch gelijkwaardig ingeschat worden.

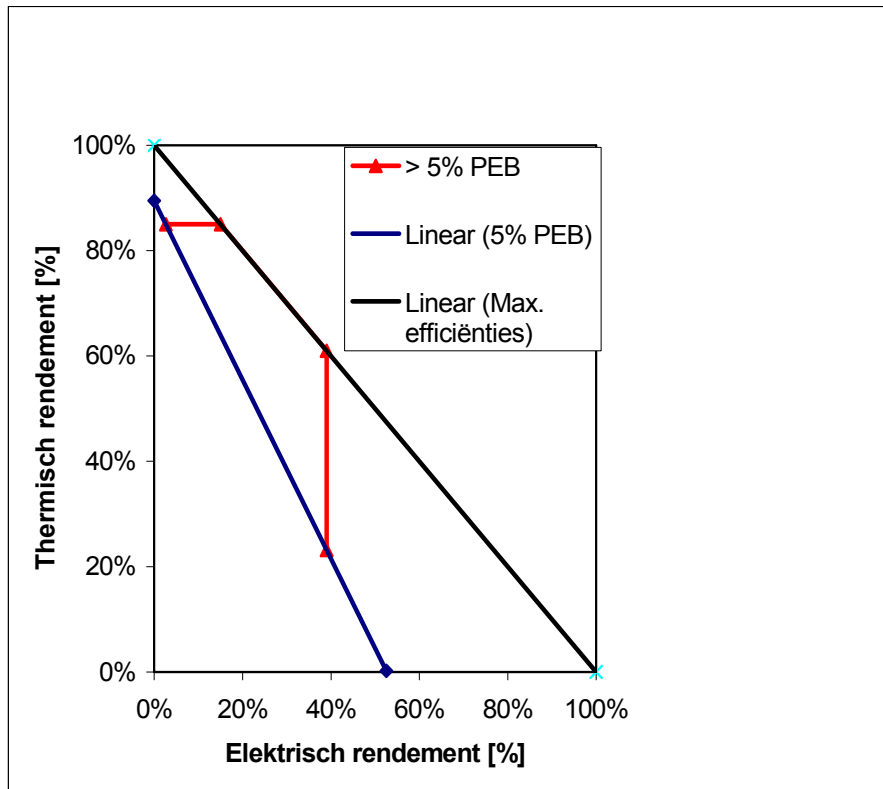
Toepassing van WKK op basis van houtafval scoort energetisch het hoogst. Toch moet hierbij opgemerkt worden dat de gesubstitueerde hoeveelheid aardgas per eenheid brandstofenergie van ongeveer 1,0 laag is ten opzichte van WKK op basis van aardgas waarmee 1,3 kan gerealiseerd worden. De reden hiervoor werd hoger aangegeven en berust voornamelijk bij de beperkte stoomcondities en het resulterend laag elektrisch rendement. Wanneer de warmte/krachtfractie daalt, dan zal de primaire energiebesparing eveneens dalen en zelfs negatief worden (zie *Figuur 29*).



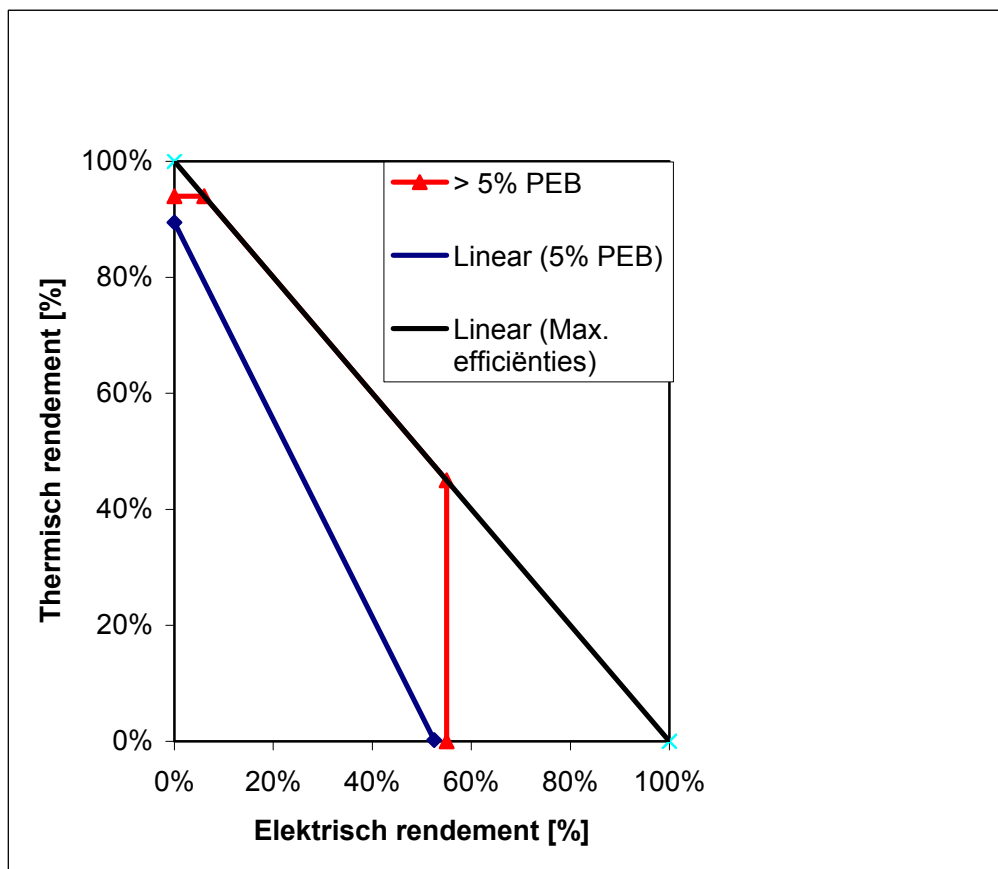
Figuur 29: Verloop van het gesubstitueerd aardgasequivalent en de primaire energiebesparing bij stoomcondities 463°C en 43 bara stoomaftap op 7 bara.

Het decreet voor kwalitatieve WKK is opgesteld uitgaande van een WKK op aardgas. Uit bovenstaande berekeningen kan duidelijk afgeleid worden dat een aanzienlijke relatieve primaire energiebesparing realiseren conform het WKK-decreet niet eenvoudig is met houtafval. Enkel een tegendrukturbine en een gasturbine kunnen tot een primaire energiebesparing komen van 5% met proceswarmte vb. met stoom of oververhit water. Voor ruimteverwarming kan theoretisch gemakkelijker 5% PEB gerealiseerd worden, maar ook hier is de marge klein binnen gegeven randvoorwaarden. In praktijk stelt zich bij verwarming het probleem van de schommelende (vnl. seizoensgebonden) warmtevraag met als gevolg een beperkte benutting van laagtemperatuur warmte.

Indien deze PEB-cijfers vergeleken worden met een standaard WKK-installatie op fossiele brandstof (cfr. Tabel 10), wordt een vrij grote discrepantie tussen beide duidelijk (PEB van fossiele WKK's: 20%-40%; PEB van hout WKK's: 0-17%). Dit verschil is te wijten aan de (nog) beperkte efficiënties zowel thermisch als elektrisch, die haalbaar zijn met een installatie op houtafval. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 30 en Figuur 31.



Figuur 30: Evaluatie mogelijkheid 5% relatieve PEB bij installaties op hout



Figuur 31: Evaluatie mogelijkheid 5% relatieve PEB bij installaties op fossiele brandstof

In *Figuur 30* en *Figuur 31* is op de horizontale as het elektrisch rendement weergegeven en op de verticale as het thermisch rendement. Het rood afgebakende gebied is het gebied waar 5% relatieve PEB mogelijk is. Dit gebied wordt afgeschermd door een onderste schuine lijn van 5% energiebesparing, d.w.z. dat elk WKK-systeem met een elektrisch en thermisch rendement dat rechts van deze lijn ligt minimum 5% energie-besparend is. De bovenste schuine lijn is de afbakening van de rendementsgrenzen (het totale rendement kan nooit meer dan 100% zijn). De horizontale lijn wordt bepaald door het maximale thermische rendement dat mogelijk is voor houtafval in *Figuur 30* (85%) en voor aardgas in *Figuur 31* (94%) bij gescheiden opwekking, de verticale lijn wordt bepaald door het maximale elektrische rendement voor houtafval *Figuur 30* (39%) en voor aardgas in *Figuur 31* (55%). Wanneer we deze gebieden bekijken, blijkt dat dit gebied voor energieopwekking uit houtafval veel beperkter is.

De oorzaken van de (voorlopig) lage rendementen zijn afhankelijk van de gebruikte techniek. De meest gebruikte methode voor WKK met hout is een klassieke verbrandingsketel met stoomproductie, gevolgd door een stoomturbine of stoommotor. Hierbij spelen het lagere ketelrendement en de beperkte stoomcondities een rol. Een stoommotor is enkel bruikbaar in de kleinere ranges (tot 2 MWel) en inherent hierbij zijn ook lagere efficiënties. Dit bemoeilijkt het nog eens om de kaap van 5% PEB te halen.

Andere meer innovatievere technieken voor een WKK op hout zijn een gasmotor, een gasturbine, ORC en een Stirling motor. Deze technieken beogen voornamelijk elektriciteitsproductie (direct of indirect) zonder omweg over stoom, maar hierbij stellen zich andere problemen. Een gasmotor heeft een vrij goed elektrisch rendement maar de laagwaardige warmte die vrijkomt bij een gasmotor is slechts beperkt bruikbaar wat een negatief effect heeft op het thermisch rendement. Bij een gasturbine zijn er betere mogelijkheden voor WKK. De productie van geschikt stookgas zowel voor de gasmotor als de gasturbine is evenwel nog problematisch: bij vastbed vergassers is een uitgebreide stookgasreiniging vereist omwille van het hoog gehalte teerachtigen, bij wervelbed vergassing stelt zich het probleem van stookgasreiniging minder maar de economische kost is hoger zodat dit alleen voor hogere vermogens in aanmerking komt.

Een ORC-cyclus bevat een secundaire kringloop met een geschikt organisch medium (lage verdampings-temperatuur en –druk) waardoor elektriciteit kan geproduceerd worden uit relatief lage temperatuurswarmte. De bijkomende kringloop heeft een negatieve invloed op de PEB. Bijkomende beperking is dat een ORC slechts voor kleine vermogens haalbaar is.

Een Stirling-motor biedt voordelen naar direct gebruik van energie maar de combinatie van houtafval en Stirling-motoren is nog volop in ontwikkeling, ook hierbij speelt het feit dat Stirling motoren maar voor kleine vermogens gebruikt kunnen worden. De gasturbines voor vaste brandstof hebben op lange termijn waarschijnlijk belangrijke voordelen maar deze zijn nog volop in ontwikkeling en het zal nog even duren vooraleer deze technologie marktrijp is.

Naast de beperkte ervaring en het klein aantal draaiuren dat men met deze innovatieve technieken heeft, is er een bijkomend probleem dat zich op korte termijn stelt nl. dat de huidige demo- en pilootprojecten bijna uitsluitend zijn uitgetest op onbehandelde, niet-verontreinigde houtstromen. Voor de onbehandelde houtstromen zal er binnenkort een keuze zijn tussen verschillende technieken, voor behandelde stromen blijft dit beperkt tot ofwel verbranding in een warm water/stoom ketel met stoommotor of –turbine ofwel verbranding in een thermische olieketel met ORC (hier vormen verontreinigde stromen geen probleem).

De voorbeelden en berekeningen tonen aan dat het elektrisch rendement van een WKK-installatie op hout vrij laag is. Zeker wanneer de warmtetoepassing veel hoogwaardige warmte vraagt (hoge temperatuur en druk) blijft er minder over voor elektriciteitsproductie. Wanneer laagwaardige warmte grotendeels kan benut worden in een WKK-installatie is het totaalrendement groter dan bij een WKK-installatie met stoom. Uit economische en praktische overwegingen is processtoom echter de meest eenvoudige en nuttige oplossing mits de warmteafname over een voldoende lange periode gegarandeerd is. Dit is meestal niet het geval voor verwarming.

Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van een verhoogde elektrische efficiëntie (verhoogde stoomcondities, gasturbine, gasturbine voor vaste brandstof), kleinschalige stroomproductie (ORC, Stirling) en nieuwe evoluties op het gebied van warmtetoepassingen (tri-generatie, koude-warmte opslag) zullen een WKK-installatie op houtafval vooruit helpen. Niettegenstaande de 5% relatieve PEB (conform het huidige WKK-decreet) moeilijk haalbaar is bij energetische valorisatie van hout, blijft een WKK-toepassing de meest optimale energetische benutting van het hout en draagt dit het meest bij tot reductie van de CO₂-uitstoot. Toepassing van WKK moet dan ook verder gestimuleerd worden bij energetische valorisatie van houtafval, voornamelijk bij de houtindustrie met behoefte aan proceswarmte (spaanplaatindustrie).

4 ECONOMISCHE ASPECTEN

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt getracht een overzicht te geven van de economische situatie van de verschillende omzettingstechnieken van hout in warmte- en/of elektriciteitsproductie. De gegevens zijn verzameld uit de literatuur en van fabrikanten. Bij de interpretatie moet dus rekening gehouden worden met regionale verschillen, verschil in bouwjaar (zeker belangrijk voor snel ontwikkelende nieuwe technieken) en andere randvoorwaarden.

Om de verschillende technologieën en installaties te kunnen vergelijken werd gebruik gemaakt van ‘dimensieloze kosten’ (ref. 2).

4.2 Dimensieloze kosten

De kostprijs van een installatie is samengesteld uit loon-, grondeigendoms-, bouw-, kapitaal- en brandstofkosten. Deze factoren maken elk op zich een wezenlijk deel uit van de totale productiekost. Eenvoudig gesteld, kan gezegd worden dat de totaalkosten voor productie van warmte en/of elektriciteit bestaan uit investeringskosten, werkingskosten en brandstofkosten:

$$\begin{aligned}
 \text{Totaalkosten} = & \quad \text{Kapitaalkosten} & \quad & \quad + \\
 & & & & \text{Brandstofkosten} & \quad + \\
 & & & & & & \text{Werkingskosten.} \\
 \\
 \text{Opbrengst voor stroom} + \text{Opbrengst voor warmte} = & \quad \text{Totaalkosten} + \text{Winst}
 \end{aligned}$$

De totale kosten moeten gedekt kunnen worden met de opbrengst van de warmte en stroomproductie.

Om een beoordeling mogelijk te maken van de verschillende beïnvloedende parameters, werd gekozen voor een model dat de kosten van warmte- en stroomproductie stelt ten opzichte van de opbrengsten van warmte en elektriciteit. In de volgende vergelijking zijn de kosten en opbrengsten voor de energieomzetting van een eenheid hout uitgebalanceerd:

$$\eta_{el} * O_{el} + \eta_{th} * O_{th} = \frac{\eta_{el} + \eta_{th}}{\eta_{tot}} * K_{br} + \eta_{el} * K_{kap.el} + \eta_{th} * K_{kap.th} + \eta_{el} * K_{werk.el} + \eta_{th} * K_{werk.th} + \eta_{el} * W_{el} + \eta_{th} * W_{th} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

met

Rendement elektriciteitsproductie:	η_{el}	[%]
Rendement warmteproductie:	η_{th}	[%]
Totaal energetisch rendement van de installatie ($\eta_{el} + \eta_{th}$):	η_{tot}	[%]

Opbrengst elektriciteit:	O_{el}	[€/kWh _{el}]
Opbrengst warmte:	O_{th}	[€/kWh _{th}]
Kost brandstof:	K_{br}	[€/kWh _{br}]
Kapitaalkost voor elektriciteitsproductie:	$K_{kap,el}$	[€/kWh _{el}]
Kapitaalkost voor warmteproductie:	$K_{kap,th}$	[€/kWh _{th}]
Werkingskost voor elektriciteitsproductie:	$K_{werk,el}$	[€/kWh _{el}]
Werkingskost voor warmteproductie:	$K_{werk,th}$	[€/kWh _{th}]
Winst bij elektriciteitsproductie:	W_{el}	[€/kWh _{el}]
Winst bij warmteproductie:	W_{th}	[€/kWh _{th}]

Opmerking: In wat volgt zal de kapitaalkost en werkingskost samen als productiekost omschreven worden.

Opsplitsing van de brandstofkosten volgens energieaandeel

Vergelijking 2 omvat zowel de warmte- als stroomproductie. Om de economische haalbaarheid van warmte- en stroomproductie afzonderlijk te kunnen beoordelen, moeten de kosten en opbrengsten van de warmte- en stroomproductie opgesplitst worden. De brandstofkosten worden proportioneel opgesplitst volgens de energieverdeling tussen warmte en elektriciteit. Dit gebeurt in de volgende formule:

$$\eta_{el} * O_{el} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{tot}} * K_{br} + \eta_{el} * K_{kap,el} + \eta_{el} * K_{werk,el} + \eta_{el} * W_{el} \quad (\text{Vergelijking 3})$$

$$\eta_{th} * O_{th} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{tot}} * K_{br} + \eta_{th} * K_{kap,th} + \eta_{th} * K_{werk,th} + \eta_{th} * W_{th} \quad (\text{Vergelijking 4})$$

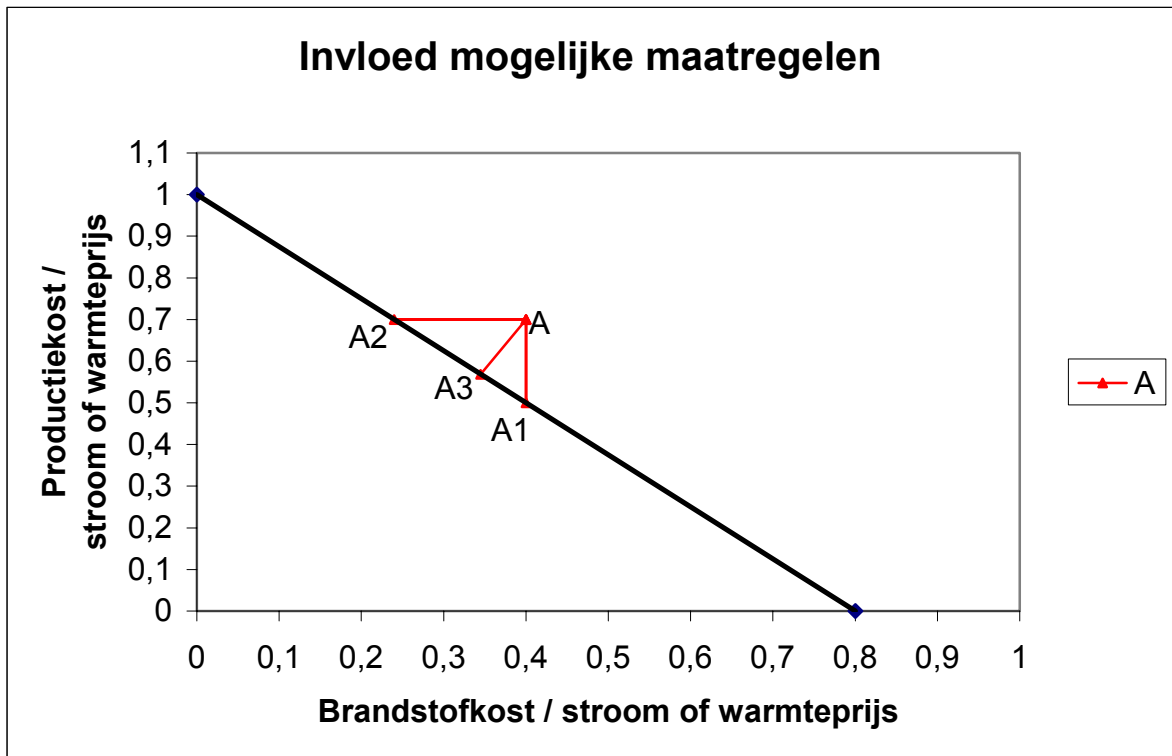
Om een economisch haalbare installatie te bouwen is het noodzakelijk dat de winst ($W \geq 0$) groter of minimum gelijk is aan nul. Wanneer de kosten ten opzichte van de respectievelijke opbrengsten van de warmte/stroomproductie worden nagegaan, komt men tot volgende vergelijking:

$$\frac{K_{kap,el} + K_{werk,el}}{O_{el}} \leq 1 - \frac{1}{\eta_{tot}} * \frac{K_{br}}{O_{el}} \quad (\text{Vergelijking 5})$$

$$\frac{K_{kap,th} + K_{werk,th}}{O_{th}} \leq 1 - \frac{1}{\eta_{tot}} * \frac{K_{br}}{O_{th}} \quad (\text{Vergelijking 6})$$

Het bovenstaande is geldig zolang het totale energetische rendement van de elektriciteits- en warmteproductie samen niet kleiner is dan enkel warmteproductie.

Wanneer we deze dimensieloze kosten schematisch voorstellen, komen we tot volgende grafiek:



Figuur 32: Diagram dimensieloze kosten: Brandstofkost/stroom- of warmteprijs ten opzichte van Productiekost/stroom- of warmteprijs

De rechte die gevormd wordt tussen de punten

- $(0;1)$: geen brandstofkost en de opbrengst compenseert juist de productiekost,
- $(\eta_{\text{tot}}; 0)$: de opbrengst compenseert juist het product van de brandstofkost en het totale energetisch omzettingsrendement van de installatie, productiekosten zijn nul;

bepaalt de scheiding tussen een economisch haalbare en niet-haalbare installatie. Links onder de rechte is de situatie gunstig, rechts boven niet meer. Deze rechte zal dan ook de evenwichtsrechte genoemd worden aangezien op deze rechte de kosten en baten juist in evenwicht zijn.

De economische haalbaarheid van een installatie is afhankelijk van volgende drie grote categorieën kosten en opbrengsten:

- Productiekost: Kapitaal- en werkingskosten
- Brandstofprijs
- Vergoeding voor warmte- en/of elektriciteitsproductie

Deze kosten/opbrengsten zijn op hun beurt weer afhankelijk van andere parameters, deze worden verder toegelicht in paragraaf 4.3.

De invloed van een verandering in kosten of opbrengsten worden schematisch voorgesteld in *Figuur 32* voor een fictief voorbeeld A. Wanneer de kapitaal- en/of werkingskosten zakken, zal A zich naar A_1 verplaatsen; wanneer de brandstofprijs zakt, zal A zich naar A_2 verplaatsen en wanneer de warmte resp. elektriciteitsprijs stijgt zal A naar A_3 gaan.

Bij de bespreking van de beïnvloedende parameters op financiële haalbaarheid van een project, zal dit telkens schematisch in een grafiek weergegeven worden.

Brandstofkosten met enkel warmteproductie als referentie of bij onderlinge verschillen in efficiënties bij verschillende WKK-installaties

Bij enkel warmteproductie situeert de warmteprijs van een installatie zich in volgende relatie met de kosten en de winst:

$$O_{th0} = \frac{1}{\eta_{tot0}} * K_{br} + K_{kapth0} + K_{werkth0} + W_{th0} \quad (\text{Vergelijking 7})$$

Deze vergelijking is dezelfde als vergelijking 1 met de veronderstelling dat de kosten, opbrengst en winst van het thermische deel niet beïnvloed worden door het elektrische deel. Met deze aanname kan voor een installatie met enkel warmteproductie de toelaatbare kapitaal- en werkingskosten berekend worden indien elektriciteitsproductie eraan toegevoegd wordt, rekening houdend met een veranderende efficiëntie van de installatie.

Voor decentrale stookinstallaties zoals van toepassing in de houtindustrie is het logisch als referentie enkel warmteproductie te beschouwen en bijgevolg de additionele kosten voor elektriciteitsproductie in rekening te brengen voor beslissing tot al of niet investeren in WKK.

4.3 Economische gevoeligheid in functie van de kosten en opbrengsten

Wanneer het rendement, de kapitaal- en werkingkosten gekend zijn en ook de opbrengst, dan kan een installatie geplaatst worden in het diagram van dimensieloze kosten. Indien uit de grafiek blijkt dat de installatie economisch niet haalbaar is, kan onderzocht worden hoe de kosten en de opbrengsten moeten veranderen om tot een economisch gunstige situatie te komen.

4.4.1 Factoren die invloed hebben op brandstofprijzen

De prijs van het hout is van verschillende factoren afhankelijk. De vervuilingsgraad speelt een rol, de stukgrootte en de beschikbaarheid ter plaatse.

Afhankelijk van de *vervuilingsgraad* van het hout, zal dit een bepaalde kost met zich meebrengen. Voor onbehandeld stukhout of zaagsel moet betaald worden, voor verontreinigd hout moet niets betaald worden en wordt in de meeste gevallen zelfs een som ontvangen ('gate fee'). De kost (positief of negatief) van de brandstof is een zeer belangrijke factor voor de rentabiliteit van een project. In *Tabel 16* worden de prijzen (februari 2002) voor de verschillende houtstromen in Vlaanderen gegeven.

Tabel 16: Richtprijzen (februari 2002) voor vers hout en recyclagehout (ref. 12)

Houtsoort	Prijs (EUR/ton)*
<i>rondhout (1 m)</i>	
Loofhout	66
Naaldhout	72
<i>Spanen</i>	
vers hout	74
Afvalhout	47
<i>Blokken</i>	
vers hout	35
Afvalhout (grof gebroken)	16
<i>Plaketten</i>	
vers hout	57
afvalhout (nagebroken)	30
pallethout (ongebroken)	7
* De bedragen zijn gebaseerd op droog hout (vochtgehalte 0%)	

In deze studie is gerekend met een gemiddelde kostprijs van 0.006 €/kWh_{br} (gemiddelde van afvalhout van spanen, afvalhout van blokken, afvalhout en pallethout van plaketten) voor niet-behandeld en behandeld niet-verontreinigd hout.

De *transport- en verzamelkosten* (Tabel 17) moeten meegerekend worden in de prijs van het hout indien het niet ter plaatse beschikbaar is en zullen stijgen naargelang de afstand toeneemt.

Tabel 17: Transportkosten in functie van de afstand (ref. 13)

Afstand in km	Vrachtwagen ^a	Tractor + aanhangwagen ^b
	€/kWh	€/kWh
5	0.0015	
10	0.0015	0.0026
15	0.0021	0.0031
20	0.0021	0.0036
25	0.0026	0.0041
30	0.0026	0.0046
50	0.0036	0.0066
70	0.0036	0.0082

^a transportvolume 80m³

^b transportvolume 30m³

bron: Leitfaden, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffen e.V.

De *stukgrootte* van hout heeft ook invloed op de prijs van het hout. De stukgrootte kan belangrijk zijn om een goedkopere verbrandingstechnologie te kunnen toepassen, maar dan moet wel de kost van het versnipperen in rekening gebracht worden.

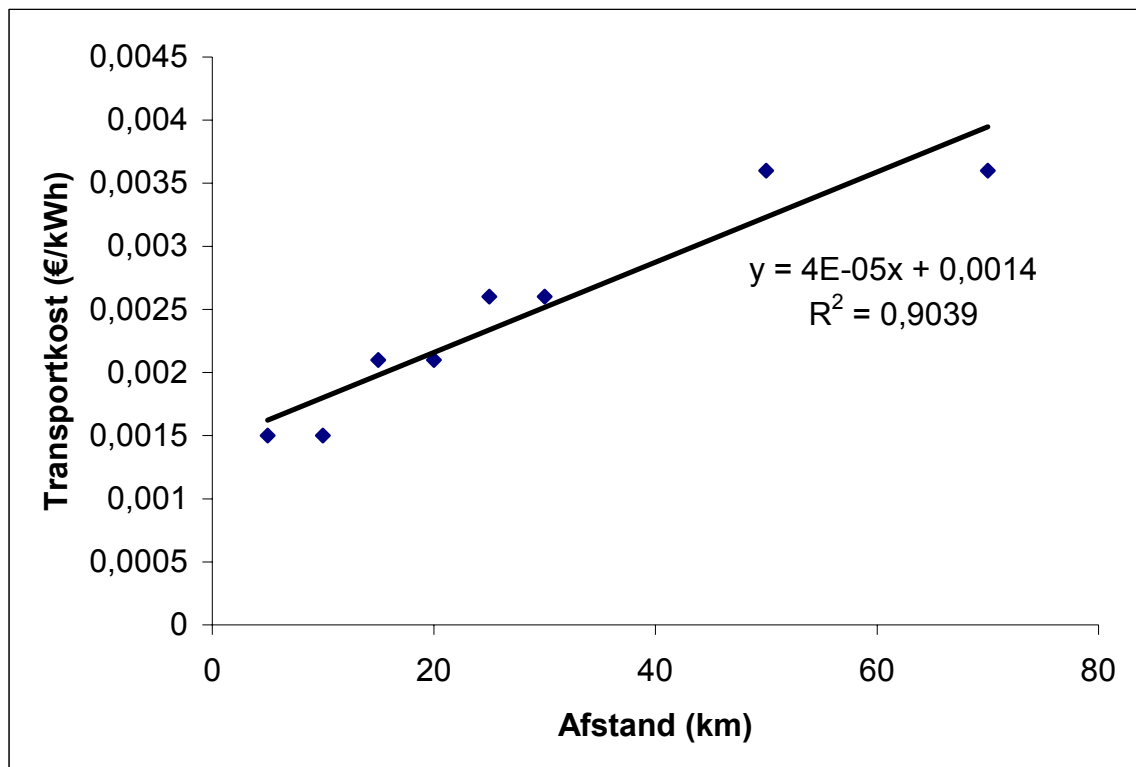
In de grafieken van dimensieloze kosten wordt de brandstofkost in rekening gebracht in de X-as waar de verhouding genomen wordt tussen de brandstofkost per kWh ten opzichte van de warmte- of stroomprijs. In *Figuur 35*, *Figuur 36*, *Figuur 37*, en *Figuur 40* er duidelijk te zien dat naarmate de brandstofkost afneemt, de productiekost mag toenemen in het gebied waar de installatie economisch haalbaar is.

Wanneer behandeld verontreinigd houtafval energetisch wordt gevaloriseerd binnen de houtverwerkende bedrijven, kan men stellen dat er geen brandstofkost is. De productiekost per kWh kan dan oplopen tot de warmte- en/of stroomprijs per kWh. In geval van warmteproductie mag de productiekost niet groter zijn dan 0.03 €/kWh (*Figuur 36*), voor elektriciteitsproductie uit hout in een lokale WKK-installatie mag de bijkomende productiekost niet groter zijn dan 0.094 €/kWh (*Figuur 40*).

Voor elektriciteitscentrales op biomassa zowel ‘fuel dedicated’ installaties als bij- en meestook installaties, is de kost van het hout een belangrijke factor rekening houdend met de transportkosten. De totale brandstofprijs moet dus in relatie bekeken worden met de productiekost van elektriciteit.

- Stel de bijkomende productiekost voor mee/bijstook installaties schommelt rond de 0.008 €/kWh (*Tabel 19*).
- De brandstofkost van hout komt in de huidige bij- en meestookinstallaties in de plaats van de vermeden brandstofkost voor kolen. In de literatuur (ref. 14) wordt gerekend met een kolenprijs van 1.82 €/GJ of 0.006 €/kWh_{br}. Dit stemt overeen met de gemiddelde houtprijs die in deze studie gehanteerd wordt. Er is dus geen bijkomende brandstofkost van hout.

=> De transportkost mag in dit voorbeeld de gemiddelde bijkomende productiekost evenaren nl. 0.008 €/kWh. Indien *Tabel 17* wordt uitgezet in een grafiek (*Figuur 33*) komen we tot een afstand van 165 km als actieradius voor transport per vrachtwagen, indien de transportafstand verder toeneemt zal de brandstofkost te hoog zijn en is de installatie economisch niet meer haalbaar (in *Figuur 37* schuiven de punten naar rechts op), tenzij voor een goedkopere manier van transport (vervoer via scheepvaart, trein) kan gezorgd worden.

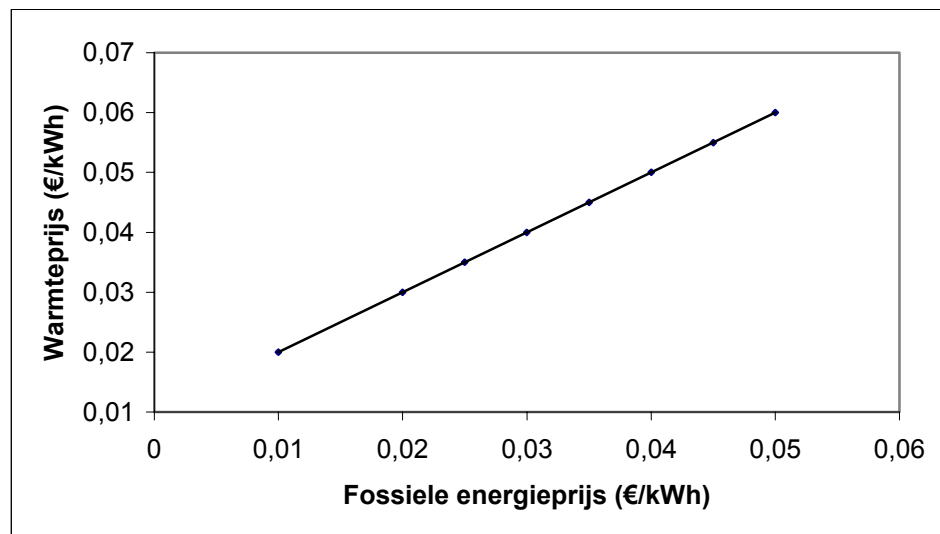


Figuur 33: Transportkosten in functie van de afstand

4.4.1 Factoren die invloed hebben op stroom/warmteprijsen

De stroom- en warmteprijs worden beïnvloed door verschillende factoren.

In Vlaanderen wordt warmte nog niet veel verhandeld en is er nog geen echt gangbaar bekend bedrag voor warmte. Deze warmteprijs in €/kWh kan echter wel berekend worden uit de kosten die nodig zijn om deze warmte/stoom met een klassieke stoomketel op gas of olie op te wekken en of men volledig kan betrouwen op de levering van de warmte/stoom. Indien dit niet het geval is dan moet de koper van de warmte zelf nog een reserveketel op fossiele brandstof voorzien. In dit geval wordt enkel de vermeden kost voor aardgas of stookolie genomen als prijs die men wil betalen voor de warmte/stoom rekening houdend met het omzettingsrendement. De prijs die men voor warmte wil geven is dus afhankelijk van de fossiele olieprijs (Figuur 34). In deze studie wordt aangenomen dat een bedrag van 0.03 €/kWh (0.02 €/kWh vermeden gas of olielasten + 0.01 €/kWh vermeden kosten voor infrastructuur, ref. 43) een prijs is die de industrie zou willen geven voor warmte op juiste temperatuur en druk en gegarandeerd continu.



Figuur 34: Mogelijke evolutie van de warmteprijs in functie van de fossiele energieprijs

De elektriciteitsprijs is van meerdere factoren afhankelijk. Allereerst is er de prijs dat een energiebedrijf wil betalen voor grijze stroom. De prijs per kWh is afhankelijk van de hoeveelheid stroom die aan het net wordt gevoed, hoe constant en hoe betrouwbaar deze stroom wordt geleverd en op welke momenten (piek- of daluren). Voor kleine hoeveelheden stroom, die niet constant wordt geleverd, wordt een minder goede prijs bedongen. In deze studie wordt verondersteld dat deze prijs kan schommelen tussen de 0.01 en 0.04 €/kWh, een uitgemiddelde prijs van 0.02 €/kWh wordt aangenomen in de berekeningen van deze studie. Door de vrijmaking van de energiemarkt zijn deze prijzen meer nog dan vroeger aan fluctuaties onderhevig.

Een tweede belangrijke factor die speelt bij elektriciteitsopwekking uit houtafval, zijn de groenestroomcertificaten. Per MWh groene stroom kan een extra vergoeding bekomen worden variërend tussen de 20 € (minimumprijs) en 125 € (maximum boeteprijs in 2004). De grijze en groene stroomprijzen voor de maand maart 2003 zijn weergegeven in *Tabel 18* en werden gebruikt in de berekeningen voor deze studie.

Tabel 18: Energieprijzen België maart 2003

	Aankoopprijs (€/kWh)	Verkoopprijs (€/kWh)
Elektriciteit		
grijs	0.065 - 0.15	0.01- 0.04
groen	-	0.074 extra
Gas	0.02	-
Warmte	-	0.03

Indien voor een WKK-installatie wordt gekozen, wordt de energie die vrijkomt bij de omzetting van hout deels gebruikt voor warmte en deels voor elektriciteit. Een WKK-installatie zal in de toekomst (vanaf januari 2004³) recht hebben op WKK-certificaten indien voldaan is aan bepaalde voorwaarden o.a. 5% relatieve primaire energiebesparing.

³ De kwaliteitscriteria van een kwalitatieve WKK werden reeds vastgelegd in het besluit van de Vlaamse regering van 7 september 2001. Het uitvoeringsbesluit ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve

Een WKK-installatie op hout zou gebruik kunnen maken van de groenestroomcertificaten en de WKK-certificaten (indien het voldoet aan de voorwaarden). De invloed van WKK-certificaten op de economische haalbaarheid van een installatie kan echter enkel voorbeeldsgewijs nagegaan worden. Dit zal dan ook gebeuren in paragraaf 4.4.

4.4.1 Factoren die invloed hebben op productiekost

Verskillende parameters hebben invloed op de productiekost. De belangrijkste factor die zowel invloed heeft op de kapitaal- als op de werkingskost is de gekozen technologie.

warmtekrachtinstallaties is op het moment van verschijnen van dit rapport nog niet goedgekeurd, maar verwacht wordt dat de WKK-certificaten medio 2004 van start kunnen gaan.

Technologie

De investeringskost van een technologie hangt af van:

- *de gekozen energiedrager*: De energiedrager is belangrijk voor de technologiekeuze. Zelfs enkel bij de levering van warmte kunnen zich al verschillen voordoen. Warmte als energiedrager kan onder de vorm van warm water, lage druk stoom of hoge druk stoom geleverd worden. In geval van warm water is er een heel efficiënte omzetting van de energie input, bij stoom is dit lager. Voor de productie van warm water en lage druk stoom (tot circa 32 bar) kan gewerkt worden met een vlampijpketel. Voor hogere druk stoom moet een waterpijpketel ingezet worden. Een vlampijpketel is minder complex van bouw en moet voldoen aan minder strenge voorschriften ten opzichte van een waterpijpketel. Dit weerspiegelt zich dan ook in een duidelijk prijsverschil (vuistregel: waterpijpketel = 2 x vlampijpketel). De benodigde processtoom schommelt in de meeste gevallen tussen de 5 en 15 bar waardoor de productiekost (vlampijpketel) onder controle kan gehouden worden. Voor elektriciteitsproductie is hoge druk stoom het meest aangewezen, zeker indien met een stoomturbine wordt gewerkt.
- *de karakteristieken van de brandstof*: Bij behandeld verontreinigd hout is er de noodzaak voor een meer uitgebreide rookgasreiniging. De stukgrootte van het houtafval bepaald of er verbrand wordt met een schroefstoker, een wervelbed of een rooster.
- *de complexiteit van de technologie*: De complexiteit kan in de verschillende delen van de installatie voorkomen. Thermische olie, lage of hoge drukstoom zijn complexer dan louter warme lucht. De productie van elektriciteit vergroot ook de complexiteit van een installatie. Een WKK-installatie kan dus zeer complex worden en ook naar sturing moet met meer parameters rekening gehouden worden.
- *de grootteorde van de installatie*: De te kiezen technologie hangt af van de grootteorde. Bepaalde technologieën zijn enkel geschikt voor kleine installaties en omgekeerd (Tabel 20).
- *de marktrijpheid van de technologie*: Deze factor is vnl. van belang bij nieuwe WKK-technologieën waar recent heel wat onderzoek en ontwikkeling is gedaan. Deze nieuwe technologieën worden meer en meer op industriële schaal geplaatst.

Bij de energieomzetting van hout kan gekozen worden voor warmte en/of elektriciteitsproductie. Dit brengt een verschil in productiekost met zich mee.

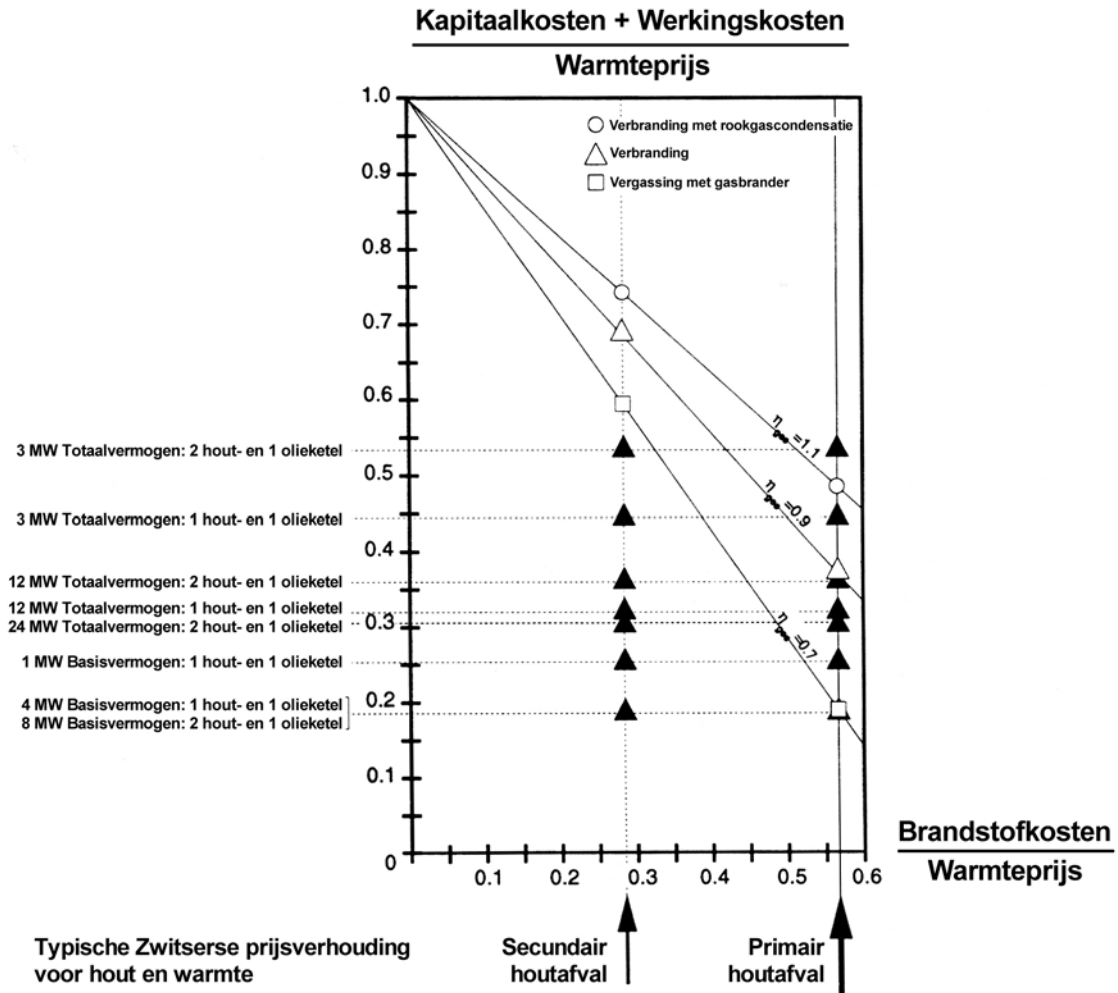
Energiedrager: warmte

In *Figuur 35* en *Figuur 36* zijn installaties voorgesteld met enkel warmteproductie. De productiekost/warmteprijs wordt gegeven ten opzichte van de brandstofkost/warmteprijs in een grafiek van dimensieloze kosten.

Figuur 35 is overgenomen uit een onderzoek van Nussbaumer, volgende waarden zijn gebruikt voor:

- brandstofkost onbehandeld hout: 0.0281 €/kWh_{th}
- brandstofkost behandeld afvalhout: 0.0139 €/kWh_{th}
- warmtevergoeding: 0.0495 €/kWh_{th}

In *Figuur 35* komt naar voor dat voor onbehandeld hout een hogere brandstofkost geldt, waardoor een aantal installaties niet kostendekkend zijn. Een verlaging van de brandstofkost zal leiden tot een economisch rendabele oplossing.



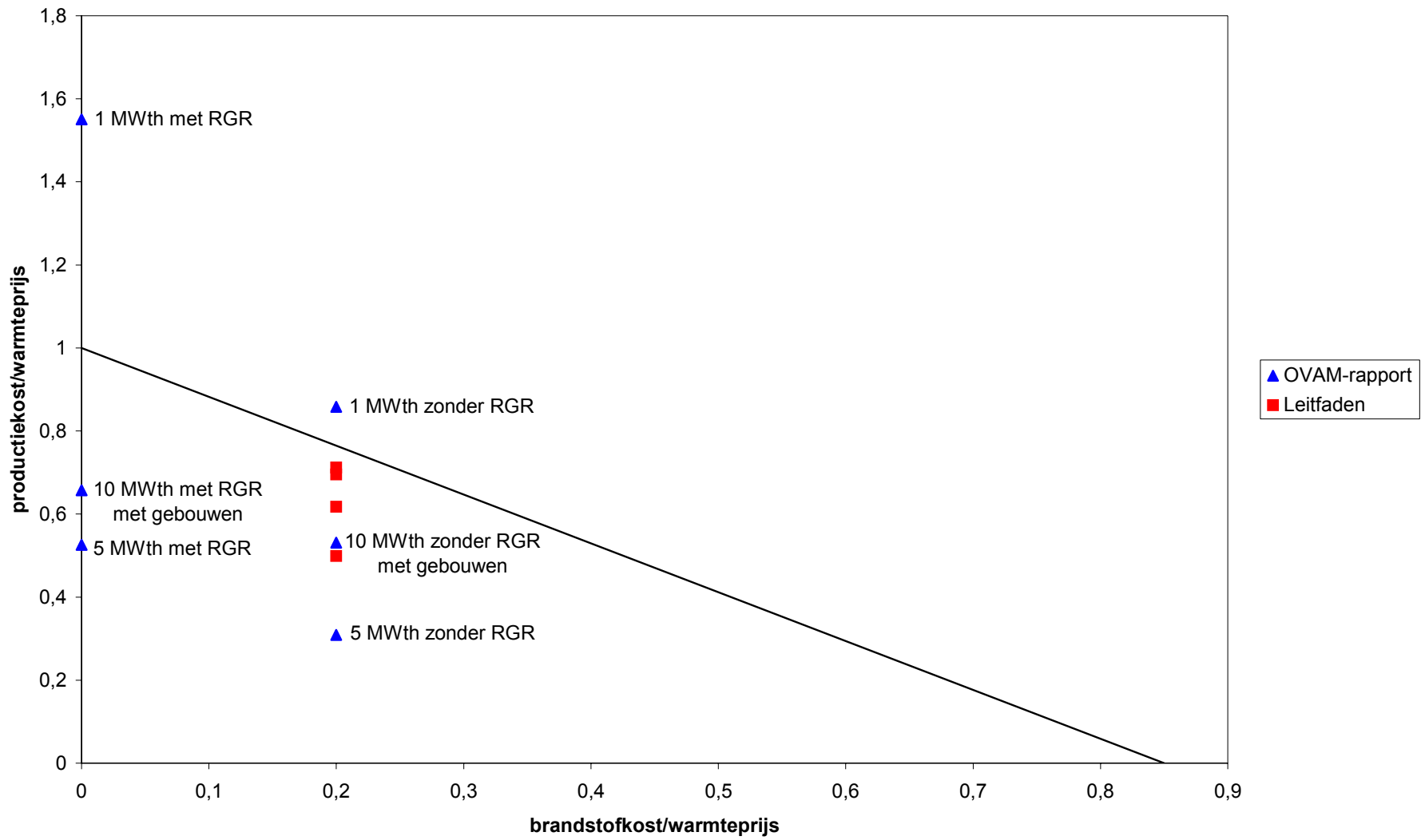
Figuur 35: Diagram dimensieloze kosten voor warmte/stoom producerende installaties (ref. 2)

In *Figuur 36* worden de hypothetische voorbeelden van de OVAM-studie rond houtafval (ref. 4) samen met enkele andere gegevens uit de literatuur (ref. 13) grafisch voorgesteld in een grafiek van dimensieloze kosten (zie bijlage 3). Er werd onderscheid gemaakt tussen verschillende grootteordes van een installatie (1, 5 en 10 MWth) en tussen het gebruik van onbehandeld of behandeld niet-verontreinigd hout en behandeld verontreinigd hout (met of zonder uitgebreide rookgasreiniging: 'RGR'). In het voorbeeld van een installatie van 10 MWth werd de kost voor gebouwen en infrastructuur in rekening gebracht, bij de kleinere installaties (1 en 5 MWth) werd van de veronderstelling uitgegaan dat de installatie bijgeplaatst werd in gebouwen van het houtverwerkend bedrijf. De brandstofprijs en warmtevergoeding zijn aangepast aan Vlaamse randvoorwaarden:

- brandstofkost behandeld niet-verontreinigd hout: 0.006 €/kWh_{br}
- brandstofkost behandeld verontreinigd hout: 0 €/kWh_{br}
- warmtevergoeding: 0.03 €/kWh_{th}

Uit *Figuur 36* kan worden afgeleid dat de meeste installaties onder de evenwichtsrechte liggen, d.w.z. dat deze installaties economisch haalbaar zijn. De enige installaties die boven de rechte liggen zijn voorbeelden van kleine installaties van 1 MW met en zonder een volledige rookgasreiniging. Een verlaging van de brandstofkost kan de installatie zonder rookgasreiniging tot een gunstige economische situatie leiden. Bij de 1 MW installatie met rookgasreiniging is een verlaging van de brandstofkost niet voldoende. Hieruit blijkt dat bij houtketels de rookgasreiniging een belangrijke rol speelt bij de productiekost en dat het ontbreken van de brandstofkost in dit geval niet voldoende is om tot een rendabel project te komen. Voor de twee grotere installatie (5 MWth en 10 MWth) compenseert het ontbreken van de brandstofkost wel en wordt de invloed van de grootteorde belangrijker. In de voorbeelden van de OVAM houtafvalstudie gaat het echter niet helemaal op dat naarmate de grootteorde toeneemt, de productiekost daalt. Dit is te wijten aan het verschil in scope tussen de 1 en 5 MWth (zonder gebouwen en infrastructuur) en de 10 MWth (met gebouwen en infrastructuur). Ook de strengere emissiereglementering bij hogere capaciteit speelt hierbij een rol, waardoor een discontinuïteit optreedt in het verloop van de specifieke investeringskost.

Uit beide figuren kan besloten worden dat gegeven de randvoorwaarden (vb. beperkte brandstofkost) de meeste installaties voor productie van warm water of lage druk stoom economisch gunstig zijn zelfs met een uitgebreide rookgasreiniging op voorwaarde dat de installatie voldoende groot is.



Figuur 36: Diagram dimensieloze kosten voor warmte/stoom producerende installaties (ref. 4 en 13)

Energiedrager: elektriciteit

Voor het opwekken van elektriciteit uit hout bestaan er twee mogelijkheden: ofwel wordt hout gebruikt in een centrale die hiervoor speciaal werd gebouwd ('fuel dedicated'), ofwel wordt hout gebruikt in een bestaande elektriciteitscentrale waar aanpassingen aan gebeuren om hout te kunnen bij/meestoken. Het gebruik van hout in bestaande elektriciteitscentrales kan op verschillende manieren gebeuren. De meest toegepaste tot nu toe zijn directe en indirecte meestook en bijstook in kolencentrales:

- Directe meestook: hout wordt samen met steenkool verkleind en gezamenlijk via de bestaande steenkoolvoeding aan de centrale gevoed en verbrand met conventionele kolenbranders.
- Indirecte meestook: hout wordt apart van de steenkool verkleind waarna het verpoederde houtstof separaat aan de centrale wordt gevoed en verbrand met speciale branders.
- Bijstook: hout wordt eerst separaat vergast, waarna de rookgassen worden gevoed aan kolencentrale, met al dan niet reinigen (LT: lage temperatuursreiniging) van de rookgassen.

Onderzoek gebeurt naar mogelijkheden :

- om na vergassing van hout het stookgas bij te stoken in een STEG-centrale
- om laagwaardige stoom van een houtcentrale in een stoomcyclus van een elektriciteitscentrale te integreren
- om bio-olie geproduceerd na pyrolyse van het hout, bij te stoken in een elektriciteitscentrale

In *Figuur 37* wordt dezelfde oefening voor elektriciteitsproductie als voor warmteproductie (productiekost/stroomprijs uitgezet ten opzichte van de brandstofkost/stroomprijs) gedaan voor hout gestookte centrales en bij- en/of meestook in bestaande elektriciteitscentrales (zie bijlage 3). Het is belangrijk de juiste randvoorwaarden bij deze twee verschillende types installaties te verduidelijken. Bij 'fuel dedicated' centrales op hout wordt de totale productiekost en totale brandstof kost uitgezet ten opzichte van de totale opbrengst voor groene stroom. De randvoorwaarden die gelden zijn de volgende:

- brandstofkost hout: 0.006 €/kWh_{br}
- elektriciteitsvergoeding grijs+groen: 0.094 €/kWh_{el}

Bij bij- en meestookinstallaties liggen deze randvoorwaarden anders. De productiekost is hier de additionele kapitaal- en werkingskost die nodig is om een bestaande elektriciteitscentrale aan te passen voor productie van groene stroom. Deze additionele productiekost wordt dan ook uitgezet ten opzichte van de additionele opbrengst voor de productie van groene stroom. Ook voor de brandstofkost wordt gerekend met een additionele kost van het niet-verontreinigd hout ten opzichte van de kolen of het gas. In deze figuur is gerekend ten opzichte van kolen (cfr. 4.04.4.1). De additionele kosten voor hout en groene stroom zijn de volgende:

- brandstofkost hout: 0 €/kWh_{br}
- elektriciteitsvergoeding groen: 0.074 €/kWh_{el}

In *Tabel 19* is deze additionele kost voor verschillende bij-meestook technieken weergegeven.

In *Figuur 37* komt duidelijk naar voor dat zowel voor bij/meestook installaties als voor ‘fuel dedicated’ centrales de situatie met de huidige groene stroomprijs leidt tot economisch haalbare installaties. Wel valt op te merken dat de bij- en meestook installaties meer linksonder in de figuur van dimensieloze kost zijn gesitueerd en een gunstigere economische situatie hebben dan de ‘fuel dedicated’ centrales.

Elektriciteitscentrales volledig op houtafval hebben twee belangrijke nadelen: ten eerste is de grootteorde van de centrale beperkt omdat anders de brandstofkost (aanvoer van het hout van te ver) te hoog oploopt, ten tweede kunnen (nog) niet dezelfde omzettingsrendementen en omzettingstechnieken gebruikt worden als bij de klassieke elektriciteitscentrales. Deze twee factoren verhogen de investeringskost aanzienlijk bij houtcentrales en dit leidt tot situaties die economisch minder gunstig zijn. Bij bij- en meestook installaties spelen deze factoren minder aangezien de klassieke technieken gebruikt kunnen worden met dezelfde efficiënties en is het aandeel van hout ten opzichte van kolen slechts beperkt.

Tabel 19: Concepten mee-/bijstook organisch-biologische stoffen in 'base-case' kolenverbrandingscentrale (ref. 14)

Concept	Netto elektrisch rendement biobrandstof (%LHV)		Specifieke additionele investeringskost (€/kWe)	
	10	40	10	40
Mee-/bijstook (%)				
Directe meestook ¹	39.5	39.5	40	25
Indirecte meestook ²	38	38	500	285
Bijstook ³ separate vergassing				
- zonder stookgasreiniging	38	38	455	300
- met LT-stookgasreiniging	35.5	35.5	1120	735
Bijstook separate pyrolyse				
- langzaam zonder pyrolysegas reiniging ⁴	36	36	895	895
- langzaam met pyrolysegas reiniging ⁴	32.5	32.5	1240	1240
- snel	36	36	935	935
Bijstook separate HTU ⁵	35.5	35.5	620	490
Bijstook verbranding met stoomzijdige integratie ⁶	38.5	38.5	940	575

¹ Directe meestook: organisch-biologische stof wordt samen met steenkool verkleind en gezamenlijk via de bestaande steenkoolvoeding aan de centrale gevoed en verbrand met conventionele kolenbranders.

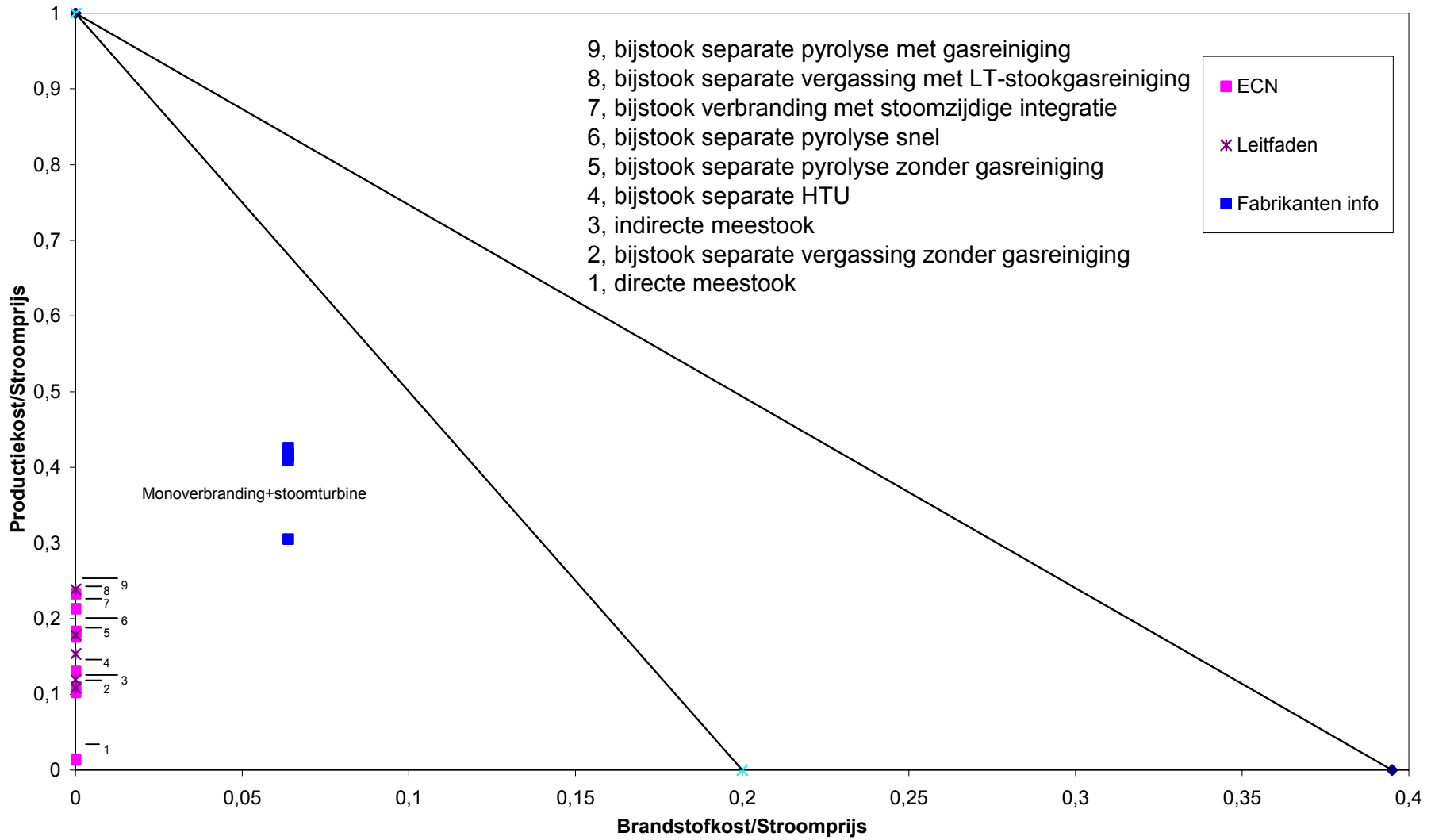
² Indirecte meestook: organisch-biologische stof wordt apart van de steenkool verkleind waarna de verpoederde organisch-biologische stof separaat aan de centrale wordt gevoed en verbrand met speciale branders.

³ Bijstook: organisch-biologische stof wordt eerst separaat vergast, waarna het stookgas wordt gevoed aan kolencentrale, met al dan niet reinigen (LT: lage temperatuursreiniging).

⁴ De hier weergegeven en gebruikte specifieke investeringskosten bleken in de praktijk aanzienlijk hoger, te weten: 1200 Euro/kW, en 2000 Euro/kW.

⁵ HTU: Hydro Thermal Upgrading: De verkleinde organisch-biologische stof wordt in vloeibaar water bij een druk van ca. 120-180 bar en temperatuur van 300-350°C omgezet in 'biocrude', een hoogcalorische op zware olie gelijkende brandstof. De 'biocrude' wordt separaat aan de centrale gevoed en aldaar verbrand met specifieke branders. Het HTU-proces is in ontwikkelingsfase en de verwachting is dat het proces rond 2010-2015 beschikbaar komt voor toepassing op middelgrote schaal in Nederland.

⁶ De organisch-biologische stof wordt in een volledig aparte biomassacentrale verbrand en stoom van lage kwaliteit mee opgewekt. Deze lage kwaliteitsstoom wordt dan in een grote E-centrale verder oververhit naar hoge kwaliteitsstoom. De hier weergegeven bijstookpercentages hebben slechts een theoretische betekenis, daar het werkelijk praktisch toepasbare percentage sterk gelimiteerd zal zijn door de marge die het reeds bestaande "optimale" stoomcircuit toestaat.

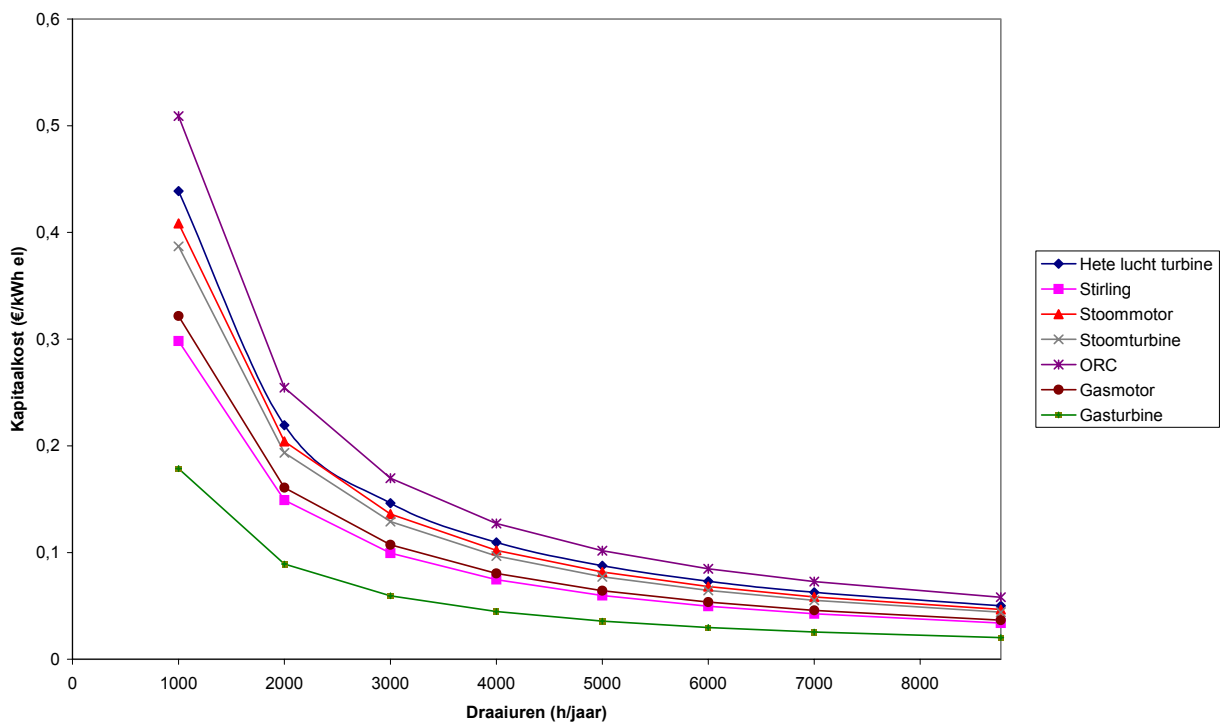


Figuur 37: Diagram dimensieloze additionele kosten voor elektriciteitscentrales (ref. 13 en 14)

Energiedrager: warmte en elektriciteit

In WKK-installaties wordt zowel warmte als elektriciteit geproduceerd. Een belangrijk onderscheid tussen WKK en elektriciteitscentrales is het feit dat WKK decentraal gebeurt. Een WKK-installatie zal zich zo dicht mogelijk bij zijn warmteconsument situeren en aangepast zijn aan het warmtevermogen gevraagd door zijn consument. Een gevolg hiervan is dat deze WKK-installaties dikwijls van een kleinere *grootteorde* zijn dan elektriciteitscentrales. Aangezien de klassieke technologieën voor de productie van elektriciteit op grote schaal zeer duur zijn wanneer ze toegepast worden op decentrale kleinere WKK-installaties, spitst het onderzoek in WKK-technologie zich toe op meer efficiënte en/of goedkopere systemen.

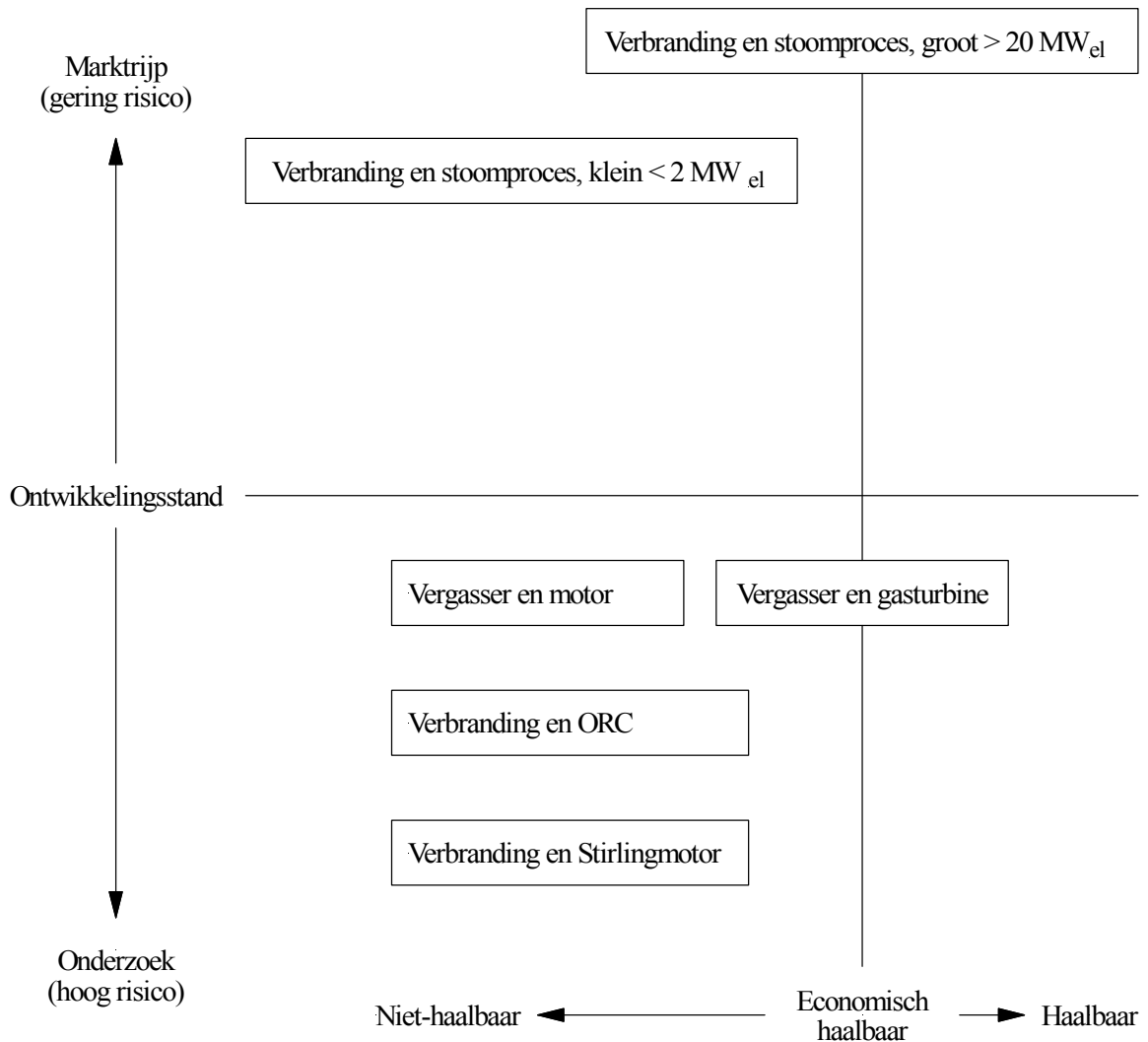
Naast de kleinere vermogens die de productiekost beïnvloedt, is er een tweede parameter die indirect de kapitaalkost beïnvloed nl. de aanbevolen *bedrijfswijze*. Een WKK-installatie die warmte gestuurd is, is energetisch de meest optimale bedrijfswijze. Indien echter de warmtetoepassing een verwarmingssysteem is, is het aantal draaiuren per jaar beperkt. Om de productiekost van elektriciteit te verkleinen, kan gekozen worden om de WKK-installatie te sturen op maximale elektriciteitsproductie zodat er meer draaiuren en dus meer kWh gepresteerd worden. De productiekost kan dan verdeeld worden over meer kWh. Deze aanpassing heeft echter ook invloed op het totaalrendement van de installatie (deze daalt in de meeste gevallen). In *Figuur 38* wordt duidelijk dat de kapitaalkost daalt bij een toenemend aantal draaiuren.



Figuur 38: Gemiddelde kapitaalkost (€/kWh, Tabel 20) per technologie in relatie met het aantal draaiuren.

Een zeer onzekere maar belangrijke invloed op de productiekost is de *stand van zaken* van de technologie. De marktrijpheid van een technologie bepaalt in zeer grote mate de aankoop prijs en gedeeltelijk ook de werkingskost van een installatie. In de aankoop prijs zitten volgende factoren verwerkt: de engineering die nodig is, het produceren in serie, het risico van de

technologie, In technologieën die nog niet marktrijp zijn, zijn er nog veel manuren engineering nodig en kan er nog niet in serie geproduceerd worden. Ook de opstart en onderhoudskosten kunnen oplopen aangezien er nog maar weinig ervaring is met deze installaties. Deze parameters kunnen zwaar wegen op de productiekost. In *Figuur 39* wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken en hun economische haalbaarheid zonder groenestroomcertificaten in overweging te nemen.



Figuur 39: Ontwikkelingsstand en economische situatie van de verschillende technieken (ref. 2)

Een laatste factor die invloed heeft op de productiekost is de technologie. De *keuze van de technologie* gebeurt in functie van de warmtetoepassing (W/K-verhouding, druk+temperatuur nodig), de grootteorde die nodig is, de brandstof die ter beschikking is, de gewilde energetische omzettingsrendementen en de stand van zaken (risicofactor).

In *Tabel 20* is een overzicht gegeven van de mogelijke WKK technologieën:

- met hun range waarin deze gebruikt worden;
- de mogelijke energetische omzettingsrendementen;
- warmte/kracht-verhouding;

- aanbevolen bedrijfswijze (warmte- of elektriciteitsgestuurde WKK);
- de stand van zaken;
- met hun draaitijden;
- hun investeringskostprijs.

Figuur 40 is gelijkaardig aan *Figuur 35*, *Figuur 36* en *Figuur 37*. Voor WKK-installaties wordt dezelfde redenering gevolgd als voor bij- en meestookinstallaties nl. de additionele productiekost voor het installeren van een WKK ten opzichte van een louter warmte producerende installatie⁴ wordt gezet ten opzichte van de meeropbrengst van elektriciteit (grijs+groen). Volgende randvoorwaarden werden gebruikt in *Figuur 40*:

- brandstofkost hout: 0.006 €/kWh_{br}
- elektriciteitsvergoeding grijs+groen: 0.094 €/kWh_{el}

In *Figuur 40* worden voor de verschillende WKK-technieken de maximum, minimum en gemiddelde productiekost (uit *Tabel 20*) voorgesteld (zie bijlage 3).

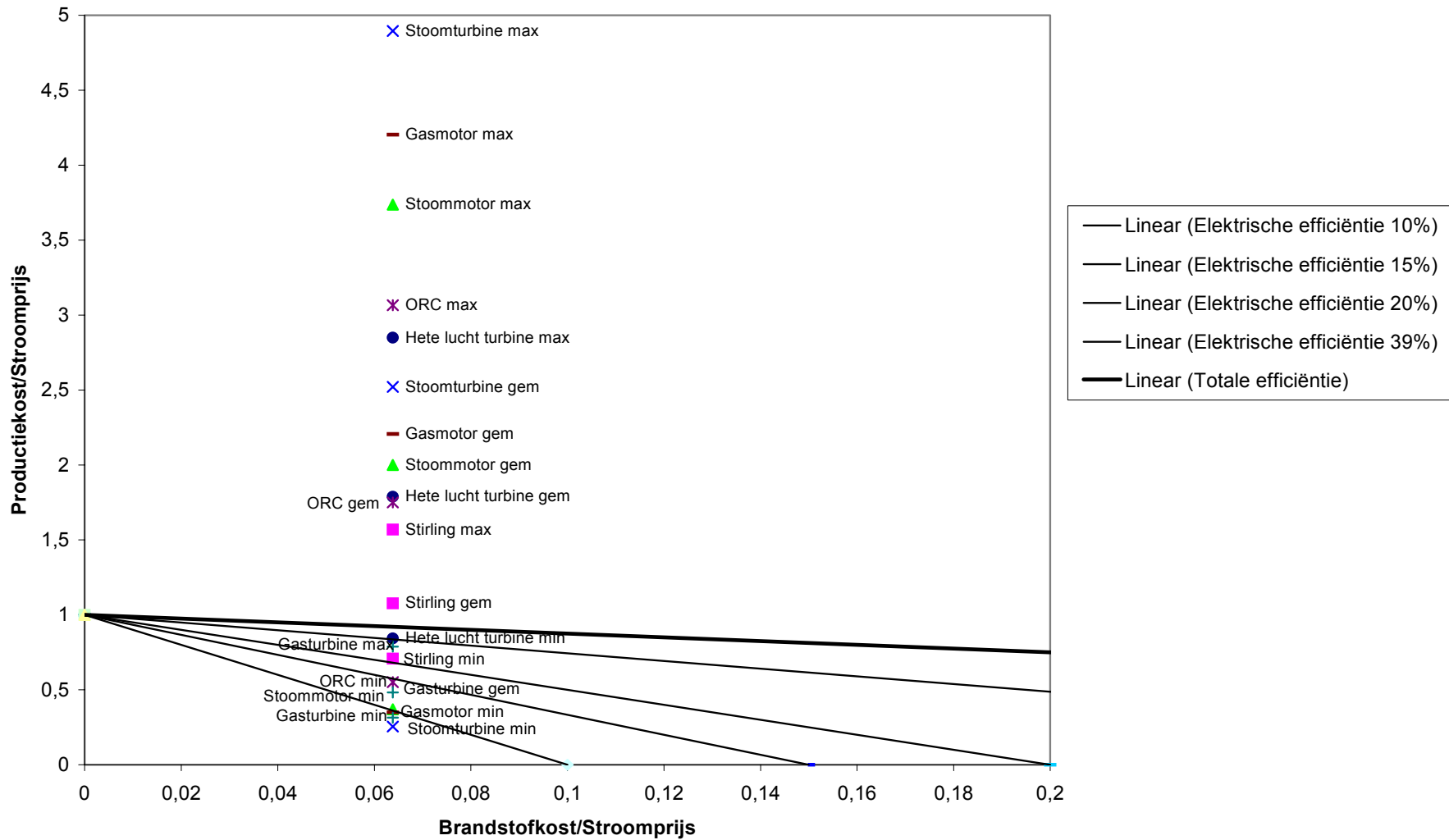
Uit *Figuur 40* blijkt dat de bijkomende productiekost voor het produceren van elektriciteit in een WKK-installatie in vele gevallen boven de evenwichtslijn ligt en dus economisch niet haalbaar is. De hoge groene stroomprijs compenseert de bijkomende productiekost niet. De grafieken geven ook weer dat het verhogen van de stroomprijs of het verlagen van de brandstofkost in vele gevallen geen soelaas biedt. De eerste evolutie die zich hier moet voordoen is een verlaging van de productiekost. Naar de toekomst toe zal dit voor de innovatieve technologieën gebeuren zodra er meer installaties gebouwd zijn en er meer draaiuren en dus meer ervaring en minder risico's aan verbonden zijn. Belangrijke opmerking bij deze figuur is het feit dat er gewerkt is met range van maximum en minimumprijzen. Deze figuur geeft een trend weer, indien dezelfde oefening voor een concreet voorbeeld met een welbepaalde prijs wordt gedaan kan dit tot andere (betere of slechtere) resultaten leiden.

⁴ Volgende aannames werden gedaan voor *Figuur 40*:

- Gemiddelde kapitaalkost van een houtverbrandingsinstallatie voor warmte/stoom: 363 €/kW_{input}. Dit getal vermenigvuldigd met de elektrische efficiëntie van de WKK-technologie werd afgehouden van de totale kapitaalkost per kW_e van de WKK-technologie.
- Gemiddelde werkskost van een houtverbrandingsinstallatie voor warmte/stoom: 0.004 €/kWh. Dit werd afgehouden van de werkskost voor de WKK-technologie.

Tabel 20: Vermogensrange, elektrische efficiëntie, totale efficiëntie, W/K-verhouding, aanbevolen bedrijfswijze, ontwikkelingsstadium, prijsrange en werkingkost per technologie (Ref. 2, 7, 15 en 16).

Technologie	P_{el} kW _{el}	η_{el} %	η_{tot} %	W/K	Aanbevolen bedrijfswijze	Ontwikkelings- stadium	Max. draaitijd	Prijsniveau €/kW _{el}	Werkingskost €/kWh _{el}
Stoomturbine	>100	7-40	70-85	3.4 - 9.1	W/E	Op de markt	8000 h/j	1000 – 8000	0.007
Stoommotor	20 - 1500	6 - 20	78-90	2.9 - 9.1	W/E	Op de markt	h/j	1500 – 8000	0.007-0.011
ORC	50 - 3000	8 -20	85	3.7 - 7.7	W/E	Demonstratie/Marktrijp	Piloot	1700 – 6000	0.007
Stirling	10 -150	6.5-28	63-86	1.25 - 12.5	W	Piloot/Demonstratie	Piloot	2300 – 2800	0.004-0.011
Hete lucht turbine	75-1800	2-25	65-95	1.7 - 4.3	E	Piloot	-	1500 – 6000	
Gasmotor	10-5000	15-31	70-88	0.1 – 4	W/E	Demonstratie/Marktrijp	Piloot	800 – 3500	0.015-0.300
Gasturbine	>1000	20-39	65-92	1.7 - 3.0	E	Piloot/Demonstratie	Piloot	1200 – 3000	0.007-0.011

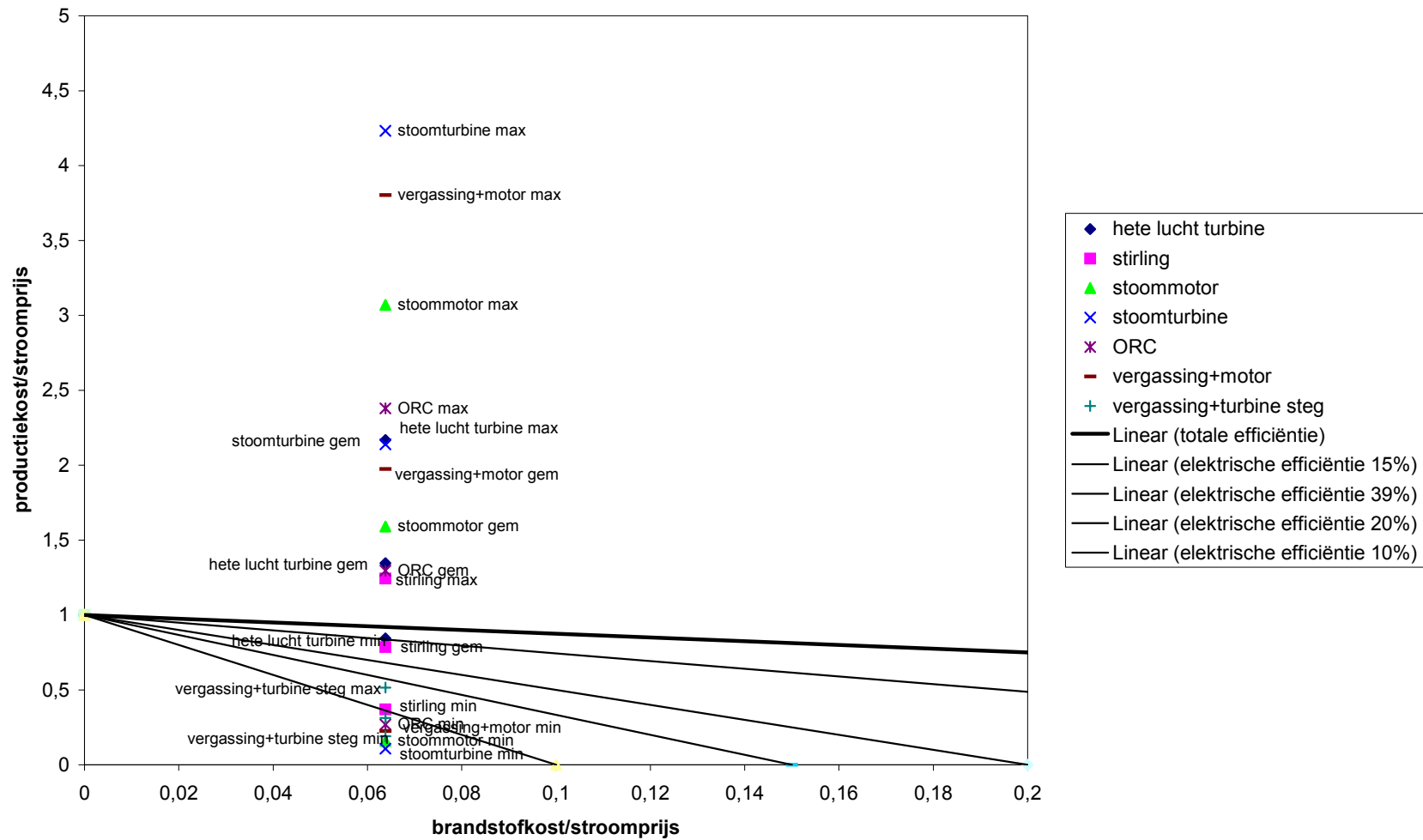


Figuur 40: Diagram dimensieloze additionele kost voor WKK-installaties (ref. 2, 7, 15 en 16)

Een ondersteunende maatregel vanuit de overheid die een directe invloed op de productiekost per kWh elektriciteit heeft, is ecologiesteun (cfr. paragraaf 5.6.3) verlenen voor WKK-installaties. Door deze steun bij het investeren kan de productiekost per kWh elektriciteit in een WKK-installatie dalen.

In *Figuur 41* is een ecologiesteunpercentage van 35% voor KMO's doorgerekend op de additionele kapitaalskost. Uit de figuur is af te leiden dat deze steun de punten al een flink stuk doet dalen. Voorlopig is dit voor sommige technologieën nog niet voldoende. Door een verdere commercialisatie van de nieuwe technieken zal er zich nog een verdere prijsdaling voordoen, hier zullen echter nog enkele jaren overheen gaan.

Een bijkomende maatregel waar een WKK-installatie op houtafval recht op heeft, is de investeringsaftrek. Deze maatregel kan echter niet voorgesteld worden in een algemene figuur van dimensieloze kost aangezien deze belastingsaftrek gebeurt op de belastbare winst. De belastbare winst is voor elk bedrijf zeer specifiek en kan hier niet bepaald worden. De situatie zal waarschijnlijk lichtjes verbeteren, maar dit kan niet verder gekwantificeerd worden.



Figuur 41: Diagram dimensieloze additionele kost voor WKK-installaties rekening houden met een ecologiesteunpercentage van 35%

4.4 Vergelijking tussen installaties met warmte/stoomproductie, WKK-productie of elektriciteitsproductie door mono- of co-verbranding

In dit deel worden een klassieke stookketel voor productie van stoom of warm water, een WKK-installatie en elektriciteitsproductie door mono- of co-verbranding, allen 10 MW input, naast elkaar gezet en de economische gegevens worden vergeleken.

De prijsgegevens zijn gebaseerd op de OVAM-studie rond houtafval (*ref. 4*) en bijkomende prijsgegevens voor co-verbranding werden gehaald uit de ECN-studie (*Tabel 19, ref 14*). De verschillende gegevens per installatie worden weergegeven in *Tabel 21*.

De installaties voor stoom/warmte-productie, WKK en elektriciteitscentrale zijn alle voorzien van een uitgebreide rookgasreiniging zodat behandeld verontreinigd hout kan verbrand worden.

In de ‘fuel dedicated’ elektriciteitscentrale wordt elektriciteit opgewekt met een condenserende turbine met luchtcondensor. Ook voor de WKK-installatie is voor een condenserende turbine gekozen en niet voor een tegendruk turbine. In praktijk (cfr. Duitse spaanplaatindustrie) wordt deze keuze gemaakt omdat dit meer flexibiliteit naar bedrijfsvoering toe geeft. Voor de WKK-installatie wordt een extra aftap (of een gecombineerde aftap voor warmte/stoomtoepassing en ontgasser) aan de turbine voorzien waar stoom kan afgenomen worden voor de warmte/stoomtoepassing. Dit technische verschil heeft weinig tot geen invloed op de investeringsprijs van de turbine van een WKK-installatie ten opzichte van een elektriciteitscentrale aangezien de turbine met dezelfde standaardelementen op een andere manier gemonteerd worden.

Zowel processtoom als verwarming worden als warmtetoepassing gegeven in *Tabel 21* voor een warmte-producerende installatie en voor een WKK-installatie. In totale investeringskost geeft dit geen verschil. Het aantal draaiuren verschilt echter wel, bij een verwarming als warmtetoepassing is 4000 uren en 7000 draaiuren voor processtoom. Deze draaiuren hebben wel een invloed op de jaarlijkse werkingskosten.

Het hout in de co-verbrandingsinstallatie wordt meegestookt. Het hout wordt apart vernalen en met aparte branders in de kolencentrale opgestookt. De *additionele* productiekost is gebaseerd op *Tabel 19* met 10% meestook.

De installaties die warmte/stoom produceren, de WKK-installaties en de ‘fuel dedicated’ elektriciteitscentrale hebben recht op ecologiesteun. Voor warmte/stoom producerende verbrandingsinstallaties en WKK-installaties is deze ecologiesteun berekend als 35% (nieuwe tarieven waarschijnlijk geldig vanaf 1 januari 2004) van de meerkost van de investering ten opzichte van een klassieke gasketel. De ecologiesteun voor de ‘fuel dedicated’ centrale is berekend als 35% van de meerkost ten opzichte van een klassieke STEG-centrale. Elektriciteitsproductie door middel van co-verbranding komt niet in aanmerking voor ecologiesteun.

De warmte/stoomprijs is 0.03 €/kWh, berekend zoals beschreven in paragraaf 4.04.4.1. Voor zowel de WKK- als de mono-verbrandingsinstallatie wordt als elektriciteitsprijs de grijze en

groen stroom gerekend (0.094 €/kWh). Voor de co-verbrandingsinstallatie werd enkel de groene stroomprijs als elektriciteitsprijs gerekend (0.074 €/kWh).

Voor de WKK-installatie is de opbrengst van de WKK-certificaten berekend. Deze berekening gebeurt zoals beschreven staat in het ontwerpbesluit ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de relatief primaire energiebesparing (6%, zie *Tabel 21*) en de hoeveelheid geproduceerde energie per jaar. Een WKK-installatie krijgt gedurende de eerste 4 jaar WKK-certificaten voor elke MWh dat bespaard wordt. Na het vierde jaar wordt slechts een bepaald percentage als certificaat aanvaard. Dit daalt elk jaar en wordt uiteindelijk nul. Voor deze WKK-installaties met een afschrijvingstermijn van 15 jaar, werd de gemiddelde opbrengst per kWh elektriciteit berekend over 15 jaar (zie bijlage 4).

De verschillende installaties worden voorgesteld in een grafiek van dimensieloze kosten (*Figuur 42*). Voor de WKK-installatie worden de extra-kosten die nodig zijn om elektriciteit op te wekken in relatie gezet met de opbrengst van de elektriciteit (idem *Figuur 40* en *Figuur 41*).

Tabel 21: Gegevens voorbeelden

	Eenheden	Warmte	Stoom	WKK (warmte)	WKK (stoom)	Mono- verbranding	Co- verbranding
Input	MW	10	10	10	10	10	10 (bijstook)
Thermische efficiëntie	%	85	80	65	65	-	-
Elektrische efficiëntie	%	-	-	15	15	25	38
RPEB	%	-	-	6	6	-	-
Warmteproductie	MW _{th}	8.5	8	6.5	6.5	-	-
Elektriciteitsproductie	MW _{el}	-	-	1.5	1.5	2.5	3.8
Draaiuren	h/jaar	4000	7000	4000	7000	7000	7000
Stoom/Warmte per jaar	MWh	34 000	56 000	26 000	45 500	-	-
Groenestroom per jaar	MWh	-	-	6 000	10 500	17 500	26 600
Brandstofkost	€/kWh _{br}	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
Investeringsprijs	€	4 095 000	4 095 000	6 760 000	6 760 000	6 760 000	1 900 000
Ecologiesteun	€	1 282 500	1 292 250	2 252 250	2 252 250	2 016 000	-
Investeringsprijs-Ecologiesteun	€	2 812 500	2 802 750	4 507 750	4 507 750	4 744 000	1 900 000
Werkingskost/jaar	€/jaar	495 822	689 938	586 136	748 050	748 050	53 200
Productiekost per kWh	€/kWh	0.0243	0.0182	0.1800	0.1166	0.0931	0.0081
Warmteprijs	€/kWh _{th}	0.03	0.03	0.03	0.03	-	-
Stroomprijs	€/kWh _e	-	-	0.094	0.094	0.094	0.074
WKK-certificaten gemiddeld jaarlijkse opbrengst	€/jaar	-	-	31 521	55 162	-	-
WKK-certificaten gemiddelde opbrengst per kWh	€/kWh	-	-	0.005	0.005	-	-
Gemiddelde opbrengst stroom	€/kWh	-	-	0.099	0.099	0.094	0.074

Uit *Figuur 42* komt naar voor dat een installatie die processtoom produceert gedurende 7000 h per jaar met als brandstof behandeld verontreinigd hout, economisch haalbaar is. Op de grafiek ligt dit punt onder de rechte van 80% totale efficiëntie. Dezelfde installatie die slechts 4000 h per jaar draait omdat de warmtetoepassing een verwarmingssysteem is, is economisch niet meer haalbaar. Een daling van de brandstofkost (brandstofkost < 0.005 €/kWh) kan de situatie keren tot een positieve scenario. Een stijgende warmtevergoeding (warmtevergoeding > 0.0314 €/kWh) kan ook soelaas brengen, zoals ook een dalende productiekost (productiekost < 0.0229 €/kWh). Een stijgende warmtevergoeding kan voorkomen als gevolg van een stijging in fossiele brandstofprijzen en/of een bijkomende vergoeding van de overheid vb. groene warmte. Een lagere productiekost wordt bekomen door een groter aantal draaiuren (zoeken naar andere of bijkomende warmtetoepassingen) of geen investering meer in een volledige rookgasreiniging. Bij deze laatste maatregel zal dan wel een stijging van de houtprijzen moeten in rekening gebracht worden.

Voor de WKK-installatie is de bijkomende productiekost van elektriciteit uitgezet ten opzichte van de elektriciteitsprijs. Zowel voor een WKK-installatie met processtoom, als voor verwarming als warmtetoepassing (7000 h/4000 h draaiuren), blijkt dat de bijkomende vergoeding voor elektriciteit de bijkomende productiekost niet dekt (zowel 'WKK-stoom' als 'WKK warmte' liggen boven de lijn van 15% elektrische efficiëntie). Dit komt omdat slechts een deel van de stoomproductie in een WKK gebruikt wordt voor elektriciteitsproductie waardoor de extra-productiekost per kWh te groot wordt. Voor een WKK-installatie met verwarming als warmtetoepassing met 4000 draaiuren is de situatie nog slechter dan bij 7000 draaiuren (processtoom). Deze WKK-installatie op houtafval als energetisch meest optimale oplossing, heeft bijgevolg een bijkomende stimulans nodig. Hiervoor zijn WKK-certificaten door de overheid als mogelijk oplossing naar voor geschoven. De vraag rijst echter of de WKK-certificaten dit kunnen compenseren. WKK-certificaten worden gegeven per MWh primaire energiebesparing. Het totale bedrag dat verkregen wordt aan WKK-certificaten houdt een verhoging van de warmte of elektriciteitsvergoeding in. In dit voorbeeld is er voor gekozen het totale bedrag te verdelen over de elektriciteitsproductie. In *Figuur 42* is er een lichte verschuiving te zien van de punten 'WKK-stoom' naar 'WKK-stoom cert.' en van 'WKK-warmte' naar 'WKK-warmte cert.' richting schuin links beneden zoals te verwachten bij een verhoging van de stroomvergoeding. De vergoeding is echter niet voldoende om tot een positieve economische situatie te komen. Enkel indien de totale stroomvergoeding boven de 0.1566 €/kWh zou stijgen kan het tij gekeerd worden.

Zoals uit *Figuur 41* ook al bleek, is de belangrijkste vereiste om tot een economisch gunstige situatie te komen bij een kleinschalige WKK-installatie een daling in productiekost. In dit voorbeeld heeft ecologiesteun al een eerste stap gezet maar nog niet genoeg om tot een positief scenario te komen. Een andere mogelijke oplossing om tot een economisch betere situatie te komen, zeker voor de WKK-installatie met een verwarmingssysteem als warmtetoepassing, is de installatie in de zomer (geen nood aan warmte) als louter elektriciteitscentrale te laten draaien en zo meer groenestroomcertificaten te genereren. Wanneer voor deze optie wordt gekozen is het echter zo goed als zeker dat er geen aanspraak meer kan gemaakt worden op WKK-certificaten aangezien dan de 5% relatief primaire energiebesparing berekend over een heel jaar niet meer gehaald wordt. De groenestroomcertificaten compenseren dit verlies echter zeer snel.

Een laatste feit dat af te lezen is uit *Figuur 42* is het verschil in economische haalbaarheid van mono-verbranding elektriciteitsproductie ten opzichte van co-verbranding. Voor elektriciteitsproductie in een ‘fuel dedicated’ centrale is de volledige productiekost uitgezet ten opzichte van de volledige opbrengst van elektriciteit en dit komt niet positief uit (‘mono-verbranding’ ligt boven de rechte met elektrische efficiëntie 25%). Een daling in productiekost, een daling van brandstofkost of een stijging van stroomvergoeding kan leiden tot een gunstige economische situatie. Een stijging in stroomprijs is een reële optie aangezien de groenestroomcertificaten in de komende jaren (tot 2006) nog zullen stijgen en deze stijging is voldoende om tot een economisch gunstige situatie te komen. De situatie voor co-verbranding is totaal anders en geeft een zeer positief beeld. Het punt ‘co-verbranding’ ligt onder de rechte van 38% elektrische efficiëntie. Hier is echter wel de *additionele* productiekost uitgezet ten opzichte van de additionele groene stroomprijs.

4.4.1 Besluit

In hoofdstuk 3.3 wordt volgende volgorde van meest optimale energetisch benutting bekomen:

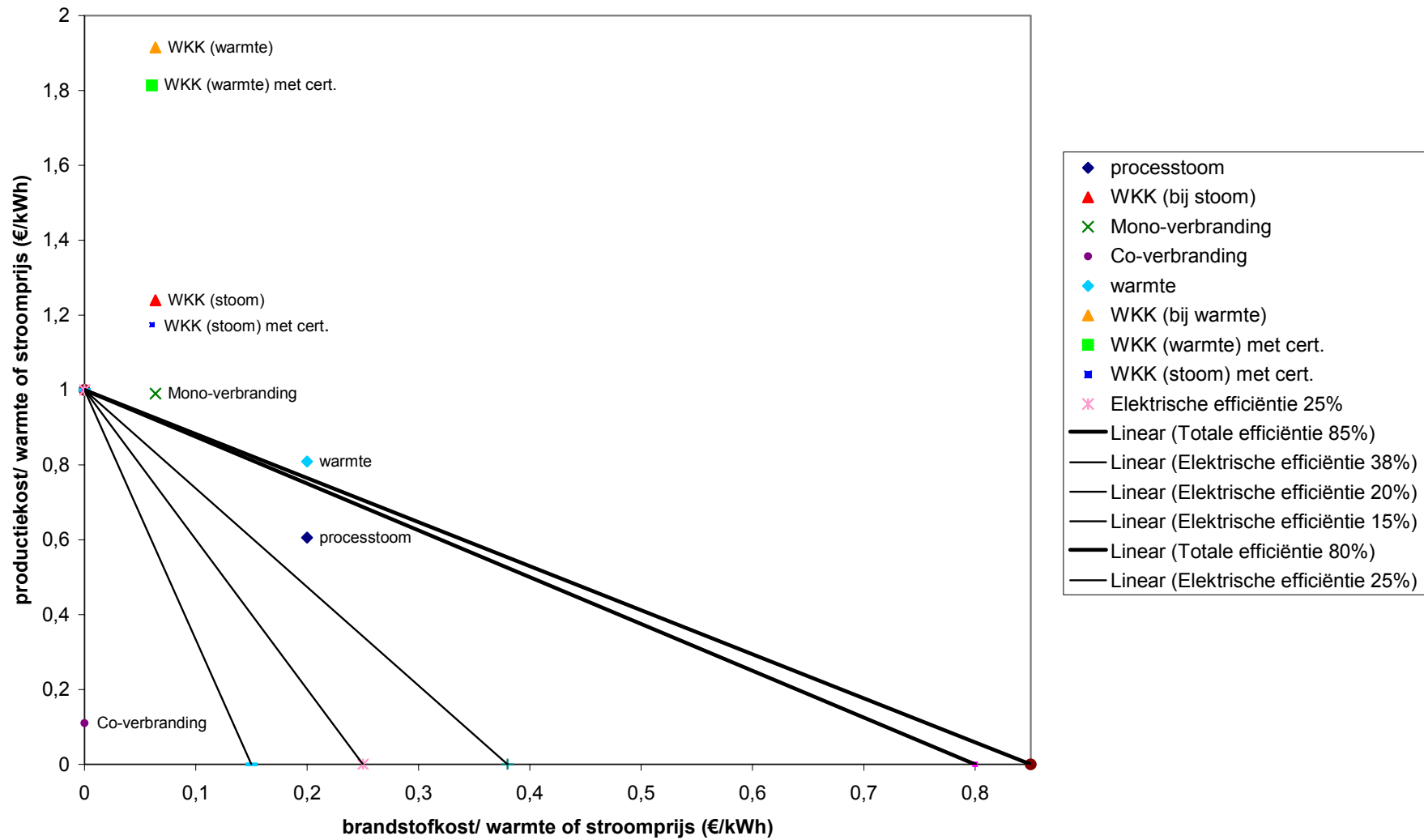
WKK >
 proceswarmte >
 elektriciteit (co-verbranding) >
 elektriciteit (mono-verbranding)

Wanneer een zelfde rangorde wordt gemaakt volgens economische haalbaarheid, wordt volgende volgorde bekomen:

elektriciteit (co-verbranding) >
 processtoom > warmte >
 elektriciteit (mono-verbranding) >
 WKK (stoom) > WKK (warmte)

Wanneer deze twee vergeleken worden blijkt duidelijk dat WKK het meest nood heeft aan stimulerende maatregelen aangezien dit energetisch het meest optimaal is, maar economisch de duurste oplossing.

Uit dit voorbeeld, maar ook uit andere voorbeelden met biogas door Vito berekend, blijkt elke keer dat de groenestroomcertificaten de belangrijkste economische drijfveer van een installatie zijn. Dit heeft als gevolg dat er gekozen wordt voor een installatie met maximale elektriciteitsproductie ten nadele van een WKK-installatie zelfs indien er zich mogelijkheden voor WKK voordoen. De WKK-certificaten hebben slechts een zeer beperkte invloed op het financieel kader en terugverdientijd ten eerste omdat de prijs van een certificaat lager zal liggen dan voor een groenestroomcertificaat, ten tweede omdat het geldig is voor een hoeveelheid bespaarde energie en niet op de hoeveelheid geproduceerde energie en ten derde omdat de WKK-certificaten slechts beperkt zijn in tijd.



Figuur 42: Diagram dimensieloze kosten voor verschillende voorbeelden met 10 MW input

4.5 Besluit

In een diagram van dimensieloze kosten kan een eerste inschatting gemaakt worden van de economische situatie van houtverbrandingsinstallatie. Belangrijke parameters hierbij zijn de productiekost (kapitaalkost + werkingskost), de brandstofkost en de vergoeding voor warmte of stroom.

De verschillende mogelijkheden voor energetische valorisatie van houtafval werden uitgezet in dit diagram van dimensieloze kosten. Bij de productie van warmte en/of stoom bleek voornamelijk het aantal draaiuren per jaar cruciaal te zijn voor economisch haalbaar te zijn. Bij elektriciteitsproductie door co-verbranding is de brandstofkost een belangrijke parameter aangezien in de brandstofkost ook de verzamel- en transportkosten verrekend zijn. Elektriciteitsproductie in een 'fuel dedicated' centrale en een WKK-installatie zijn in de gegeven omstandigheden economisch ongunstig. Zelfs met maatregelen die door de overheid genomen zijn zoals ecologiesteun, groenestroomcertificaten en WKK-certificaten leidt dit nog niet naar gunstige scenario's. Bij 'fuel dedicated' elektriciteitscentrales kan een lichte stijging van de groenestroomprijs, een daling van de brandstofprijs of een daling in productiekost het tij al keren. Een verder stimulering van 'fuel dedicated' elektriciteitscentrales op basis van houtafval is evenwel niet gerechtvaardigd omwille van de lage energetische efficiëntie van dergelijke installaties. Voor WKK-installaties brengt enkel een daling in productiekost (mogelijk bij hogere vermogens) of een serieuze stijging in stroomvergoeding een oplossing.

Om de energetisch meest optimale oplossing (WKK) te stimuleren zijn reeds verschillende stappen in de goede richting gezet maar is het financiële plaatje nog niet rond. Aan de kostprijs van technologie en met de ondersteunende maatregelen zal moeten gesleuteld worden om hier verandering in te brengen.

5 SITUATIE EN POTENTIEEL VOOR ENERGETISCHE VALORISATIE VAN HOUTAFVAL IN VLAANDEREN

5.1 Aanbod van houtafval in Vlaanderen

De afvalstroom houtafval wordt in het houtafvalplan in volgende stromen opgedeeld:

- Houtafval van secundaire verwerking: plaatproductie, houtveredeling;
- Houtafval van de eindverwerking: productie van meubels, verpakkingen, constructiehout;
- Houtafval van bedrijven: bouw-en sloophout, verpakkingen, meubilair;
- Houtafval van huishoudens: bouw- en sloophout, meubilair, tuinhout.

De eerste twee stromen worden samengenomen als productieafval van de houtverwerkende industrie.

5.1.1 Productieafval van houtverwerkende industrie

De gezamenlijke jaarlijkse afvalproductie van de secundaire verwerking en de eindverwerking van hout kan volgens de meldingsgegevens beschikbaar bij de OVAM op 350.000 ton geschat worden, met een maximum van 500.000 ton. Hiervan zou ca. 100.000 tot 150.000 ton verbrand worden. De overige hoeveelheid gaat hoofdzakelijk naar recyclage. Bepaalde stromen worden door de houtverwerkende bedrijven dikwijls niet als afvalstof aangeduid en deze worden dan ook niet gemeld. De werkelijk geproduceerde hoeveelheid zal de maximum geschatte hoeveelheid dus overschrijden.

Hiernaast dienen ook de kleinere bedrijven in rekening gebracht te worden. Volgens RSZ-gegevens waren er in Vlaanderen 1.543 bedrijven met tewerkstelling actief in de houtverwerkende nijverheid in 2000. Dit aantal omvat zagerijen, de producenten van spaanplaten, de meubelindustrie, de producenten van bouwelementen, van verpakkingen, van borstels, enz.

Schattingen van een grote constructeur van industriële verbrandingsinstallaties voor houtafval geven aan dat er in Vlaanderen 400.000 ton houtafval verbrand wordt.

Op basis van de hierboven geformuleerde overwegingen, schat de OVAM de werkelijk geproduceerde hoeveelheid houtafval op minimaal 740.000 ton, waarvan circa 75% afkomstig is van de secundaire verwerking van hout (plaatmateriaalindustrie, houtveredeling) en 25% van de eindverwerking van hout (productie van pallets, constructies, meubels, enz....).

Houtafval uit deze sector wordt in grote mate intern ingezameld en gerecycleerd. Het wordt gebruikt als grondstofvervanger in het productieproces of het wordt als brandstof verbrandt in hun eigen installatie, voor de verwarming van gebouwen of opwarming van installaties.

5.1.2 Houtafval van bedrijven

Bouw-en Sloophout:

In 2000 waren in Vlaanderen 2.567 bedrijven met tewerkstelling actief in de schrijnwerkerij afzonderlijk vermeld door de RSZ. Volgens de bouwfederatie zijn er in totaal met de zelfstandige ondernemingen (éénmanszaken) bijgerekend circa 8.000 schrijnwerkerijen.

Er wordt verondersteld dat de bouw- en sloopsector de grootste producent is van houtafval in de industriële sector van eindgebruikers. In het Uitvoeringsplan Bouw- en Sloopafval schat men de in 1995 geproduceerde hoeveelheid sloophout op ongeveer 90.000 ton/jaar. Er zijn geen concrete cijfers over de hoeveelheid sloophout die vandaag vrijkomt, maar OVAM is van oordeel dat het waarschijnlijk een veelvoud is van de in het Uitvoeringsplan geschatte hoeveelheid en hanteert cijfers tussen de 150.000 ton en 250.000 ton per jaar.

Verpakkingen:

Van de totale hoeveelheid houtafval (circa 200.000 ton/jaar) van bedrijfssectoren die jaarlijks gemeld worden aan de OVAM, bestaat drie vierde uit verpakkingsafval.

Houten meermalige paletten vormen veruit de belangrijkste fractie van het verpakkingshout. Slechts 15 à 20% van het verpakkingshout bestaat uit kisten. Deze kisten worden soms hergebruikt, echter niet hersteld.

De terugnameplicht volgens het Interregionaal Samenwerkingsakkoord Verpakkingsafval, geldt ook voor houten verpakkingsafval, en dus ook voor paletten.

Volgens cijfers van Val-I-Pac, hebben haar leden in 1999 ongeveer 105.000 ton houten verpakkingsafval op de markt gebracht. Meermalige houten paletten zijn hierin niet vervat. De cijfers betreffen als dusdanig voornamelijk eenmalige houten paletten. Van de hoeveelheid die op de markt werd gebracht, zou in 1999 70.000 ton zijn ingezameld en nuttig toegepast (35.000 ton hergebruikt voor herstellingen, 35.000 ton gerecycleerd of verbrand met energierecuperatie).

Van de meermalige houten paletten, wordt ongeveer 95% ingezameld voor recuperatie. De 5% restafval wordt vermalen en wordt afgevoerd naar de spaanplaatindustrie.

Volgens Febelhout komt jaarlijks in totaal ongeveer 160.000 ton verpakkingshout vrij.

5.1.3 Houtafval van huishoudens

Houtafval van huishoudens wordt gecentraliseerd op de containerparken of wordt opgehaald via grofvuil. Het bestaat voornamelijk uit afgedankte, niet-herbruikbare meubels, tuinhout en houtafval van sloop- en bouwactiviteiten.

De databank inzameling huisvuil en KGA van OVAM geeft aan dat in 2001 ongeveer 125.000 ton houtafval selectief werd ingezameld op containerparken. Hier moet echter nog het aandeel boomstronken afgetrokken worden aangezien dit niet valt onder houtafval. Dit aandeel schommelde rond de 22% in 1999 en 2000. Een totaal van ongeveer 97.000

houtafval is van huishoudens afkomstig. Hierbij moet nog de hoeveelheid afvalhout geteld worden dat binnen de huishoudens verbrand wordt. Op basis van een enquête van het Vito in 2001 in het kader van de studie ‘Emissies van dioxines en PAK’s door gebouwenverwarming met vaste brandstoffen”, wordt deze hoeveelheid hout geschat op ongeveer 99.522 ton behandeld houtafval.

Op basis van sorteeranalyses van grof huisvuil van 1998 en 1999 blijkt dat 24.3% van het grofvuil bestaat uit hout. Van dit aandeel is 10% herbruikbaar en 30% recycleerbaar. In 1998 betekende dit dat ca. 76.500 ton houtafval naar verwerking kon (recycleren en thermische verwerking).

Tabel 22: Aanbod houtafval van huishoudens (ref. 12)

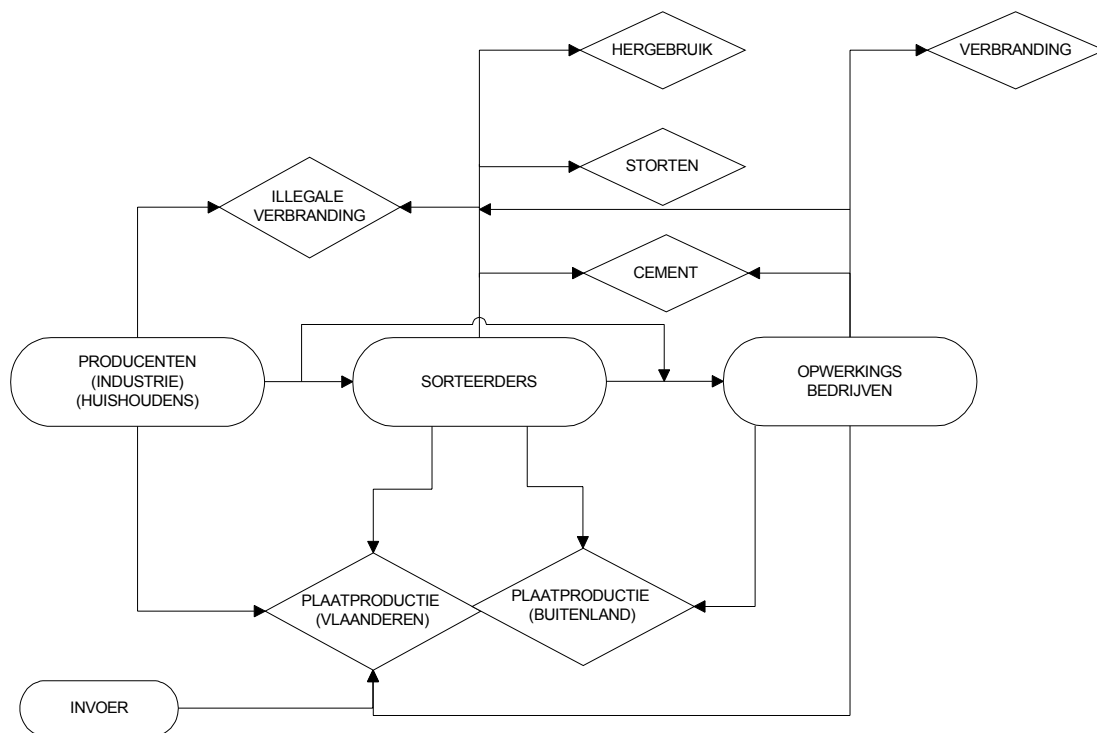
Fractie	Hoeveelheid (ton)
Selectief ingezameld op containerparken	97.886
Onderdeel van grofvuil (excl. potentieel hergebruik)	24.152
Houtafvalverbranding bij huishoudens	99.522
TOTAAL	221.560

5.2 Vlaamse verwerkingscapaciteit voor houtafval

Voor het verwerken van houtafval bestaan verschillende mogelijkheden:

- Hergebruik, al dan niet herstelling
- Materiaalrecyclage
- Thermische verwerking
- Storten

In onderstaande figuur worden de verschillende verwerkingswijzen en hun onderlinge relatie weergegeven.



Figuur 43: Overzicht inzamel- en verwerkingsstructuur van houtafval (ref. 12)

5.2.1 Hergebruik

Hergebruik gebeurt momenteel voornamelijk bij paletten. Verder worden ook bekistingen in de bouwsector hergebruikt alsook stellingenhout en dwarsliggers.

De onderstaande tabel geeft een beeld van de diverse verwerkingwijzen van houten verpakkingsafval:

Tabel 23 Verwerking houten verpakkingsafval in 2001 in België (ref. 12)

Verwerkingwijze	Hoeveelheid (ton)	Percentage
Verbranding als onderdeel van restafval	3.479	4
Herstelling	40.404	41
Spaanplaatproductie (al dan niet met voorbehandeling)	43.655	44
Verbranding als monostroom	11.087	11
TOTAAL	98.625	

Ook spoorwegdwarsliggers worden hergebruikt. Het merendeel van gebruikte houten spoorwegdwarsliggers wordt opgekocht door groothandelaars, die ze ophalen voor hergebruik in industriesporen of verkopen aan tuincentra (hergebruik als

infrastructuurmateriaal voor tuinaanleg) of aan landbouwers voor gebruik als weidepalen en dit zowel in binnen- als buitenland. Vanzelfsprekend komen de dwarsliggers in een latere fase in het afvalstadium terecht, meestal bij het grof huisvuil of sloopafval.

Een deel van het houtafval van bouw- en sloopactiviteiten kan worden hergebruikt. Het gaat hier bij bouwactiviteiten vooral om stellingmaterialen (balken, planken). Bij sloopactiviteiten houden de sloopbedrijven vaak zoldering- en schouw balken (die als sierbalken worden hergebruikt) apart.

5.2.2 Materiaalrecyclage

Er zijn drie belangrijke manieren om houtafval te recyclen. Veruit de belangrijkste bestemmingen van houtafval zijn de spaanderplatenindustrie en de papierproductie. Daarnaast wordt onbehandeld houtafval ook nog in mindere mate gerecycleerd als structuurmateriaal in composteringsinstallaties. Schattingen van VLACO spreken over een jaarlijkse hoeveelheid van 5.000 ton (voornamelijk pallethout) dat naar compostering gaat.

De toepassing van houtafvalstromen in de spaanderplaatindustrie als vervanging voor de primaire grondstof (rondhout) wint aan belang, en de plaatmateriaalsector heeft zich daar de laatste jaren dan ook op ingesteld. Ongeveer 40 à 50 % van het houtafval uit de Vlaamse houtverwerkende industrie is bestemd voor recyclage. Ook uit het buitenland wordt recycling hout aangevoerd, voornamelijk voor de spaanplaatindustrie. Dit recycling hout moet voldoen aan de RAL-voorschriften, waaronder maximale concentraties van een aantal zware metalen, halogenen, benzo(a)pyreen (elementen karakteristiek voor houtverduurzaming). Dit te recycleren houtafval bestaat vooral uit houtkrullen en – spaanders en houtstukken.

De volgende afvalstromen worden verwerkt:

- Zaagsel en houtkrullen;
- Resthout (stukken houtafval van zagerijen en schrijnwerkerijen);
- Recyclagehout (verpakkingsafval, bouw- en sloophout, ...).

Het recyclagehout, een mengsel van onbehandeld en niet gevaarlijk behandeld hout, wordt via opwerkingsbedrijven aan de spaanderplatenfabrieken geleverd. Opwerkingsbedrijven voeren een doorgedreven sortering en zuivering uit op selectief ingezameld houtafval.

5.2.3 Thermische verwerking

Een belangrijke hoeveelheid afvalhout wordt thermisch verwerkt. Verschillende types van verbrandingsinstallaties worden hiervoor gebruikt.

In de Vlaamse industrie zijn volgens de gegevens van de OVAM een 240-tal kleine en middelgrote stookinstallaties voor de verbranding van onbehandeld en niet-gevaarlijk behandeld afvalhout vergund. De op deze manier verwerkte hoeveelheid wordt door de OVAM geschat op 120.000 ton/jaar. Houtafval van de houtverwerkende industrie wordt, volgens de meldingsgegevens van de OVAM, voor ca. 30 à 40 % verbrand met het oog op gebouwenverwarming of het opwekken van productiewarmte of –stoom.

Houtafval als deel van gevaarlijk bedrijfsafval kan ook in bepaalde huisvuilverbrandingsinstallaties verwerkt worden. De roosterovens in Vlaanderen kunnen dit verwerken op voorwaarde dat de calorische waarde van de input beperkt wordt tot 10.000-12.000 kJ/kg. Hoogcalorisch vast afval, zoals hout kan daarom enkel verwerkt worden na bijmenging met laag-calorisch afval.

Co-verbranding in elektriciteitscentrales wordt steeds meer toegepast met de invoering van groenestroomcertificaten. Electrabel verbrandt jaarlijks 40.000 à 50.000 ton houtstof in de centrale te Ruien. In de loop van 2003 is eveneens een houtvergasser met een capaciteit van 100.000 à 130.000 ton/jaar in dienst getreden. Aangezien de centrale nog niet is uitgerust met een natte gaswasser dient zij zich te beperken tot onbehandeld of niet verontreinigd behandeld houtafval.

In de nabije toekomst wordt in de centrale van Langerlo eveneens de meestook van 40.000 à 50.000 ton houtafval voorzien. Aangezien deze centrale reeds is uitgerust met een deSO_x en deNO_x, is de bijstook van verontreinigd houtafval mogelijk. De beperking van zware metalen (vanwege houtverduurzamingsmiddelen) moeten wel nog in acht genomen worden bij het meestoken van dit houtafval.

De binnen- en buitenlandse cementindustrie en slibconditioneringsbedrijven zijn eveneens afnemers van houtafval van de houtverwerkende industrie. De jaarlijks afgezette hoeveelheid bedraagt ca. 50.000 ton en bestaat voornamelijk uit zeefstof, fijn zaagsel van plaatmaterialen en fijne fractie van recyclagehout. Dit houtafval wordt eerst bij conditioneringsbedrijven opgemengd met vloeibare, gevaarlijke afvalstoffen zoals verven en solventen, zodat deze gemakkelijker gevoed kunnen worden in de cementoven. Steenbakkerijen gebruiken zaagsel of fijne fractie van recyclagehout om poreuze stenen te produceren of om stenen een bepaald uitzicht te geven. Er wordt 1 à 7 % houtafval toegevoegd aan de grondstoffen.

Illegale verbranding door bedrijven kan moeilijk gekwantificeerd worden.

Sedert medio 2000 wordt ook in toenemende mate gemengd houtafval uitgevoerd naar Duitse en Zweedse verbrandingsinstallaties. De afvoer van houtafvalstromen naar installaties die aan energieopwekking doen (bedrijfsgebonden energieopwekking, elektriciteitsproductie) neemt toe onder invloed van binnen- en buitenlandse regels ter bevordering van het opwekken van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen. In 2001 werd er ca. 10.000 ton gemengd houtafval uitgevoerd voor verbranding.

5.2.4 Storten

Bepaalde stortplaatsen in Vlaanderen gebruiken verkleind (selectief ingezameld) houtafval om de toegankelijkheid van de stortplaats te verbeteren. Dit houtafval wordt gestort voor een tarief van ca. 25 euro/ton, waarbij de stortexploitanten het tarief van verminderde milieuheffing aanrekenen voor het storten als recyclageresidu, hoewel het om een mengsel van houtafvalsoorten gaat dat louter mechanisch behandeld werd en niet afkomstig is van een sorteerhandeling met het oog op recyclage.

In 1998 werd ca. 3.300 ton op deze wijze gestort, en in 1999 ca. 8.900 ton.

Volgens Vlarem II is storten van brandbaar afval sinds midden 2000 in principe niet meer toegestaan. Storten van houtafval is daarom alleen nog mogelijk mits het bekomen van een uitzondering (OVAM) en zal op termijn uitdoven.

5.3 Prognoses van aanbod en verwerking van houtafval in Vlaanderen

Om een idee te krijgen van de bestemming van houtafval werd in de loop van 1999 en 2000 door de OVAM een enquête uitgevoerd bij de 42 voornaamste containerfirma's in het Vlaamse gewest. In de onderstaande tabel worden de resultaten weergegeven.

Tabel 24: Verwerkingswijze van houtafval bij 42 containerbedrijven in het Vlaamse gewest (ref. 12)

Verwerkingswijze	%
Spaanderplaatbedrijven in Vlaanderen	51
Spaanderplaatbedrijven in het buitenland	26
Cementindustrie	4
Verbranding	10
Storten	5
Meegeven met particulieren	4

In het totaal werd 77% van het afgevoerde houtafval verwerkt in binnen- of buitenlandse spaanderplaatbedrijven. 14 % werd afgevoerd naar verbrandingsinstallaties of cementindustrie, 5 % werd afgevoerd naar stortplaatsen en 4 % van het houtafval werd meegegeven met particulieren.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de huidige en de te verwachten capaciteit voor de verwerking in Vlaanderen van houtafval, al dan niet geproduceerd in Vlaanderen. In deze tabel wordt houtafval van de primaire houtverwerking, dat verwerkt wordt in de spaanderplaatindustrie, wel vermeld, maar deze afvalstroom valt niet onder het toepassingsgebied van deze studie.

Tabel 25: Huidige Vlaamse verwerkingscapaciteit voor houtafval in ton/jaar in 2002(ref. 12)

2002	Onbehandeld houtafval uit de primaire houtverwerking	Niet-verontreinigd houtafval*	Verontreinigd houtafval
Energetische valorisatie			
Energiesector	0	40.000	0
Houtsector	Inbegrepen in 400.000 ton	400.000	
Materiaalrecyclage	957.419	872.937	?
TOTAAL	957.419	1.312.937	?

* onbehandeld houtafval en behandeld houtafval, eventueel opgewerkt, dat voldoet aan de aanvaardingscriteria voor materiaalrecyclage, maar niet afkomstig van de primaire houtverwerking.

De 40.000 ton energetische valorisatie in de energiesector is de bijstook van onbehandeld houtafval (houtstof) in de centrale van Ruien. De hoeveelheid houtafval voor materiaalrecyclage is de som van de verwerkte hoeveelheid houtafval in alle Vlaamse spaanderplaatbedrijven.

Tabel 26 geeft de te verwachten verwerkingscapaciteit in 2008 op basis van de geplande initiatieven van de spaanderplatenindustrie en de elektriciteitsproducenten.

Tabel 26 Vlaamse verwerkingscapaciteit van houtafval in ton/jaar in 2008(ref. 12)

2008	Onbehandeld houtafval uit de primaire houtverwerking	Niet-verontreinigd houtafval*	Verontreinigd houtafval
Energetische valorisatie			
Energiesector		90.000	270.000
Houtsector	Inbegrepen in 400.000 ton	400.000	
Materiaalrecyclage	870.000	1.238.000	0
TOTAAL	870.000	1.728.000	270.000

*onbehandeld houtafval en behandeld houtafval, eventueel opgewerkt, dat voldoet aan de aanvaardingscriteria voor materiaalrecyclage, maar niet afkomstig van de primaire houtverwerking.

Een overzicht van de verschillende stromen en hun verwerkingswegen wordt gegeven in Tabel 27 en Tabel 28. Twee scenario's werden ontwikkeld in het houtafvalplan van de OVAM om een zicht te krijgen op de effecten die de uitvoering van de in het plan voorgestelde maatregelen en acties hebben op het aanbod en de verwerking van houtafval.

Het Passief scenario geeft aan hoe de situatie inzake houtafval evolueert bij het huidige beleid. Het Duurzaamheidsscenario houdt rekening met de effecten die veroorzaakt worden door de uitvoering van acties en maatregelen van het ontwerp Uitvoeringsplan Houtafval.

Tabel 27 Prognose evolutie houtafval bij het Passief scenario (ref. 12)

Passief scenario

	Totale hoeveelheid	Hergebruik/ materiaal- recyclage	Energetische valorisatie binnen houtsector	Energetische valorisatie buiten houtsector	Verbranding in huisvuilverbrand- ingsinstallatie Storten	Illegale verbranding bij particulieren
2001						
Houtafval	1.456	668	400	127	35	105
Houtsector	820	350	400	70		
Eindgebruikers (selectief ingezamelde fractie)	407	313	0	93	0.5	20
Huishoudens	97	74		14		5
Industriële sectoren	310	239	0	43	0	16
Eindgebruikers (niet selectief ingezamelde fractie)	225	5	0	0	35	85
Huishoudens	125	5			15	5
(houtafval in grofvuil en illegale verbranding)						100
Industriële sectoren	100				20	80
(houtafval in ambachtelijk afval)						
2008						
Houtafval	1.659	619	384	332	72	135
Houtsector	960	300	384	276		
Eindgebruikers (selectief ingezamelde fractie)	407	313	0	57	0	21
Huishoudens	97	74		14		5
Industriële sectoren	310	239	0	43	0	16
Eindgebruikers (niet selectief ingezamelde fractie)	292	6	0	0	72	114
Huishoudens	157	6			45	6
(houtafval in grofvuil en illegale verbranding)						100
Industriële sectoren	135				27	108
(houtafval in ambachtelijk afval)						

Tabel 28: Prognose evolutie houtafval bij Duurzaamheidsscenario (ref. 12)

Duurzaamheidsscenario

	Totaal	Hergebruik/ recyclage	Energetische valorisatie binnen de houtsector	Energetische valorisatie buiten houtsector	Verbranding in huisvuilverband- ingsinstallatie	Storten	Illegale verbranding bij particulieren
2001							
Houtafval	1.456	668	400	127	35	105	116
Houtsector	820	350	400	70			
Eindgebruikers (selectief ingezamelde fractie)	407	313	0	57	0	21	16
Huishoudens	97	74		14		5	4
Industriële sectoren	310	239	0	43	0	16	12
Eindgebruikers (niet selectief ingezamelde fractie)	225	5	0	0	35	85	100
Huishoudens	125	5			15	5	100
(houtafval in grofvuil en illegale verbranding)							
Industriële sectoren	100				20	80	
(houtafval in ambachtelijk afval)							
2008							
houtafval	1591	734	400	350	87	0	20
houtsector	930	440	400	90			
Eindgebruikers (selectief ingezamelde fractie)	554	294	0	260	0	0	0
Huishoudens	177	85		92			
Industriële sectoren	377	209	0	168	0	0	
Eindgebruikers (niet selectief ingezamelde fractie)	107	0	0	0	87	0	20
Huishoudens	60				40	0	20
(houtafval in grofvuil en illegale verbranding)							
Industriële sectoren	47				47	0	
(houtafval in ambachtelijk afval)							

5.4 Technisch potentieel voor energetische valorisatie

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de hoeveelheid houtafval die ter beschikking was, respectievelijk zal zijn, voor energetische valorisatie in 2001, respectievelijk in 2008. Voor 2001 en 2008 wordt het maximale potentieel gegeven voor zowel elektriciteit, warmte als WKK d.w.z. indien alle houtafval enkel naar elektriciteit respectievelijk warmte of WKK zou omgezet worden. Voor 2001 wordt ook de huidige productiecapaciteit voor houtafval in Vlaanderen weergegeven voor de verschillende stromen.

Een inschatting van de verdeling van het houtafval voor productie van elektriciteit, warmte of WKK is hier niet gegeven, enkel een maximale inschatting indien de totale hoeveelheid houtafval naar elektriciteits- OF warmte-productie OF WKK-productie zou gaan. De marktwerking zal moeten uitwijzen hoeveel houtafval naar elk zal gaan.

Tabel 29: Overzicht van de huidige en potentiële energetische valorisatie mogelijk met houtafval dat in Vlaanderen ter beschikking is.

Energetische valorisatie	Hoeveelheid [ton/jaar]	Elektriciteit [GWh/jaar]		Warmte [GWh/jaar]		WKK [GWh/jaar]	
		Potentieel ⁽¹⁾	Huidige productie	Potentieel ⁽¹⁾	Huidige productie	Potentieel ⁽¹⁾ elektriciteit	Potentieel ⁽¹⁾ warmte
2001							
Binnen houtsector°	400.000	450	-	1333	(1333) ⁽³⁾	133	917
Buiten houtsector°	127.000	143	11	423	(167) ⁽⁴⁾	79	344
Afvalverbranding°	35.000	29	5,23 ⁽²⁾	116	4,34 ⁽²⁾	12	80
Totaal	562.000	622	75,23	1872	1504,34	224	1341
2008		Potentieel ⁽¹⁾		Potentieel ⁽¹⁾		Potentieel ⁽¹⁾ elektriciteit	Potentieel ⁽¹⁾ warmte
Passief scenario							
Binnen houtsector°	384.000	432		1280		128	880
Buiten houtsector°	332.000	374		1107		208	899
Afvalverbranding°	72.000	60		240		24	165
Totaal	788.000	866		2627		360	1944
Duurzaamheidsscenario scenario							
Binnen houtsector°	400.000	450		1333		133	917
Buiten houtsector°	350.000	394		1167		219	948
Afvalverbranding°	87.000	73		290		29	199
Totaal	837.000	917		2790		381	2064

° Er werd gerekend met een gemiddelde rendementen:

	Elektriciteits-productie	Warmteproductie	WKKElektriciteitsproductie	WKKWarmteproductie
Binnen houtsector	27%	80%	8%	55%
Buiten houtsector	27%	80%	15%	65%
Afvalverbranding	20%	80%	8%	55%

(1) Het potentieel is gegeven als de hoeveelheid elektriciteit respectievelijk warmte of WKK die kan geproduceerd worden indien de volledige hoeveelheid houtafval naar enkel elektriciteitsproductie respectievelijk enkel warmteproductie, enkel WKK-productie gaat.

(2) Extrapolatie uit gegevens van verwerking van huishoudelijk afval en bedrijfsafval categorie 2.

(3) Het houtafval wordt binnen de houtverwerkende industrie energetisch gevaloriseerd onder de vorm van warmte. In praktijk gebeurt deze warmtebenutting niet altijd optimaal, vandaar dat het cijfer van de huidige productie met de nodige voorzichtigheid moet geïnterpreteerd worden.

(4) Het houtafval buiten de houtsector wordt momenteel energetisch gevaloriseerd als warmte in cementovens, papier- en slibconditioneringsbedrijven, deze zijn echter niet allemaal in Vlaanderen gelegen en dus geen echte 'Vlaamse' huidige productie.

Uit *Tabel 29* blijkt dat de energetische valorisatie van houtafval binnen de houtverwerkende sector gebeurt momenteel uitsluitend door productie van warmte. Indien verondersteld wordt dat het hout een gemiddelde calorische waarde van 15.000 MJ/ton heeft en een klassieke stookinstallatie op hout een gemiddeld rendement heeft van 80%, wordt er jaarlijks 1.333 GWh warmte geproduceerd met houtafval binnen de houtverwerkende industrie. In de grote spaanplaatbedrijven wordt deze warmte gebruikt voor processen (het drogen van hout). Het grootste deel van deze warmte wordt gebruikt in verwarmingssystemen. Deze toepassing is slechts bruikbaar voor een beperkt aantal draaiuren per jaar. In de grotere houtverwerkende bedrijven wordt dit in de zomerperiodes opgeslagen en verbruikt in de winter. Bij kleinere bedrijven kan de stockage soms een probleem geven. Het kan dan ook eens gebeuren dat het houtafval opgestookt wordt zonder energetische valorisatie. Hoeveel energie dat op deze manier verloren gaat kan moeilijk gekwantificeerd worden. Vast staat wel dat binnen de houtverwerkende industrie de energetische valorisatie van houtafval kan verbeterd worden ofwel door te zoeken naar andere warmtetoepassingen ofwel door te kiezen voor WKK-installaties.

De energetische valorisatie van houtafval buiten de houtverwerkende sector, gebeurt op verschillende manieren. Een belangrijk aandeel van het houtafval wordt gebruikt in de elektriciteitscentrales van Electrabel waar het houtafval wordt bij- of meegestookt. De energetische valorisatie in de energiesector omvat 90.000 ton (zie *Tabel 26*) tegen 2008. Dit betreft de bijstook van onbehandeld houtstof in de centrales van Electrabel te Ruien en Langerlo. De totale hoeveelheid van 270.000 ton verontreinigd houtafval in de *Tabel 26* heeft betrekking op de houtvergasser te Ruien (ca. 120.000 ton/j), de geplande houtvergasser te Langerlo (ca. 120.000 ton/j) en de installatie van Biopower te Oostende (24.000 ton/j). De installatie in Ruien zal tegen 2008 aangepast zijn met een volledige rookgaswassing en zal dan ook verontreinigd houtafval kunnen verwerken.

In de centrale van Ruien waar houtstof wordt bijgestookt, werd 11 GWh elektriciteit geproduceerd in 2001, maar was toen nog niet op volle capaciteit, per jaar kan hier 70 GWh elektriciteit geproduceerd worden. In de andere centrale van Ruien waar houtafval eerst wordt vergast en dan meegestookt in de centrale, wordt 120 GWh elektriciteit per jaar geproduceerd.

Een tweede belangrijke energetische valorisatie buiten de houtverwerkende sector is het gebruik van houtafval in de cementindustrie, slibconditioneringsbedrijven of papierfabriek. Jaarlijks wordt een 50.000 ton houtafval afgevoerd, dit komt overeen met een capaciteit van 167 GWh warmte. Deze bedrijven situeren zich echter in Wallonië en worden niet meegenomen in een inschatting van het potentieel in Vlaanderen.

Ook werd de laatste jaren houtafval geëxporteerd naar het buitenland. De afvoer van houtafvalstromen neemt toe onder invloed van binnen- en buitenlandse regels ter bevordering van het opwekken van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen. In 2001 werd er circa 10.000 ton houtafval uitgevoerd voor verbranding. Indien dit gebruikt wordt voor opwekking van elektriciteit in mono-verbrandingsinstallaties is dit goed voor 10.5 GWh elektriciteit.

De energetische valorisatie van houtafval buiten de houtverwerkende industrie, zal tegen 2008 ongeveer volledig zijn als de centrales van Ruien, Langerlo en Oostende de capaciteit van 360.000 ton/jaar houtafval opnemen en wanneer de 50.000 ton/jaar houtafval dat naar

de cement-, slibconditionering- en papierfabrieken gaat, mag in rekening gebracht worden. Bijkomende capaciteit is op het eerste gezicht niet nodig. Een vraag die wel nog open blijft, is hoe de internationale markt zal spelen. De prijs van het houtafval zal bepalen of er stromen zullen geëxporteerd of geïmporteerd worden en of Vlaanderen met een overcapaciteit of een tekort aan capaciteit zal zitten.

Het afval dat terecht komt in afvalverbrandingsinstallaties wordt momenteel slechts beperkt energetisch gevaloriseerd. De oorzaken hiervan zijn gedeeltelijk inherent aan afvalverbrandingsinstallaties. Een afvalverbrandingsinstallatie heeft als voornaamste doel afval te verwijderen, energetische valorisatie komt pas op de tweede plaats. Ook de samenstelling van het afval laat niet toe de elektrische efficiëntie te hoog op te drijven, nog meer dan bij houtafval moeten de stoomparameters beperkt worden. Toch wil dit niet zeggen dat hier geen optimalisatie meer mogelijk is. Mogelijkheden tot verbetering van de benutting kan gebeuren door meer warmte te valoriseren en/of naar WKK-afvalverbrandingsinstallaties te gaan.

Indien wordt verondersteld dat in 2008 een totaal van 53 098 GWh elektriciteit (ref. 46) zal verbruikt worden in Vlaanderen en dat 4.5% hiervan groene stroom moet zijn, is er 2389 GWh groene stroom nodig. Wanneer alle houtafval in 2008 omgezet wordt naar elektriciteit wordt er 866 tot 917 GWh groene stroom geproduceerd, dit is 36-38% van de totale benodigde hoeveelheid. Indien alles naar WKK wordt omgezet kan er 15-16% van de totale groene stroom met houtafval bekomen worden.

5.5 CO₂-reductiepotentieel

Aan de hand van de potentieelinschattingen voor productie van elektriciteit of warmte uit houtafval (*Tabel 30*) zijn ook inschattingen gemaakt voor de reductie van CO₂.

In onderstaande tabel zijn de referentie CO₂-emissiefactoren gegeven per geproduceerde eenheid energie volgens de IPCC default waarden uit verschillende brandstoffen.

Tabel 30: IPCC default CO₂-emissiefactoren gegeven per geproduceerde eenheid energie uit verschillende brandstoffen

Producten	emissiefactoren (kton CO ₂ /PJ)
Koolteer	92,7
Kolen	92,7
Cokes	106,0
Aardolie	72,6
raffinaderijgas	55,1 - 56,5 (1)
LPG	62,4
Benzene	68,6
Kerosene	70,8
Gas-en dieselolie	73,3
Lamppetroleum	71,1
Zware stookolie	76,6
Nafta	72,6
Petroleumcokes	99,8
Andere petroleumproducten	72,6
Aardgas	55,8
Cokeovengas	47,4
Hoogovengas	240,8
Andere brandstoffen	(2)

(1) Enquêtes uitgevoerd bij de raffinaderijen

(2) Afhankelijk van het bedoelde product, informatie bekomen door enquêtes met de betreffende bedrijven ofwel default emissiefactoren

Om het CO₂-reductie potentieel te berekenen werden volgende veronderstellingen gemaakt:

- referentie gemiddeld elektriciteitspark => 0,760 kton CO₂/GWh_e
- referentie warmte: stookolieketel met 85% efficiëntie (gemiddelde tussen 80% voor stoom en 90% voor warm water) => 0,324 kton CO₂/GWh_{th}

Na een korte consultatie van Febelhout binnen de houtverwerkende industrie blijken de meeste bedrijven in de sector stookolie te gebruiken, met deze referentie werd dan ook verder gerekend. Indien met deze waarden wordt verder gerekend, bekomt men in volgende tabel de maximale CO₂-besparingspotentiëlen per sector voor ofwel elektriciteitsproductie ofwel warmteproductie.

Tabel 31: CO₂-besparingspotentieel per sector voor ofwel elektriciteitsproductie ofwel warmteproductie.

Energetische valorisatie	Elektriciteit		Warmte		WKK				
	Potentieel* [GWh _e]	CO ₂ -reductie [kton/jaar]	Potentieel* [GWh _{th}]	CO ₂ -reductie [kton/jaar]	Potentieel* [GWh _e]	CO ₂ -reductie [kton/jaar]	Potentieel* [GWh _{th}]	CO ₂ -reductie [kton/jaar]	Totaal WKK [kton/jaar]
2001									
Binnen houtsector	450	342	1333	432	133	101	917	297	398
Buiten houtsector	143	109	423	137	79	60	344	111	171
Afvalverbranding	29	22	116	38	12	9	80	26	35
<i>Totaal</i>	<i>622</i>	<i>473</i>	<i>1872</i>	<i>607</i>	<i>224</i>	<i>170</i>	<i>1341</i>	<i>434</i>	<i>604</i>
2008									
Potentieel* [GWh _e]									
CO ₂ -reductie [kton/jaar]									
Potentieel* [GWh _{th}]									
CO ₂ -reductie [kton/jaar]									
Potentieel* [GWh _e]									
CO ₂ -reductie [kton/jaar]									
Totaal WKK [kton/jaar]									
Passief scenario									
Binnen houtsector	432	328	1280	415	128	97	880	285	382
Buiten houtsector	374	287	1107	359	208	158	899	291	449
Afvalverbranding	60	46	240	78	24	18	165	53	71
<i>Totaal</i>	<i>866</i>	<i>661</i>	<i>2627</i>	<i>852</i>	<i>360</i>	<i>273</i>	<i>1944</i>	<i>629</i>	<i>902</i>
Duurzaamheidsscenario									
Binnen houtsector	450	342	1333	432	133	101	917	297	398
Buiten houtsector	394	299	1167	378	219	166	948	307	473
Afvalverbranding	73	55	290	94	29	22	199	64	86
<i>Totaal</i>	<i>917</i>	<i>696</i>	<i>2790</i>	<i>904</i>	<i>381</i>	<i>289</i>	<i>2064</i>	<i>668</i>	<i>957</i>

* Het potentieel is gegeven als de hoeveelheid elektriciteit respectievelijk warmte, WKK die kan geproduceerd worden indien de volledige hoeveelheid houtafval naar enkel elektriciteitsproductie respectievelijk warmte- of WKK-productie gaat.

Uit deze tabel blijkt duidelijk dat er meer CO₂-besparingspotentieel is bij het omzetten van hout naar warmte dan bij het omzetten van hout naar elektriciteit, WKK ligt hier tussenin. De reden hiervoor is het kleinere verschil in rendement tussen een gas- en houtketel voor de productie van warmte, dan het verschil in elektriciteitsproductie tussen een gas- en houtcentrale.

5.6 Evaluatie beleidsmaatregelen

5.6.1 Groenestroomcertificaten

a. Wetgeving

Door het Elektriciteitsdecreet van 17.07.2000 en het uitvoeringsbesluit van 28 september 2001, wordt een systeem van groenestroomcertificaten ingesteld en worden nadere regels vastgesteld voor het toekennen van de certificaten.

- *Elektriciteitsdecreet Vlaanderen:*

De basis van de vrijmaking van de elektriciteitsmarkt in het Vlaamse gewest is het decreet van 17 juli 2000 betreffende de organisatie van de elektriciteitsmarkt, afgekort het Elektriciteitsdecreet. Het Elektriciteitsdecreet is, voor wat de bevoegdheden van het Vlaamse gewest betreft, de uitvoering van de Europese richtlijn 96/92/EG betreffende gemeenschappelijke regels voor de interne markt voor elektriciteit. Het Vlaamse gewest is bevoegd voor de distributie en het plaatselijk vervoer van elektriciteit door middel van netten met een spanning van minder of gelijk aan 70 kV, hernieuwbare energiebronnen en het rationeel energiegebruik. Ter uitvoering van het Elektriciteitsdecreet heeft de Vlaamse regering een aantal uitvoeringsbesluiten goedgekeurd.

- *Besluit van de Vlaamse regering van 28 september 2001 inzake de bevordering van de elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen:*

Het Vlaams besluit inzake de bevordering van de elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen van 28 september 2001 regelt de praktische uitvoering van het systeem van de groenestroomcertificaten. Dit systeem is van start gegaan op 1 januari 2002 en bestaat uit twee delen: enerzijds uit een certificatenverplichting en anderzijds uit de mogelijkheid tot het bekomen van groenestroomcertificaten. Iedere elektriciteitsleverancier is verplicht om, vanaf 1 januari 2002, een minimumaandeel van zijn verkoop aan eindafnemers te betrekken uit hernieuwbare energiebronnen. Dit minimumaandeel zal 2% bedragen in 2004 en 6% in 2010, dit percentage moet gehaald worden zowel op het transmissienet (>70 kV) als op het distributienet (< 70kV). Een leverancier kan aan deze verplichting voldoen door zelf groene stroom te produceren of door groenestroomcertificaten aan te kopen op de markt.

Een nieuw ontwerpbesluit inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen werd reeds principieel goedgekeurd en zal het huidige besluit vervangen.

Belangrijk in hoger vermeld Vlaams ontwerpbesluit zijn de definities van hernieuwbare energiebronnen en van biomassa:

“Art.1. §2. Voor de toepassing van dit besluit wordt verstaan onder:

"1° biomassa: 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.

...

5° organisch-biologische stoffen/afvalstoffen: organische stoffen/afvalstoffen van biologische oorsprong, meer bepaald stoffen die via natuurlijke biologische processen in een korte tijdsspanne kunnen worden omgezet in elementaire chemische bouwstenen.”

...

8° restafval: niet-selectief ingezameld afval”

“VOORWAARDEN VOOR DE TOEKENNING VAN GROENESTROOMCERTIFICATEN”

“Art. 2. §1. Groenestroomcertificaten worden toegekend voor elektriciteit, opgewekt uit volgende hernieuwbare energiebronnen:

- 1° zonne-energie;
- 2° windenergie;
- 3° waterkracht;
- 4° getijdenenergie en golfslagenenergie;
- 5° aardwarmte;
- 6° biogas, stortgas en rioolwaterzuiveringsgas;
- 7° biomassa.

§8. De OVAM bepaalt de hoeveelheid energie die in aanmerking komt voor het verkrijgen van groenestroomcertificaten, opgewekt uit afvalstoffen, en die al dan niet samen met andere energiebronnen worden verwerkt. In dit geval stuurt de VREG een kopie van het volledig verklaarde aanvraagdossier door aan de OVAM. De OVAM maakt haar beslissing over aan de VREG binnen de maand na ontvangst van de kopie van het aanvraagdossier. De VREG kan enkel na akkoord van de OVAM afwijken van deze beslissing.

§9. Voor productie-installaties die elektriciteit opwekken door co-verbranding van een hernieuwbare energiebron, genoemd in artikel 5, met fossiele brandstoffen, kent de VREG groenestroomcertificaten toe voor de opgewekte elektriciteit, verminderd met het product van het totale elektrisch rendement van de productie-installatie en de onderste verbrandingswaarde van de aangewende fossiele brandstof”

b. Evaluatie

Het groenestroomcertificaten systeem is in werking getreden sinds 1 januari 2002 en heeft zijn nut reeds bewezen. Heel wat projecten zijn uitgevoerd door deze stimulerende maatregel. Voor het gebruik van houtafval voor elektriciteitsopwekking is Electrabel de belangrijkste speler die op de kar is gesprongen (centrale Ruien en Langerloo). Biopower is een volgende speler die elektriciteitsproductie deels uit hout (deels mest) heeft gepland maar omwille van omstandigheden is de bouw van de centrale nog niet begonnen.

De houtverwerkende industrie is een sector die ook van deze maatregel zou kunnen gebruik maken. Studies en onderzoek in die richting lopen, maar een concreet project ligt nog niet op tafel. Er kunnen vragen gesteld worden bij de redenen van deze aarzeling.

Allereerst is er de grootte van de verschillende houtverwerkende bedrijven. Schrijnwerkerijen, meubelbedrijven, zagerijen, producenten van bouwelementen, verpakkingen, borstels, enz. produceren dikwijls te kleine hoeveelheden houtafval om op deze schaal aan elektriciteitsopwekking te doen. Zelfs met groenestroomcertificaten is dit niet rendabel. Deze bedrijven kiezen dan ook meestal voor de oplossing van verbranding van het afvalhout voor de productie van warmte.

De spaanplaatproducenten hebben genoeg houtafval ter beschikking om een renderende elektriciteitscentrale te laten draaien. Daar situeert zich de problematiek op een ander niveau. Deze bedrijven hebben een grote behoefte aan proceswarmte om hun hout te drogen. Het houtafval van het bedrijf wordt momenteel uitsluitend hiervoor aangewend. In dit geval is WKK een ideale oplossing. De bijkomende investering voor een WKK-installatie weegt erg zwaar, zelfs met behulp van groenestroomcertificaten. Om rendabel te zijn zou de WKK-installatie continu moeten draaien maar aangezien deze WKK warmte-gestuurd is, is dit met een normale bedrijfsvoering van een spaanplaatproducent niet mogelijk. WKK-certificaten zouden hier als compensatie kunnen dienen maar wegen in waarde niet op ten opzichte van de groenestroomcertificaten.

5.6.2 WKK-certificaten

a. Wetgeving

WKK is op zichzelf een relatief duur productiemiddel, vooral omwille van de hoge investeringskost. De energiebesparing pleit daarentegen in het voordeel van de WKK. De opbrengsten moeten gehaald worden uit de valorisatie van de producten: warmte en elektriciteit. Van deze twee producten is elektriciteit voor het economische plaatje de belangrijkste, dus diegenen die de grootste absolute opbrengst meebrengt. Vele projecten op basis van WKK zijn momenteel verlieslatend en kunnen economisch niet voortbestaan, tenzij met een of andere subsidieregeling. Daarom is een wetgeving uitgewerkt om aan kwalitatieve WKK-installaties certificaten toe te kennen. Deze certificaten kunnen door een marktwerking verkocht worden, en aldus geld in het laatje brengen van de noodlijdende installaties. De driver voor deze marktwerking is de verplichting, opgelegd aan alle elektriciteitsleveranciers, om jaarlijks een bepaald aantal certificaten in te dienen.

Het systeem van WKK-certificaten vertoont een aantal gelijkenissen met het reeds ingevoerde systeem van groenestroomcertificaten. Toch zijn er een aantal belangrijke verschillen. Elektriciteitsproductie op basis van hernieuwbare energiebronnen is immers volledig "groen", m.a.w. er wordt geen fossiele brandstof verbruikt en geen CO₂ uitgestoten. Voor WKK ligt dit anders, er is enkel een vermindering van het brandstofverbruik en de uitstoot van schadelijke stoffen. Daarom kan men voor WKK geen certificaten toekennen op basis van de geproduceerde elektriciteit, zoals voor hernieuwbare energie. In plaats daarvan wordt het aantal toegekende certificaten bepaald op basis van de primaire-energiebesparing. Om de nadruk te leggen op nieuwe en kwalitatief hoogstaande installaties, wordt bovendien een systeem voorzien waarbij de installaties slechts gedurende een aantal maanden het volledige aantal certificaten ten gelde kunnen maken. Daarna kan dit slechts voor een

bepaalde fractie, en deze fractie neemt af met de tijd, om uiteindelijk op nul te vallen. Hoe lang de totale periode waarbinnen certificaten bekomen worden precies duurt, is functie van de relatieve primaire-energiebesparing, en dus van de kwaliteit van de installatie. De Vlaamse regering legde in het uitvoeringsbesluit van 7 september 2001 de criteria vast waaraan een WKK-installatie moet voldoen, om als kwalitatief aanzien te worden.

‘7 SEPTEMBER 2001.- Besluit van de Vlaamse regering tot bepaling van de voorwaarden waaraan een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie moet voldoen.

...

HOOFDSTUK II.- Voorwaarden waaraan een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie moet voldoen

Art.2. Een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie is voorzien van de nodige installaties die de geproduceerde warmte, gezien de stand van de techniek, zo efficiënt mogelijk kunnen afnemen en transporteren tot de plaats waar ze nuttig aangewend kan worden.

Art. 3. § 1. Een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie heeft een relatieve primaire energiebesparing die groter is dan of gelijk aan 5 %.

§ 2. De relatieve primaire energiebesparing van een warmtekracht installatie wordt als volgt berekend:

$$\text{relatieve primaire energiebesparing} = \left[1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \right] * 100\%$$

met α_Q = het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie;

η_Q = het thermisch rendement van de referentieketel;

α_E = het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie;

η_E = het elektrisch rendement van de referentiecentrale.

§ 3. Het thermisch rendement van de referentieketel wordt gelijkgesteld aan 90 % in geval van een warmtekrachtinstallatie die haar warmte afstaat in de vorm van heet water en 80% in geval van een warmtekrachtinstallatie die haar warmte afstaat in de vorm van stoom.

§ 4. Het elektrisch rendement van de referentiecentrale wordt gelijkgesteld aan 55 % in geval van een warmtekrachtinstallatie die aangesloten is op een spanningsnet met een nominaal vermogen, hoger dan 15 kV, en 50 % in geval van een warmtekrachtinstallatie die aangesloten is op een spanningsnet met een nominaal vermogen dat lager is dan of gelijk is aan 15 kV.

... ‘

Uit de principieel goedgekeurde tekst van juni 2003:

‘Hoofdstuk II. Voorwaarden voor toekenning warmtekrachtcertificaten

Art. 2. De VREG verleent op verzoek van de certificaatgerechtigde een warmtekrachtcertificaat voor elke warmtekrachtbesparing van 1000 kWh, waarvan de certificaatgerechtigde aantoont dat die in het Vlaamse Gewest is gerealiseerd door gebruik te maken van een warmtekrachtinstallatie.

Art. 3. §1. De warmtekrachtbesparing bedoeld in artikel 2, die gerealiseerd wordt door een warmtekrachtinstallatie voor elektriciteitsproductie, wordt berekend als de primaire energiebesparing die wordt gerealiseerd door gebruik te maken van een warmtekrachtinstallatie in plaats van een referentiecentrale en een referentieketel die eenzelfde hoeveelheid netto elektriciteit en nuttige warmte zouden opwekken als die warmtekrachtinstallatie.

Voor de berekening van de warmtekrachtbesparing door een warmtekrachtinstallatie met elektriciteitsproductie wordt uitgegaan van de netto elektriciteitsproductie die op de locatie zelf verbruikt wordt of die geleverd wordt aan het distributienet, aan het transmissienet of aan directe lijnen. Die netto-elektriciteitsproductie wordt gemeten vóór de eventuele transformatie naar netspanning. Voor de berekening van het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie wordt uitgegaan van de benutte warmte die gebruikt wordt als warmtebron en die niet voor verdere elektriciteitsproductie wordt aangewend.'

Het definitieve besluit van de Vlaamse Overheid over de WKK Certificaten wordt verwacht eind 2003, met inwerkingtreding medio 2004.

Intussen denkt men ook op Europees niveau aan steun voor warmtekrachtkoppeling. De Europese Commissie lanceerde in juli 2002 een ontwerp van Europese Richtlijn inzake WKK. Deze richtlijn stelt geen concrete steunmaatregelen voorop, maar schept een kader waarbinnen de verschillende lidstaten hun eigen stimuleringssysteem kunnen plaatsen. Momenteel wordt het ontwerp behandeld door de Raad van Ministers en door het Europese Parlement. Na een eerste lezing door deze twee organen, herwerkt de Commissie de tekst en legt die dan opnieuw voor aan de Raad en het Parlement. Een definitieve goedkeuring van de Europese richtlijn is dus nog niet voor morgen.

b. Evaluatie

Zoals hierboven reeds vermeld gelden deze WKK-certificaten voor zowel fossiele als hernieuwbare energiebronnen. Voor beide situaties wordt als referentiekader een gescheiden opwekking met aardgas gesteld. Zoals in hoofdstuk 3 uitvoerig is toegelicht, is dit niet eenvoudig om de norm van 5% relatieve primaire energiebesparing met een WKK op hout te halen. Indien een WKK op houtafval toch voldoet aan de 5%-norm zal de bijdrage steeds beperkt blijven en niet de verliezen aan groenestroomcertificaten compenseren.

5.6.3 Ecologiesteun

a. Wetgeving

Een ecologie-investering is een milieu-investering gericht op een vermindering van de belasting van het milieu via een verbeterd productieproces. Deze investering moet een duidelijke meerkost hebben t.o.v. de "klassieke of standaard"-installatie (d.w.z. wat algemeen gangbaar is of wat minimum vereist is om aan de normen te voldoen).

De ecologiesteun kan worden toegekend in volgende gevallen (vanaf 1/1/2002):

- investeringen om beter te doen dan de (Europese) normen;
- investeringen om milieudoelstellingen te bereiken die niet genormeerd zijn;
- investeringen om te voldoen aan nieuwe strengere (Europese) normen gedurende 3 jaar na de goedkeuring van de (Europese) norm (enkel van toepassing voor kleine en middelgrote ondernemingen)

De investeringen worden onderverdeeld in volgende 3 categorieën :

- end-of-pipe investeringen (om de afvalstromen aan het einde van het proces te behandelen): luchtzuivering, waterzuivering, ... ;
- energiebesparende investeringen;
- procesgeïntegreerde investeringen (die het productieproces aanpassen om de milieupact te verminderen)

Ecologiesteun is van toepassing voor WKK-investeerders aangezien ze investeren in energiebesparende technologie zonder dat hiertoe een verplichting geldt op voorwaarde dat de som van het elektrisch rendement en 2/3 van het thermisch rendement groter is dan 55%.

Deze subsidiabele investeringen worden bepaald als de meerkost van de investering ten opzichte van het minder milieuvriendelijke alternatief, minus de kostenbesparingen en opbrengsten van eventuele extra bijproducten gedurende de eerste vijf jaar. Tot eind 2003 bedraagt deze ecologiesteun 20% voor kleine ondernemingen en 10% voor middelgrote en grote ondernemingen. Vanaf 2004 zal dit naar alle waarschijnlijkheid veranderen en zullen de steunpercentages verhogen. De effectieve inwerkingtreding van de nieuwe regelgeving in 2004 is afhankelijk van de uiteindelijke goedkeuring van de Europese Commissie en van de ontwikkeling van een webapplicatie om de aanvragen elektronisch via internet in te dienen.

In onderstaande tabel zijn de percentages voor hernieuwbare energie weergegeven voor 2004.

Tabel 32: Ecologiesteunpercentages voor 2004

	KMO			GO		
	steun	Maximum steun	plafond Mln €	steun	Maximum steun	plafond Mln €
Hernieuwbare Energie						
basissteun	35%		3,6	25%		3,6
Verhoging steun indien extra milieu-inspanningen aanwezig :						
Milieu charter	+1,5%		3,6	+1,5%		3,6
ISO-14000	+3%		3,6	+3%		3,6
EMAS	+5%		3,6	+5%		3,6
Maximum⁵	40%		3,6	30%		3,6

⁵ Geen cumulatie van de verschillende milieu-inspanningen; het hoogste % is van toepassing

b. Evaluatie

Deze ecologiesteun zal een grote hulp zijn voor nieuwe WKK-projecten die in de toekomst zullen uitgevoerd worden. Het optrekken van de steunpercentages in 2004 is een aanzienlijke verbetering en zal de economische situatie van de nieuwe WKK-projecten verbeteren, evenwel in het hypothetisch voorbeeld in paragraaf 4.4 nog niet tot een positieve balans komen.

Deze maatregel heeft echter geen effect op bestaande installaties.

5.6.4 Investeringsaftrek

a. Wetgeving

De investeringsaftrek is een fiscale maatregel in het kader van het wetboek der Inkomstenbelastingen. Het betreft een vrijstelling van belasting voor een bedrag dat gelijk is aan een bepaald percentage van de investering. Investeringsaftrek kan voor eender welke investering bekomen worden, maar voor energiebesparende investeringen kan de investeerder een fiscale aftrek van 13.5% krijgen in 2003. De aftrek wordt verricht op de winst van het belastbaar tijdperk waarin de investeringen hebben plaatsgehad. WKK hoort daar bij deze energiebesparende maatregelen, mits voldaan wordt aan één van volgende criteria (zie onderaan):

- de som van het elektrisch rendement en 2/3 van het thermisch rendement moet groter zijn dan 55%.
- thermisch en elektrisch rendement moeten elk minstens 25% van het totaal rendement uitmaken

De verhoogde investeringsaftrek is cumuleerbaar met de steun en/of subsidies die door het Vlaams Gewest worden verstrekt.

b. Evaluatie

Ook hier gelden dezelfde bemerkingen als bij ecologiesteun. Deze maatregel is enkel van toepassing voor nieuwe installatie en niet voor bestaande installaties.

5.7 Hindernissen voor de industrie

In volgende paragraaf wordt kort een overzicht gegeven van technologische, economische, wetgevende en praktische hindernissen die de houtverwerkende industrie ondervindt bij het realiseren van energetische valorisatie van houtafval. De meeste punten werden reeds behandeld in vorige hoofdstukken maar worden hier nog eens op een rijtje gezet.

5.7.1 Technologische hindernissen

a. Warmte-productie

Bij decentrale warmteopwekking is er direct geen technologisch probleem, de problemen situeren zich eerder indirect. Een bedrijf dat houtafval ter beschikking heeft, moet een goede warmte-afnemer intern of naburig aan zijn bedrijf vinden. Processtoom is een eerste

mogelijkheid, een verwarmingssysteem een andere mogelijkheid. Deze toepassingen moeten echter voldoende uren per jaar kunnen draaien om het houtafval te kunnen verwerken. Indien dit niet zo is, kan gekeken worden of het mogelijk is het houtafval te stockeren. Hiervoor is echter veel ruimte nodig en moet ook de nodige investering gebeuren om op een veilige en goede manier het houtafval te bewaren.

Een tweede mogelijkheid is het zoeken naar andere warmte-afnemers die aanvullend zijn op de reeds bestaande afnemers. Absorptiekoeling kan hiervan een voorbeeld zijn. Warmte wordt hier omgezet in koude om bijvoorbeeld in de zomer de gebouwen af te koelen. Een andere mogelijkheid is het opslaan van de warmte tot in periodes waarin de warmte bruikbaar is, hierbij kan gedacht worden aan KWO (Koude-Warmte-Opslag). Beide oplossingen vragen echter een aanzienlijke bijkomende investering en maken de installaties complexer.

Bij centrale warmte-producerende installaties is het probleem vergelijkbaar met decentrale installaties. Een warmte/processtoom-afnemer vinden die grote hoeveelheden nodig heeft en dit vrij continu gedurende het jaar. In de Scandinavische landen, Duitsland en Oostenrijk zijn afstandsverwarmingsnetten dikwijls afnemers van deze warmte. Zulke stadsverwarmingsnetten zijn in Vlaanderen echter niet ter beschikking.

b. Elektriciteitsproductie

Elektriciteitsproductie met kleine eenheden heeft momenteel nog een zeer lage efficiëntie en/of is zeer complex: De indirecte klassieke elektriciteitsopwekking via stoom heeft zijn beperkingen naar stoomparameters en de kleine vermogens zijn de oorzaken van een lage elektrische efficiëntie, de gescheiden wegen van verbranding en elektriciteitsproductie zorgen voor de grote complexiteit van deze kleine installaties. Eenvoudiger en efficiënter is de directe conversie via vergassing en gasmotor/turbine, Stirling, hete lucht turbines, ... maar deze staan nog niet volledig op punt. Het onderzoek naar deze eenvoudigere en meer efficiënte technologieën is volop aan de gang. Het onderzoek boekt vooruitgang, veel pilootinstallaties en demoprojecten lopen, maar de technologieën zijn nog niet marktrijp.

In grote 'fuel dedicated' centrales blijven de beperkingen in stoomparameters een probleem voor de energetische efficiëntie. Bij- en meestook van houtafval in bestaande elektriciteitscentrales hebben hier minder onder te lijden. In de centrales zit de technische beperking in de hoeveelheid houtafval dat kan bijgestookt worden, teneinde verhoogde corrosie of vervuiling van de ketel (oververhitter) te vermijden.

c. WKK-productie

Dezelfde hindernissen die een warmte-producerende installatie of een elektriciteitscentrale ondervinden, zijn ook van toepassing op een WKK-installatie. Daarbij komt ook nog de toenemende complexiteit van deze installaties. Er is de extra stoomkring die nodig is voor de stoomturbine of stoommotor wanneer voor deze klassieke WKK-technologie wordt gekozen. Wanneer de warmte van een WKK-installatie in een proces gebruikt wordt, is de binding tussen het proces en de elektriciteitsproductie zeer sterk. Bij een fluctuerende warmtevraag, zal de elektriciteitsproductie ook zeer sterk variëren. Naar bedrijfsvoering toe wordt dit veel moeilijker en veel minder flexibel en worden de risico's voor uitval groter.

5.7.2 Economische hindernissen

a. Warmte-productie

Het verschil in investeringskost tussen een klassieke kleine gas- of stookolieketel en een houtverbrandingsinstallatie is zeer groot, zeker wanneer moet geïnvesteerd worden in een uitgebreide rookgasreiniging. Het ontbreken van een brandstofkost kan deze meerkost gedeeltelijk compenseren. De vermeden brandstofkost is afhankelijk van de hoeveelheid benutte warmte en dus van het aantal draaiuren van een installatie. Het economische rendement is bijgevolg erg laag bij een fluctuerende warmtevraag zoals voor verwarming. Zoals reeds besproken in paragraaf 5.7.1 zijn grote centrale warmte-producerende installaties in Vlaanderen moeilijk realiseerbaar omdat grote constante warmteafnemers niet eenvoudig te vinden zijn in de buurt van houtafvalproducerende bedrijven, wel mogelijk bij de grote spaanplaatbedrijven. De mogelijkheid van afstandsverwarmingsnetten als afnemer, zijn hier economisch niet haalbaar.

b. Elektriciteitsproductie

Elektriciteitsproductie op kleine schaal heeft een hoge specifieke investerings- en werkingskost waardoor een minimum vermogen vereist is. Deze hoge kosten zijn zonder groenestroomcertificaten niet haalbaar.

Grote ‘fuel dedicated’ elektriciteitscentrales hebben ook deze zeer hoge specifieke investerings- en werkingskost in vergelijking met een klassieke kolen- of STEG-centrale. Hun economische situatie is dan ook volledig afhankelijk van opbrengst van de groenestroomcertificaten.

In bij- en meestookcentrales is bijkomende investerings- en werkingskost niet zo groot maar door de toenemende complexiteit vergroot wel het risico op stilstanden, zeker wanneer het houtafval wordt meegestookt (het houtafval volgt dezelfde weg als de kolen: vermalers, schroeftransport, kolenbranders). Deze bijkomende stilstanden kunnen een serieuze impact hebben op het financieel vlak. Een kost die bij co-verbranding wel in rekening moet worden gebracht is de aankoop van het hout. Zolang dit hout niet duurder is dan de vermeden kolenkost, stellen zich geen problemen. Wanneer de prijs van het houtafval echter stijgt door bijvoorbeeld transport over grotere afstanden, heeft dit invloed op de rentabiliteit van de centrale. Bij- en meestook van houtafval in kolencentrales kan omwille van verhoogde vervuiling van de ketel, leiden tot rendementsverlies en verlies van werkingsuren.

c. WKK-productie

De specifieke investerings- en werkingskost is hier zeer hoog aangezien het zowel een warmte-producerende als elektriciteitscentrale combineert. Het ontbreken van de brandstofkost en de opbrengst van zowel de warmte als de elektriciteit compenseren deze hoge kosten niet voldoende. De opbrengst van warmte per kWh is in vergelijking met stroom (grijs+groen) veel kleiner. Een energetisch geoptimaliseerde WKK-installatie is echter warmte-gestuurd en produceert meer warmte dan stroom en ‘misloopt’ zo de groenestroomcertificaten die doorslaggevend zijn in het economisch plaatje. WKK-certificaten kunnen dit verlies niet compenseren.

5.7.3 Wetgevende hindernissen

a. Warmte-productie

De productie van warmte uit houtafval kan een aanzienlijk bijdrage leveren aan de CO₂-reductie. Toch wordt dit niet zo gestimuleerd als de productie van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen. De warmteproducerende installaties krijgen wel steun onder de vorm van ecologiesteun en investeringsaftrek. Dit is goed voor nieuwe installaties, bestaande installaties hebben hier geen recht op. Een bijkomend nadeel van deze regeling is het feit dat deze maatregel minder gericht is op de uiteindelijke warmtebenutting.

b. Elektriciteitsproductie

De groenestroomcertificaten hebben op de energiemarkt heel wat in beweging gezet. Ook de benutting van houtafval voor elektriciteitsproductie is hierdoor op gang gekomen. Voornamelijk de grote energieleveranciers zijn in actie geschoten. Kleinere investeerders aarzelen nog omdat het moeilijk is een bedrijfsplan op te zetten met een onzekere prijs voor groenestroomcertificaten. Het verschil tussen Vlaanderen en de omliggende landen (vnl. Duitsland en Nederland) is dan ook groot. In deze landen staan er heel wat biomassa-centrales in de steigers omdat daar een vaste groene stroomprijs is overeengekomen voor de volgende 10 tot 20 jaar. In Vlaanderen is deze zekerheid er niet, er is enkel de vork van een minimum vergoeding en een maximum boeteprijs. De minimum prijs is voor vele projecten echter te laag om winstgevend te zijn. Speculeren over de prijs van groenestroomcertificaten en hoe lang deze prijzen zo hoog zullen staan past niet in een investeringsplan. Ook blijft de vraag wat de overheid zal doen na 2010 of wanneer de doelstelling van 6% groene stroom behaald is.

c. WKK-productie

Naast groenestroomcertificaten, ecologiesteun en investeringsaftrek kan een WKK-installatie in principe beroep doen op WKK-certificaten. Om WKK-certificaten te kunnen bekomen moet voldaan zijn aan de regel van minimum 5% relatieve primaire energiebesparing ten opzichte van een referentie-installatie die in dit geval aardgas is. Deze norm is moeilijk haalbaar voor houtverbrandingsinstallaties (zie hoofdstuk 3.4). Zelfs indien deze norm toch behaald kan worden, compenseren de WKK-certificaten niet de groenestroomcertificaten. Decentrale WKK-installaties op biomassa zijn momenteel nog niet rendabel ondanks al de inspanningen die de Vlaamse overheid reeds ondernomen heeft ter ondersteuning van WKK-installaties.

5.7.4 Praktische hindernissen

Algemeen kan hier gesteld worden dat een houtverbrandingsinstallatie meer inzet vraagt van een bedrijf dan de klassieke gas- of stookolieketel en/of de aankoop van elektriciteit. De bedrijfsvoering wordt complexer met een houtverbrandingsinstallatie. Deze installatie kan niet zo snel reageren als de klassieke systemen, de installatie is veel minder flexibel. Indien gewerkt wordt met een externe warmte-afnemer moeten er goede afspraken gemaakt worden en duidelijk contracten worden opgesteld.

Zeker bij WKK-installaties die toch een minimum vermogen nodig hebben, is heel wat inzet en knowhow nodig om de installatie optimaal te regelen, te benutten en af te stemmen op het productieproces.

Het produceren van energie is voor vele bedrijven zeker geen hoofdzaak. De knowhow rond energie is (nog) niet aanwezig. Bedrijven die groot genoeg zijn en over voldoende draagkracht beschikken kunnen hierin mankracht investeren, bij andere kleinere bedrijven die houtafval te beschikking hebben, is dit echter niet mogelijk.

5.7.5 Slot matrix

Door de verschillende hindernissen op een rij te zetten, wordt duidelijk dat de energetisch meest optimale oplossing, nog de meeste hindernissen moet overwinnen. Zolang een WKK-installatie nog te weinig zekerheden heeft op technologisch, economisch en wetgevend vlak zal het moeilijk blijven de industrie te overtuigen van te investeren in deze technologie.

Tabel 33: Overzicht barrières bij verschillende mogelijkheden van valorisatie van houtafval

	Warmte-productie	Elektriciteitsproductie	WKK-productie
Technologische barrières	<ul style="list-style-type: none"> - brandstof stockeren - warmteafname 	<ul style="list-style-type: none"> - mono-verbranding: lage energetische efficiëntie: indirect en kleine vermogens - beperkte stoomparameters 	<ul style="list-style-type: none"> - idem warmte en elektriciteit - complexiteit
Economische barrières	<ul style="list-style-type: none"> - hoge investerings- en werkingskost in vergelijking met klassieke fossiele technologie - laag economisch rendement bij weinig draaiuren - afstandsverwarmingsnet niet haalbaar 	<ul style="list-style-type: none"> - hoge specifieke investerings- en werkingskost - co-verbranding: rendementsverlies, meer stilstanden 	<ul style="list-style-type: none"> - zeer hoge specifieke investerings- en werkingskost
Wetgevende barrières	<ul style="list-style-type: none"> - geen specifiek stimulerende maatregelen naar warmtebenutting 	<ul style="list-style-type: none"> - onzekerheid prijs groenestroomcertificaten en tijdsevolutie 	<ul style="list-style-type: none"> - kwalitatieve WKK niet aangepast aan gebruik houtafval als brandstof - bijkomende ondersteunende maatregelen (ecologiesteun, investeringsaftrek) niet voldoende
Praktische barrières	<ul style="list-style-type: none"> - geen afstandsverwarmingsnet beschikbaar 	<ul style="list-style-type: none"> - grootteorde van de centrales 	<ul style="list-style-type: none"> - bedrijfsvoering zeer complex

5.8 Besluit

De hoeveelheid houtafval die in Vlaanderen beschikbaar is, kan een aanzienlijke bijdrage leveren tot de reductie van CO₂, zeker indien het houtafval benut wordt voor warmteproductie.

De energetische valorisatie van houtafval is nog niet optimaal, zeker binnen de houtverwerkende industrie zijn er nog mogelijkheden om dit te optimaliseren: optimale benutting van warmte, WKK. Buiten de houtverwerkende industrie zijn de mogelijkheden voor elektriciteitsproductie (bij- en meestook) en warmte-productie (cement-, slibconditionerings- en papierfabrieken) reeds goed benut of staan voldoende projecten in de steigers om dit potentieel op te vangen. In de afvalverbrandingsinstallaties kan echter nog een verdere optimalisering doorgevoerd worden.

Binnen de houtverwerkende industrie is warmteproductie voor de kleinere bedrijven de beste energetische benutting aangezien deze te klein zijn voor elektriciteitsproductie of WKK. De grote bedrijven met een hoeveelheid houtafval van enkele tienduizenden ton per jaar kunnen beginnen denken aan WKK of elektriciteitsproductie, met een voorkeur voor WKK vanuit energetisch en CO₂-reductiepotentieel.

Door de overheid zijn reeds heel wat stappen ondernomen om houtverbrandingsinstallaties te promoten voor energiewinning, toch blijven er nog hindernissen die de industrie nog tegen houdt om voluit voor deze oplossing te kiezen.

6 ALGEMEEN BESLUIT

De valorisatie van houtafval in Vlaanderen kan een grote bijdrage leveren aan het behalen van het beoogde percentage van 6 % groene stroom in 2010 en het reduceren van de uitstoot van CO₂ zoals beoogd in het Kyoto-protocol.

Louter elektriciteitsproductie uit houtafval is energetisch echter niet de meest optimale oplossing. Een WKK-installatie op hout is in dat opzicht de meest ideale situatie aangezien zowel elektriciteit als warmte geproduceerd wordt met een energetisch optimaal omzettingsrendement. Toepassing van WKK moet dan ook verder gestimuleerd worden voor energetische benutting van houtafval.

Verskillende technieken voor een WKK met houtafval zijn mogelijk. De klassieke technieken gebruiken stoom als energiedrager in een stoomturbine of stoommotor. Deze technieken zijn echter vrij kostelijk en de energetische rendementen zijn vrij laag. Onderzoek naar innovatieve technieken zoals ORC, Stirlingmotor, vergassingstechnieken met gasturbine zonder omweg via stoom is bijgevolg volop aan de gang en de resultaten zijn goed (hogere energetische rendementen). Momenteel zijn deze innovatieve technieken in piloot- en demonstratiefase. Dit brengt met zich mee dat deze technologieën nog niet volledig marktrijp zijn en nog vrij duur.

Stimulerende maatregelen voor energetische valorisatie van houtafval zijn aanwezig. Met ecologiesteun kan een deel van de meerkost van de investering in een houtverbrandingsinstallatie met energetische valorisatie gesubsidieerd worden. De geproduceerde elektriciteit uit houtafval kan aanspraak maken op groene stroom certificaten. Voor groenestroomcertificaten is de prijszekerheid nadelig. De totale WKK-installatie kan beroep doen op WKK-certificaten indien voldaan is aan een relatieve primaire energiebesparing van 5% conform het huidige WKK-decreet. Dit laatste is echter een probleem voor WKK-installaties op hout omwille van hun (nog) beperkte omzettingsrendementen ten opzichte van fossiele brandstof.

Uit de economische analyse blijkt dat ecologiesteun en groene stroomcertificaten zeer belangrijk zijn als financiële stimuli. Een warmte/stoom producerende installatie en een 'fuel dedicated' centrale kunnen in bepaalde gevallen al economisch haalbaar zijn. De WKK-certificaten zijn een mogelijk (indien voldaan is aan de 5% RPEB) bijkomende ondersteunende maatregel voor WKK-installaties maar deze blijken niet voldoende invloed te hebben om de economische situatie ten goede te keren en zijn dus in zijn huidige vorm niet voldoende aangepast zijn om WKK op basis van houtafval te promoten.

De huidige hoeveelheid energetische valorisatie van houtafval gebeurt voornamelijk onder de vorm enkel- warmte of enkel elektriciteitsproductie. WKK-productie wordt momenteel weinig tot niet gebruikt niettegenstaande dit het meest optimale energetische rendement heeft en een aanzienlijke bijdrage tot CO₂-reductie en groene stroomproductie met zich mee brengt. Er blijven echter nog belangrijke hindernissen vnl. financiële

hindernissen over die de industrie tegenhoudt om voor deze installaties te kiezen ondanks de inspanningen die de Vlaamse overheid al ondernomen heeft.

LIJST MET AFKORTINGEN

BIG/STIG:	Biomass Integrated Gasifier/Steam Injected Gas Turbine
CFB:	Circulating Fluidised Bed
EU:	Europese Unie
FB:	Fluidised Bed
GE:	Gesubstitueerde Equivalent (brandstof)
HTU:	Hydro Thermal Upgrading
IC:	Internal Combustion
IGCC:	Integrated Gasifier Combined Cycle
KGA:	Klein Gevaarlijk Afval
KWS:	Koolwaterstoffen
LT:	Lage temperatuur(sreiniging)
ORC:	Organic Rankine Cycle
OVAM:	Openbare Afvalstoffen Maatschappij
PAK:	Polycyclische Aromatisch Koolwaterstoffen
PEB:	Primaire Energie besparing
PVC:	Poly-Vinyl-Chloride
RPEB:	Relatieve Primaire Energiebesparing
RSZ:	Rijksdienst voor Sociale Zekerheid
STEG:	Stoom en Gas (gecombineerde stoom en gas-elektriteitscentrale)
VLACO:	Vlaamse Compostorganisatie
VREG:	Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt
W/K:	Warmte-Kracht verhouding
WKK:	Warmte-Kracht Koppeling

REFERENTIELIJST

1. Studie über die energetische Nutzung der Biomasseanteile in Abfällen, Augsburg, Bifa – Texte Nr. 5, 1998.
2. Nussbaumer, Th., Neuenschwander, P., et al., Energie aus Holz: Vergleich der Verfahren zur Produktion von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz, Programm Biomasse im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, 1998
3. Verbrennen von Holz und Holzwerkstoffen ohne/mit Holzschutzmitteln. Holzbearbeitung und –verarbeitung. VDI-Richtlinien, Blatt4/5 Emissionsminderung. Düsseldorf, VDI, 1997.
4. Vanderstraeten, P., Devriendt, N., VITO-studie: Studie houtafval als case study van HCA, 2003
5. Larson, E.D., Technology for electricity and fuels from biomass. Annual review energy and environment, 18, 576-630, 1993.
6. Hasler, P., Nussbaumer, Th., Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification, Biomass and Bioenergy, Volume 16, Issue 6, 1999, p. 385-395
7. Ingwald Obernberger. Thermische Nutzung fester biogener Brennstoffe. In: VDI Schriftenreihe ‚Regenerative Energien in Ungarn und in Deutschland‘, ISBN 3-931384-32-2, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland, p. 59-101
8. NOVEM, EWAB Programme, Final report: Inventory of biomass gasifier manufacturers and installations, 2001
9. Rensfelt, E., Swedish Biomass Gasification Activities, TPS Termiska Processor AB, 2003
10. Knoef, H.A.M, Van der Aa, B., Development of a low cost, reliable wood gasifier plant for rural application, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000, p. 980-982
11. de Lange, H.J., Barbucci, P., The realisation of a biomass-fuelled IGCC plant in Italy, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000, p. 1486-1489
12. Ontwerp Uitvoeringsplan Houtafval, OVAM, 2003.
13. S. Deimling, et al. Leitfaden Bioenergie, Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.
14. R. van Ree et al. “Mee-/Bijstookpotentieel Biomassa in Kolencentrales en Aardgasgestookte installaties – Bepaling van de Milieutechnische en Financieel-economische haalbaarheid” rapport ECN-C-00-103
15. Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics, Cogeneration (CHP), a TechnologyPortrait, Vienna, 2002.
16. Hugues, J., Wood-fuelled cogeneration, technologies and trends worldwide, Cogeneration and On-Site Power Production, july-august 2003.

17. Fischer, J., Technologies for small scale Biomass CHP-Plants – an actual survey, Institute for Energy Economics and Rational Use of Energy, IER, University of Stuttgart.
18. “Besluit van de Vlaamse regering inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen”, 28/09/2001, pagina B.S.: 36778, 23/10/2001
19. “Besluit van de Vlaamse regering tot bepaling van de voorwaarden waaraan een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie moet voldoen”, 07/09/2001, B.S. 12/12/2001
20. Ingwald Obernberger. Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente, Graz, 1998
21. Rabou, L.P.L.M., Jansen, D., De-centralised power production using low-calorific value gas from renewable energy sources in gas turbines. Report to NOVEM by ECN and OPRA, 2001
22. Pogoreutz, M., Reetz, B., Kraft-Wärme-Kopplung auf der Basis von Bioenergie. Institut für Wärmetechnik der TU Graz, Graz, 2000
23. Cummer, K.R., Brown, R.C., Ancillary equipment for biomass gasification, Biomass and Bioenergy, Volume 23, Issue 2, 2002, p. 113-128
24. Seeger, K., Verstromungsanlagen- Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen, Seminar Freiberg November 2000
25. Van den Bosche, S., Groene stoom versus groene stroom uit vaste biomassa, Studiedag Biomassaplatform 'Elektriciteit en warmte uit organisch materiaal en biomassa', Vito, Mol, 2002
26. Venendaal, R., van Haren, P., Learning from experiences with Alternative Fuels n Electric Generating Plants, CADDET Energy Efficiency, 1999
27. Keating, E.L., Applied combustion, MARCEL DEKKER INC., New York, 1993
28. Pogoreutz, M., Economical and technological comparison of small-scale CHP on the basis of biomass, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000, p. 821-824
29. Podesser, E., Bayer, H., Spitzer, J., Application and economy of biomass Stirling engines in Austria, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000, p. 919-920
30. Carlsen, H., Biofuel Stirling engines for CHP, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000, p. 933-936
31. Gaia, M., Scheidegger, K., Bini, R., Bertuzzi, P., Small scale biomass powered CHP plants featuring thermal oil boiler and organic rankine cycle turbogenerators, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000, p. 954-957
32. Bain, R.L., Mancini, T.R., Status of the U.S. department of energy small modular biopower initiative, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000, p. 1490-1493

33. TNO-rapport ref. 94-372 - Milieueffecten van de energiewinning uit (afval)hout april 1995
34. Thermische houtverwerking, Voorstudie PNEM - PGEM – BFI, 1993
35. Van Overstraeten, R. and Palmers, G. (Eds.), The future for renewable energy. Prospects and directions. London, James & James, 209 p., 1996
36. H. Wefing, F. Vollmer. Biomassegefeuerte Heiz- und Heizkraftwerken. BWK, Essen, 2001
37. G.C. Bergsma, et al. Beperking van emissies naar de lucht bij conversie van biomassa naar elektriciteit en warmte. Delft, 1999
38. Lior Solutions for the environment, Biomass Combustion (version 2) & Biomass Gasification (version 1), User Handbook, 2000
39. Zanzi, R., Sjöström, K., Björnbom, E., Rapid high-temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor, Fuel Vol.75, No.5, pp. 545-550, 1996.
40. Zanzi, R., Sjöström, K., Björnbom, E., Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperatures, Biomass & Bioenergy, january 2001.
41. Pedersen, S.T., Andersen, S.M., Pyrolysis of Wood Chips: experiments and mathematical modelling.
42. FICHTNER, Markt- und Kostenentwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse, April 2002.
43. Vankerkhove, R., Uusitalo, M., et al., Warmtekracht uit hout, ERBE, mei 2001.
44. <http://www.energiotech.info>
45. <http://www.alphapowersystems.nl>
46. Ontwerp Voortgangsrapport 2003 van het Vlaamse Klimaatplan, ANRE.
47. <http://www.energieprojecten.nl>
48. <http://www.ecn.nl>
49. <http://www.vreg.be>
50. <http://www/ficfb.at>
51. <http://www.btgworld.com/technologies>

BIJLAGE 1: EES: Engineering Equation Solver



Legendrukturbine:

```
m_dot_s=1 [kg/s]
m_dot_s=m_dot_c
T_c=165 [C]
eta_t= 0,85
eta_m= 0,96
h_is1=enthalpy(steam_nbs;p=p_nt;s=s_h)
s_h=entropy(steam_nbs;p=p_h;T=T_h)
h_h=enthalpy(steam_nbs;p=p_h;T=T_h)
eta_t*(h_h-h_is1)=(h_h-h_nt)
p_nt=pressure(steam_nbs;T=T_c+10;x=0,5)
P_t=m_dot_s*(h_h-h_nt)
P_el=P_t*eta_m-P_p
P_q=m_dot_c*(h_nt-enthalpy(steam_nbs;p=p_nt;x=0))
h_nc=enthalpy(steam_nbs;p=p_nt;x=0)
h_npis= enthalpy(steam_nbs;p=p_h;s=s_nt)
s_nt=entropy(steam_nbs;p=p_nt;x=0)
eta_p=0,85
eta_p*(h_np-h_nc)=(h_npis-h_nc)
P_p=m_dot_s*(h_np-h_nc)
eta_k=0,85
P_k=m_dot_s*(h_h-h_np)
P_k=P_br*eta_k
WK=P_q/P_el
PEB=1-1/g
g=alfa_e/0,5+alfa_t/0,85
alfa_e=P_el/P_br
alfa_t=P_q/P_br
p_h=32
T_h=350
{T_nt=(T_c+10)+10}
{h_nt=enthalpy(steam_nbs;p=p_nt;T=T_nt)}
```

Condenserende turbine met aftap:

```
{*** Berekeningen met oververhitte stoom naar de warmtetoepassing ***}  
module Oververhit(p_h;T_h;m_dot_i;p_i;eta_k;s_i;T_i;P_t;P_el;P_q;P_br)
```

```
m_dot_s=1 [kg/s]  
m_dot_s=m_dot_i+m_dot_c  
T_c=45 [C]  
eta_t= 0,85  
eta_m= 0,96  
h_is1=enthalpy(steam_nbs;p=p_i;s=s_h)  
s_h=entropy(steam_nbs;p=p_h;T=T_h)  
h_h=enthalpy(steam_nbs;p=p_h;T=T_h)  
eta_t*(h_h-h_is1)=(h_h-h_i)  
p_c=pressure(steam_nbs;T=T_c;x=0,5)  
h_is2=enthalpy(steam_nbs;p=p_c;s=s_i)  
s_i=entropy(steam_nbs;p=p_i;T=T_i)  
T_i=temperature(steam_nbs;p=p_i;h=h_i)  
eta_t*0,95*(h_i-h_is2)=(h_i-h_c)  
P_t=m_dot_s*(h_h-h_i)+m_dot_c*(h_i-h_c)  
P_el=P_t*eta_m-P_p  
P_q=m_dot_i*(h_i-enthalpy(steam_nbs;p=p_i;x=0))  
h_nc=enthalpy(steam_nbs;p=p_c;x=0)  
h_npis=enthalpy(steam_nbs;p=p_h;s=s_c)  
s_c=entropy(steam_nbs;p=p_c;x=0)  
eta_p=0,85  
eta_p*(h_np-h_nc)=(h_npis-h_nc)  
P_p=m_dot_s*(h_np-h_nc)  
P_br=m_dot_s*(h_h-h_np)/eta_k  
s_nt=entropy(steam_nbs;p=p_c;h=h_c)  
P_con=m_dot_c*(h_c-h_nc)  
{x_nt=quality(steam_nbs;p=p_c;h=h_c)}  
  
end
```

```
{***Berekeningen met verzadigde stoom naar de warmtetoepassing ***}
```

```
module Verzadigd(T_h;m_dot_i;p_i;eta_k;s_i;T_i;P_t;P_el;P_q;P_br)
```

```
m_dot_s=1 [kg/s]  
m_dot_s=m_dot_i+m_dot_c  
T_c=45 [C]  
eta_t= 0,85  
eta_m= 0,96  
h_is1=enthalpy(steam_nbs;p=p_i;s=s_h)  
s_h=entropy(steam_nbs;p=p_h;T=T_h)  
h_h=enthalpy(steam_nbs;p=p_h;T=T_h)  
eta_t*(h_h-h_is1)=(h_h-h_i)  
p_c=pressure(steam_nbs;T=T_c;x=0,5)  
h_is2=enthalpy(steam_nbs;p=p_c;s=s_i)  
s_i=entropy(steam_nbs;p=p_i;x=1)  
T_i=temperature(steam_nbs;p=p_i;x=1)  
h_i=enthalpy(steam_nbs;p=p_i;x=1)  
eta_t*0,95*(h_i-h_is2)=(h_i-h_c)
```

```

P_t=m_dot_s*(h_h-h_i)+m_dot_c*(h_i-h_c)
P_el=P_t*eta_m-P_p
P_q=m_dot_i*(h_i-enthalpy(steam_nbs;p=p_i;x=0))
h_nc=enthalpy(steam_nbs;p=p_c;x=0)
h_npis= enthalpy(steam_nbs;p=p_h;s=s_c)
s_c=entropy(steam_nbs;p=p_c;x=0)
eta_p=0,85
eta_p*(h_np-h_nc)=(h_npis-h_nc)
P_p=m_dot_s*(h_np-h_nc)
P_br=m_dot_s*(h_h-h_np)/eta_k
s_nt=entropy(steam_nbs;p=p_c;h=h_c)
P_con=m_dot_c*(h_c-h_nc)

end

{*** Hoofdprogramma ***}
p_h=32
T_h=350
p_i=7 [bar]
m_dot_i=1

eta_k=,85

call Oververhit(p_h;T_h;m_dot_i;p_i;eta_k:s_io;T_io;P_to;P_elo;P_qo;P_bro)
call Verzadigd(T_h;m_dot_i;p_i;eta_k:s_iv;T_iv;P_tv;P_elv;P_qv;P_brv)

s_imin=entropy(steam_nbs;p=p_i;x=1)

s_j=max(s_io;s_imin)
T_i=if(s_io;s_imin;T_iv;T_iv;T_io)
P_t=if(s_io;s_imin;P_tv;P_tv;P_to)
P_el=if(s_io;s_imin;P_elv;P_elv;P_elo)
P_q=if(s_io;s_imin;P_qv;P_qv;P_qo)
P_br=if(s_io;s_imin;P_brv;P_brv;P_bro)

WK=P_q/P_el
PEB=1-1/g
g=alfa_e/0,5+alfa_t/0,85
alfa_e=P_el/P_br
alfa_t=P_q/P_br
eta_tot=alfa_e+alfa_t

```

Organic Rankine Cycle (ORC):

```
m_dot_s=1 [kg/s]
m_dot_s=m_dot_r
{T_nc=70 [C]}
eta_t= 0,80
eta_m= 0,96
h_is1=ENTHALPY(ISOPENTANE;p=p_r;s=s_h)
s_h=ENTROPY(ISOPENTANE;p=p_h;T=T_h)
h_h=enthalpy(ISOPENTANE;p=p_h;T=T_h)
eta_t*(h_h-h_is1)=(h_h-h_r)
p_r=pressure(ISOPENTANE;T=T_nc+10;x=0,5)

P_t=m_dot_s*(h_h-h_r)
P_el=P_t*eta_m-P_p

{eta_r=0,8}
h_vh-h_np=h_r-h_nr
eta_r*(h_r-h_np)=(h_r-h_nr)
T_nr=T_np+20

h_nc=enthalpy(ISOPENTANE;p=p_r;T=T_nc+5)
h_npis=enthalpy(ISOPENTANE;p=p_h;s=s_nc)
s_nc=entropy(ISOPENTANE;p=p_r;T=T_nc+5)
p_nc=p_r {pressure(ISOPENTANE;T=T_nc+10;x=0,1)}

eta_p=0,85
eta_p*(h_np-h_nc)=(h_npis-h_nc)
P_p=m_dot_s*(h_np-h_nc)
P_br=m_dot_s*(h_h-h_vh)
T_vh=temperature(isopentane;p=p_h;h=h_vh)
T_np=Temperature(isopentane;p=p_h;h=h_np)
T_r=temperature(isopentane;p=p_r;h=h_r)
h_nr=enthalpy(isopentane;p=p_r;T=T_nr)
p_h=30
T_h=280
alfa_e=P_el/P_br2
P_q=m_dot_s*(h_nr-h_nc)
alfa_t=P_q/P_br2
WK=P_q/P_el
PEB=1-1/g
g=alfa_e/0,5+alfa_t/0,9

eta_to=0,83
P_br2*eta_to=P_br
```

Uncertainty Propagation

In many cases, an important quantity is not directly measured by rather calculated as a function of one or more variables that are directly measured, i.e., $Y = f(X_1, X_2, \dots)$. The measured variables, X_1, X_2 , etc. have with a random variability which is referred to as its uncertainty. In EES, that uncertainty is displayed with a \pm symbol, e.g., $X_1 = 300 \pm 2$.

The purpose of this command is to calculate how the uncertainties in each of the measured variables propagate into the value of the calculated quantity, Y . The method for determining this uncertainty propagation is described in NIST Technical Note 1297 (Taylor B.N. and Kuyatt, C.E., Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, National Institute of Standards and Technology Technical Note 1297, 1994). Assuming the individual measurements are uncorrelated and random, the uncertainty in the calculated quantity can be determined as

$$U_y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 * U_{X_i}^2}$$

where U represents the uncertainty of the variable.

The partial derivative of the calculated variable with respect to each measured variable will be displayed. In addition the % of the total uncertainty in the calculated variable resulting from the uncertainty in each measured variable will also be displayed. This % is calculated as the ratio of the square of the product of the partial derivative and uncertainty of each measured variable to the square of the uncertainty in the calculated variable.

BIJLAGE 2: Gegevens gasmotoren en gasturbines

Gegevens gasmotoren:

<i>Locatie installatie</i>	<i>Elektrische efficiëntie</i>	<i>Thermische efficiëntie</i>	<i>Relatieve primaire energiebesparing</i>
Bulle, Zwitserland	18 %	40 %	- 24.3 %
Hogild, Denemarken	21 %	57 %	5.1 %
Blaere, Denemarken	25 %	63 %	16.7 %
Harboore, Denemarken	31 %	67 %	26.7 %
Arcus, Duitsland	30 %	25 %	13.9 %
Blackwater Valley Museum, Groot-Brittannië	25 %	50 %	5.3 %
Grübl, Oostenrijk	4 %	25 %	-179.5 %
Energia Natural de Mora, Italië	23 %	30 %	-26.1 %
Herning, Denemarken	18 %	75 %	16.2 %
Fürsten Walde, Duitsland	24 %	40 %	-8.2 %
Grünberg, Duitsland	28 %	59 %	17.7 %
Viking, Denemarken	21 %	75 %	20.2 %

Gegevens gasturbines:

<i>Locatie installatie</i>	<i>Elektrische efficiëntie</i>	<i>Thermische efficiëntie</i>	<i>Relatieve primaire energiebesparing</i>
Värnamo, Zweden	33 %	50 %	16 %
Elbe-Elstu Holzkraft AG, Duitsland	21 %	39 %	-19 %
Sachsenholz AG, Duitsland	19 %	47 %	-11 %
Solantausta et al. 1996	39 %	30 %	6 %
Solantausta et al. 1996	33 %	35 %	1 %
Solantausta et al. 1996	31 %	42 %	5 %

BIJLAGE 3: Gegevens economische analyse

Warmte producerende installaties:

Thermisch vermogen [MW]	Thermisch rendement [%]	Afschrijving [jaren]	Draaiuren [uren]	Kapitaals-kost [€/kWh]	Werkings-kost [€/kWh]	Productie-kost [€/kWh]	Warmte-prijs [€/kWh]	Brandstof-kost [€/kWh]	X	Y	Bron
1	0,85	10	2500	0,0140	0,0118	0,0258	0,03	0,006	0,2000	0,8584	ref. 4
1	0,85	10	2500	0,0243	0,0223	0,0465	0,03	0	0,0000	1,5508	ref. 4
5	0,85	10	5000	0,0043	0,0050	0,0093	0,03	0,006	0,2000	0,3089	ref. 4
5	0,85	10	5000	0,0083	0,0075	0,0158	0,03	0	0,0000	0,5256	ref. 4
10	0,85	15	7000	0,0067	0,0092	0,0159	0,03	0,006	0,2000	0,5312	ref. 4
10	0,85	15	7000	0,0086	0,0111	0,0197	0,03	0	0,0000	0,6571	ref. 4
0,3	0,85	10	2500	0,0114	0,0100	0,0214	0,03	0,006	0,2000	0,7120	ref. 13
0,75	0,85	10	2500	0,0085	0,0100	0,0185	0,03	0,006	0,2000	0,6173	ref. 13
3	0,85	10	5000	0,0050	0,0100	0,0150	0,03	0,006	0,2000	0,4990	ref. 13
17,5	0,85	15	7000	0,0109	0,0100	0,0209	0,03	0,006	0,2000	0,6955	ref. 13

Elektriciteit producerende installaties:

	Elektrisch vermogen [MW]	Elektrisch rendement [%]	Afschrijving [jaren]	Draai- uren [uren]	Kapitaals- kost [€/kWh]	Werkings- kost [€/kWh]	Productie- kost [€/kWh]	Stroom- prijs [€/kWh]	Brandstof- kost [€/kWh]	X	Y	Bron
directe meestook	-	0,395	25	7000	0,0005	0,0005	0,0010	0,0740	0,0000	0,0000	0,0134	ref. 14
indirecte meestook	-	0,38	25	7000	0,0061	0,002	0,0081	0,0740	0,0000	0,0000	0,1100	ref. 14
bij separate verg z STG	-	0,38	25	7000	0,0056	0,002	0,0076	0,0740	0,0000	0,0000	0,1026	ref. 14
bij separate verg met LT-STG	-	0,355	25	7000	0,0138	0,002	0,0158	0,0740	0,0000	0,0000	0,2130	ref. 14
bij separate pyrolyse z PSR	-	0,36	25	7000	0,0110	0,002	0,0130	0,0740	0,0000	0,0000	0,1756	ref. 14
bij separate pyrolyse m PSR	-	0,325	25	7000	0,0152	0,002	0,0172	0,0740	0,0000	0,0000	0,2329	ref. 14
bij separate pyrolyse snel	-	0,36	25	7000	0,0115	0,002	0,0135	0,0740	0,0000	0,0000	0,1823	ref. 14
bij separate HTU	-	0,355	25	7000	0,0076	0,002	0,0096	0,0740	0,0000	0,0000	0,1300	ref. 14
bij verbranding met stoom integr.	-	0,385	25	7000	0,0115	0,002	0,0135	0,0740	0,0000	0,0000	0,1831	ref. 14
	0,3	0,2	15	8000	0,0127	0,005	0,0177	0,0740	0,0000	0,0000	0,2389	ref. 13
	0,75	0,2	15	8000	0,0082	0,005	0,0132	0,0740	0,0000	0,0000	0,1784	ref. 13
	1,5	0,2	15	8000	0,0063	0,005	0,0113	0,0740	0,0000	0,0000	0,1532	ref. 13
	3,5	0,25	25	8000	0,0038	0,005	0,0088	0,0740	0,0000	0,0000	0,1194	ref. 13
	12,5	0,25	25	8000	0,0030	0,005	0,0080	0,0740	0,0000	0,0000	0,1083	ref. 13
fuel dedicated	10	0,27	25	7000	0,0289	0,01	0,0389	0,0940	0,0060	0,0638	0,4134	fabrikanten info
fuel dedicated	20	0,29	25	7000	0,0187	0,01	0,0287	0,0940	0,0060	0,0638	0,3049	fabrikanten info
fuel dedicated	20	0,29	25	7000	0,0290	0,01	0,0390	0,0940	0,0060	0,0638	0,4152	fabrikanten info
fuel dedicated	20	0,29	25	7000	0,0293	0,01	0,0393	0,0940	0,0060	0,0638	0,4184	fabrikanten info
fuel dedicated	20	0,29	25	7000	0,0285	0,01	0,0385	0,0940	0,0060	0,0638	0,4091	fabrikanten info
fuel dedicated	2	0,25	25	7000	0,0300	0,01	0,0400	0,0940	0,0060	0,0638	0,4256	fabrikanten info

WKK producerende installaties:

		Elektrisch rendement [%]	Thermisch rendement [%]	Afschrijving [jaren]	Draai-uren [uren]	Kapitaals-kost [€/kWh]	Werkings-kost [€/kWh]	Productie-kost [€/kWh]	Stroom-prijs [€/kWh]	Brandstof-kost [€/kWh]	X	Y	Bron
hetelucht turbine	min.	2,00%	63%	15	4000	0,0437	0,0356	0,0793	0,094	0,006	0,0638	0,8432	ref.2, 7, 15, 17
	gemiddelde	13,50%	67%	15	4000	0,1068	0,0613	0,1681	0,094	0,006	0,0638	1,7885	ref.2, 7, 15, 17
	max.	25,00%	70%	15	4000	0,1728	0,0950	0,2678	0,094	0,006	0,0638	2,8494	ref.2, 7, 15, 17
stirling	min.	6,50%	57%	15	4000	0,0666	0,0000	0,0666	0,094	0,006	0,0638	0,7083	ref.2, 7, 15, 17
	gemiddelde	17,25%	57%	15	4000	0,0709	0,0303	0,1012	0,094	0,006	0,0638	1,0769	ref.2, 7, 15, 17
	max.	28,00%	58%	15	4000	0,0789	0,0686	0,1475	0,094	0,006	0,0638	1,5694	ref.2, 7, 15, 17
stoommotor	min.	6,00%	72%	25	4000	0,0318	0,0030	0,0348	0,094	0,006	0,0638	0,3700	ref.2, 7, 15, 17
	gemiddelde	13,00%	71%	25	4000	0,1001	0,0879	0,1880	0,094	0,006	0,0638	2,0000	ref.2, 7, 15, 17
	max.	20,00%	70%	25	4000	0,1704	0,1808	0,3512	0,094	0,006	0,0638	3,7366	ref.2, 7, 15, 17
stoomturbine	min.	7,00%	63%	25	4000	0,0210	0,0030	0,0240	0,094	0,006	0,0638	0,2548	ref.2, 7, 15, 17
	gemiddelde	14,00%	64%	25	4000	0,0946	0,1424	0,2370	0,094	0,006	0,0638	2,5209	ref.2, 7, 15, 17
	max.	21,00%	64%	25	4000	0,1704	0,2898	0,4602	0,094	0,006	0,0638	4,8953	ref.2, 7, 15, 17
ORC	min.	8,00%	77%	15	4000	0,0489	0,0030	0,0519	0,094	0,006	0,0638	0,5519	ref.2, 7, 15, 17
	gemiddelde	14,00%	71%	15	4000	0,1096	0,0549	0,1645	0,094	0,006	0,0638	1,7504	ref.2, 7, 15, 17
	max.	20,00%	65%	15	4000	0,1734	0,1148	0,2882	0,094	0,006	0,0638	3,0657	ref.2, 7, 15, 17
vergassing+motor	min.	15,00%	55%	15	4000	0,0218	0,0110	0,0328	0,094	0,006	0,0638	0,3490	ref.2, 7, 15, 17
	gemiddelde	23,00%	56%	15	4000	0,0580	0,1495	0,2075	0,094	0,006	0,0638	2,2075	ref.2, 7, 15, 17
	max.	31,00%	57%	15	4000	0,0991	0,2960	0,3951	0,094	0,006	0,0638	4,2030	ref.2, 7, 15, 17
vergassing+turbine steg	min.	20,00%	45%	20	4000	0,0265	0,0030	0,0295	0,094	0,006	0,0638	0,3138	ref.2, 7, 15, 17
	gemiddelde	29,50%	49%	20	4000	0,0443	0,0010	0,0453	0,094	0,006	0,0638	0,4821	ref.2, 7, 15, 17
	max.	39,00%	53%	20	4000	0,0672	0,0070	0,0742	0,094	0,006	0,0638	0,7891	ref.2, 7, 15, 17

BIJLAGE 4: Berekening WKK-certificaten hypthetisch voorbeeld

WKK-installatie			Groen	74	€/MWh
Elektrisch vermogen		1,50E+00			
Elektrische aansluiting		< 15 kV			
totale brandstofbenutting	--	0,80			
alpha E	--	0,15			
alpha H	--	0,65			
Q/E	--	4,3333			
Nominaal elektrisch vermogen	MWe netto	1,5			
Nominaal thermisch vermogen	MWth	6,5			
draaiuren	h/jaar	7000			
Productie					
E-productie	GWh/jaar	10,5			
warmte-/stoomproductie	GWh/jaar	45,500			
warmte-/stoomproductie	GJ/jaar	163800			
stoomproductie	t/h	8			
Verbruik					
gasverbruik	GJ/jaar	0			
Kosten					
<i>vaste kosten</i>					
investeringskost	MEUR	6,7600			
specifieke investeringskost	EUR/kWe	4507			
investeringsaftrek/ecologiesteun	MEUR	2,3			
investeringskost - aftrek/ecologiest.	MEUR	4,5078			
specifieke investeringskost	EUR/kWe	4507			
rentevoet (voor taks)	--	0,08			
looptijd lening	jaar	15			
annuïteit investering	MEUR/Jaar	0,78977			
O&M	MEUR/jaar	0,74805			
specifieke kosten O&M	EUR/kWe	499			
backupkosten	EUR/MWh	0,00			
backupkosten	MEUR/jaar	0,0000			
totaal vaste kosten	MEUR/Jaar	1,5378			
totaal vaste kosten	EUR/MWh	146,46			
<i>variabele kosten</i>					
commodity gas	EUR/MWh	24			

transport en distributie gas	EUR/MWh	0			
gasprijs	EUR/MWh	24			
gasprijs	EUR/GJi	7			
gaskosten	MEUR/Jaar	0,00			
gaskosten	EUR/MWh	0,00			
totale kosten					
totale productiekost	EUR/MWh	146,5			
	EUR/jaar	1537817,7			
Opbrengsten					
<i>stoom (vermeden ketel)</i>					
totale opbrengst (vermeden ketel)	EUR/GJ	6,67			
totale opbrengst (vermeden ketel)	MEUR/Jaar	1,09			
totale opbrengst (vermeden ketel)	EUR/MWh	104,0			
<i>elektriciteit</i>					
commodity elektriciteit	EUR/MWh	64,0			
vermeden netkosten	EUR/MWh	0,0			
bandlevering elektriciteit	EUR/MWh	64,0			
<i>certificaten(*)</i>					
maximale opbrengst certificaten	EUR/MWh	7,88			
schatting marktprijs/boeteprijs	--	0,9			
geschatte werkelijke opbrengst cert.	EUR/MWh	81,09			
Groen	EUR/MWh	74,00			
<i>totaal</i>					
totale opbrengsten	EUR/MWh	249,1			
Resultaat					
winst voor taks, per MWh	EUR/MWh	102,63			
jaarlijkse winst voor taks	EUR/jaar	1077651			
Terugverdientijd	<i>jaar</i>	2,34			
Internal rate of return	--	42,31%			
NAW		€ 10.631.631,58			
Milieu-impact					
Besparing primaire energie	GWh/jaar	4,53			
CO2-uitstoot per GWh	ton/GWh	198,00			
Vermeden CO2-uitstoot	ton/jaar	896,82			
(*) Berekening certificaten					
Elektrisch rendement ref.centrale	--	0,5			
Thermisch rendement ref.ketel	--	0,85			
E-productie voor certificaten	GWh/jaar	10,5			
Relatieve primaire energiebesparing	--	0,0608			

Warmtekrachtbesparingsfactor	<i>GWh/GWh</i>	0,4314			
Totale warmtekrachtbesparing	<i>GWh/jaar</i>	4,53			
Aantal certificaten per jaar (eerste 4j)	<i>MWh/jaar</i>	4529			
Gemiddeld aantal certificaten over 10j	<i>MWh/jaar</i>	1310			
Gemiddelde jaarlijkse opbrengst	<i>EUR/jaar</i>	55162			
Gemiddelde jaarlijkse opbrengst	<i>EUR/MWh</i>	5,25			
(**) Berekening TVT en IRR					
Jaarlijkse kosten zonder investering	<i>EUR/jaar</i>	748050			
Jaarlijkse opbrengst zonder wkk-certificaten	<i>EUR/jaar</i>	2541000			
Jaarlijkse cashflow zonder wkk-certificaten	<i>EUR/jaar</i>	1792950			
Maximaal jaarlijks aantal certificaten	<i>MWh/jaar</i>	4529			
<i>Cashflows met certificaten</i>				Cashflow cumulatief	
jaar 0	<i>EUR/jaar</i>	-4507750		-4507750	0
jaar 1	<i>EUR/jaar</i>	1915244		-2592506	1
jaar 2	<i>EUR/jaar</i>	1935626		-656879	2
jaar 3	<i>EUR/jaar</i>	1956009		1299129	3
jaar 4	<i>EUR/jaar</i>	1976391		3275521	4
jaar 5	<i>EUR/jaar</i>	1937151		5212672	5
jaar 6	<i>EUR/jaar</i>	1864709		7077381	6
jaar 7	<i>EUR/jaar</i>	1792950		8870331	7
jaar 8	<i>EUR/jaar</i>	1792950		10663281	8
jaar 9	<i>EUR/jaar</i>	1792950		12456231	9
jaar 10	<i>EUR/jaar</i>	1792950		14249181	10
jaar 11	<i>EUR/jaar</i>	1792950		16042131	11
jaar 12	<i>EUR/jaar</i>	1792950		17835081	12
jaar 13	<i>EUR/jaar</i>	1792950		19628031	13
jaar 14	<i>EUR/jaar</i>	1792950		21420981	14
jaar 15	<i>EUR/jaar</i>	1792950		23213931	15
<i>Investeringscriteria</i>					
Terugverdientijd	<i>jaar</i>	2,34			
Internal Rate of return IRR	--	42%			
NAW	<i>EUR</i>	€ 10.631.631,58			