



Optimale inzet biomassa  
voor industriële  
energietoepassing



**CE Delft**

Committed to the Environment

## Optimale inzet biomassa voor industriële energietoepassing

Delft, CE Delft, juli 2015

Deze notitie is opgesteld voor:  
COGEN Nederland.

Ons kenmerk: 3.E94

Deze notitie is opgesteld door:  
H.J. (Harry) Croezen  
C. (Cor) Leguijt

© copyright, CE Delft, Delft

**CE Delft**  
**Committed to the Environment**

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

## 1 Samenvatting

In deze (beknopte) studie is verkend wat de optimale inzet is van biomassa voor industriële energievoorziening. Specifiek is gekeken naar de economische en maatschappelijke effecten van stoomproductie met biomassagestookte stoomboilers en met een bestaande warmtekrachtcentrale. De warmtekrachtcentrale (WKC) produceert naast stoom ook elektriciteit, en gebruikt in de configuraties die in deze studie zijn beschouwd zowel gas als biomassa als brandstof.

De onderzoeksvraag is opgekomen omdat er momenteel een trend is in de Nederlandse procesindustrie om bestaande WKC's af te schakelen om bedrijfseconomische redenen. In het verlengde hiervan zijn er diverse initiatieven in de markt ontstaan voor realisatie van biomassa gestookte stoomboilers - zonder elektriciteitsproductie - ter vervanging van stilgelegde of stil te leggen gasgestookte WKC's. Als biomassa worden houtpellets<sup>1</sup> of houtsnippers gebruikt, afhankelijk van de specifieke technische configuratie.

Het vervangen van gasgestookte WKC's door biomassagestookte stoomboilers kent echter ook risico's voor de betreffende industrie en voor de maatschappij, zoals:

- mogelijkheid dat gasprijzen dalen tot structureel lagere waarden, waarin gasgestookte WKC's rendabel zijn en qua productiekosten voor elektriciteit kunnen concurreren met kolencentrales;
- de door sluiting en vervanging van gasgestookte WKC's afnemende capaciteit om bij lage beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit uit wind en zon-PV pieklastvermogen te kunnen leveren;
- er is onduidelijkheid over de lange termijn beschikbaarheid van voldoende grote hoeveelheden aan duurzame biomassa, tegen voldoende lage prijzen, die geschikt is voor productie van industriële stoom.

Het doel van deze beknopte studie is om een vergelijking te maken van enkele configuraties voor productie van industriële stoom op basis van biomassa, met en zonder inzet van bestaande WKC, met als doel te bepalen welke configuratie een optimale business case (financieel) of maatschappelijk gezien (CO<sub>2</sub>-emissies reduceren, bijdrage aan stabiel energiesysteem) heeft.

De variabelen in deze verkenning zijn, onder andere:

- (additionele) investeringen;
- commodityprijzen voor gas, biomassa, elektriciteit, CO<sub>2</sub>-emissie;
- de bedrijfstijden in WKC- en in niet-WKC-modus;
- de waarde van flexibiliteit in elektriciteitsvoorziening (waarde snelle ramp-up/ramp down).

Er zijn in deze studie zes verschillende opties beschouwd voor productie van stoom op basis van biomassa voor industriële processen. De houtpelletgestookte stoomboiler ('pelletboiler', Optie 1) fungeert daarbij de facto als referentie voor de ontwikkelingen in de markt. In deze studie worden de resultaten afgezet tegen die van een gasgestookte WKC, zonder biomassa-inzet. Een uitgebreidere beschrijving van de beschouwde opties is opgenomen in Tabel 8 (Bijlage A).

---

<sup>1</sup> Houtpellets zijn korrels van samengeperst hout.



De vergelijking is uitgevoerd voor een vaste jaarlijks geleverde hoeveelheid warmte (480.000 MWh<sub>th</sub>/jaar) voor industriële processen en een vaste hoeveelheid elektriciteit (274.000 MW<sub>e</sub>/jaar). De warmte wordt steeds door de zes beschouwde configuraties geleverd. De elektriciteit wordt deels op locatie geproduceerd, deels ingekocht van het net, in per configuratie verschillende verhoudingen. Daarbij is reeds uitgegaan van bedrijfseconomisch gangbare inzet van de verschillende soorten installaties.

Voor CO<sub>2</sub>-emissies en gebruik van primaire energie zijn niet alleen de emissies en energiegebruik op locatie meegenomen, maar ook indirect energiegebruik gerelateerd aan productie van ingekochte elektriciteit en CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan eventueel ingekochte elektriciteit.

De verschillende opties en de scores op de verschillende aspecten zijn kwalitatief weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Score van de verschillende configuraties op de aspecten. + is gunstig, - is ongunstig, 0 is 'geen effect'

	Pellet-boiler	Stand alone WKC (o.b.v. biomassa)	Wervelbed-oven, stoomzijdig geïntegreerd	Cycloon-oven	Vergasser op afgassenketel	Vergasser op gasturbine
	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4	Optie 5	Optie 6
Overblijvend van oorspr. WKC	Niets	Niets	Stoomcyclus	Complete WKC	Complete WKC	Complete WKC
Jaarkosten	+ / ++	+	+	+ / + +	+	-
CO <sub>2</sub> -emissies	-	++	+	+	0	+
Primaire energie	-	++	+	+	0	+
Optioneel pieklast met oorspronkelijke gasturbine?	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja	Nee
Brandstof <sup>2</sup>	Pellets	Snippers	Snippers	Pellets + gas	Snippers + gas	Snippers
Technische rijpheid	++	++	+	0	0/+	--

De algemene conclusie uit deze (beknopte) studie is dat de 'cycloonoven' (Optie 4) en de 'vergasser op afgassenketel' (Optie 5) op maatschappelijke aspecten beter scoren als de vervanging van een bestaande WKC door een houtpelletgestookte biomassa-boiler ('pelletboiler', Optie 1), die de facto de huidige standaard in de marktontwikkeling is. Ook op bedrijfseconomische aspecten scoren Optie 4 en (in mindere mate) Optie 5 beter dan Optie 1. Daar dient echter nadrukkelijk bij te worden opgemerkt dat de technische rijpheid van Opties 4 en 5 minder is dan die van Optie 1, die als installatie al technisch bewezen is.

<sup>2</sup> Mogelijk zijn pelletboiler en cycloonoven ook geschikt voor fijn gemalen goedkopere houtsnippers. De cycloonoven wordt bijvoorbeeld in de VS ondervuurd met fijn gemalen houtsnippers uit houtbewerkende bedrijven.



Qua bedrijfsvoering is voor de 'cycloonoven' (Optie 4) en de 'vergasser op afgassenketel' (Optie 5) aangenomen dat deze worden afgestemd op de elektriciteitsprijs:

- Bij piek-elektriciteitsprijzen wordt gas gestookt in de gasturbine voor maximale elektriciteitsproductie en wordt levering van hete rookgassen door de cycloonoven of stookgas door de vergasser geminimaliseerd.
- Bij lage elektriciteitsprijzen wordt de gasturbine afgeschakeld en wordt enkel hoge drukstoom geproduceerd op basis van hete rookgassen uit de cycloonoven of door 'bijstook' van stookgas uit de vergasser.

De opties zijn qua technische rijpheid in twee verschillende klassen verdeelbaar:

1. Technisch (ruimschoots) bewezen opties - Opties 1 t/m 3.
2. Nog deels in ontwikkeling zijnde opties - Opties 4 t/m 6.

Van de technisch nog gedeeltelijk in ontwikkeling zijnde opties (Opties 4-6) lijkt vooral het voorschakelen van een houtpelletgestookte cycloonoven bij de afgassenketel van een bestaande WKC (de vierde optie in de tabel) interessant:

- Het is van alle beschouwde zes opties de goedkoopste optie.
- Deze optie heeft de grootste flexibiliteit qua brandstofinzet en biedt ook de mogelijkheid voor pieklastproductie van elektriciteit. Dit kan een belangrijk voordeel zijn wanneer het aandeel hernieuwbare energie uit wind en zon-PV in de productiemix toeneemt omdat op deze manier back-up vermogen beschikbaar blijft.
- Gebruik van primaire energie en CO<sub>2</sub>-emissies zijn niet zo laag als bij een stand alone WKC met hoge stoomparameters, maar zijn wel duidelijk lager dan emissies en primair energiegebruik bij een pelletboiler.

Gezien de mogelijke voordelen van dit concept doen wij de aanbeveling in ieder geval het concept 'voorschakelen van een cycloonoven' en daarnaast ook het concept 'vergasser op afgassenketel' nader te onderzoeken op de volgende aspecten:

- bedrijfszekerheid, met name wat betreft het functioneren van de hoge temperatuur rookgasontstopping;
- investeringskosten en operationele kosten, het maken van een preciezere schatting van de investeringen op basis van een compleet predesign ontwerp;
- optimale bedrijfsvoering van een cycloonoven in combinatie met pieklast-bedrijf van de gasturbine van de oorspronkelijke WKC.

Als kanttekening moet worden opgemerkt dat deze opties alleen relevant zijn bij bestaande WKC's waarvan de resterende technische levensduur voldoende lang is, en er voldoende ruimte is voor de *handling* van de biomassastromen.

Onze verwachting is dat een TKI-project een uitstekend platform zou zijn voor dergelijke onderzoeken.

## 2 Inleiding

### 2.1 Aanleiding

In deze studie wordt de optimale inzet verkend van biomassa voor industriële energietoepassing. Meer specifiek: De economische en maatschappelijke effecten van de productie van stoom voor industriële afnemers op basis van biomassa wordt vergeleken met de effecten van stoomproductie door gasgestookte WKC's<sup>3</sup>.

De onderzoeksvraag is opgekomen omdat er momenteel een trend is in de Nederlandse procesindustrie om bestaande WKC's af te schakelen om bedrijfs-economische redenen. In het verlengde hiervan zijn er diverse initiatieven in de markt ontstaan voor realisatie van pelletboilers - biomassagestookte stoomboilers - zonder elektriciteitsproductie - ter vervanging van stilgelegde of stil te leggen gasgestookte WKC's.

Er zijn echter risico's met betrekking tot de benodigde biomassa:

- Misschien dat er op korte termijn een aanbod is aan goedkope biomassa, maar blijft dat zo - raakt dit aanbod niet ooit op en komen de prijzen dan niet te liggen op het huidige gangbare niveau van commercieel verhandelde industriële houtpellets?
- Is goedkope biomassa uit bijvoorbeeld de VS straks nog beschikbaar voor export naar Nederland/EU?
- In hoeverre is er een duurzaamheidsrisico - blijft het areaal waar de biomassa aan onttrokken wordt (intensief gebruikt) productiebos of is er sprake van ontbossing en landgebruikverandering? Indien dit het geval is: zou een dergelijke landgebruikverandering acceptabel zijn onder de in het kader van het SER Energieakkoord afgesproken duurzaamheidscriteria voor biomassa?

Een ander risico betreft de huidige gas- en elektriciteitsprijzen en de CO<sub>2</sub>-emissieprijzen:

- De huidige combinatie van gas- en elektriciteitsprijzen waren de afgelopen jaren voor gasgestookte WKC's niet aantrekkelijk, maar blijft dat zo in de (nabije) toekomst? De huidige gas commodityprijs bedraagt bijvoorbeeld € 6,50/GJ en niet meer de € 9/GJ waarvan wordt uitgegaan in deze studie (gebaseerd op een eerder scenario).
- Aan de andere kant: gebruik van biomassa voor stoomproductie of WKC is energetisch en ecologisch een hoogefficiënte verwerking van biomassa. Bij de huidige lage CO<sub>2</sub>-emissieprijzen levert die efficiency echter vrijwel niets op. Maar blijven die CO<sub>2</sub>-emissieprijzen zo laag?

Daarnaast geeft het vervangen van de gasgestookte WKC door sec een hout-pelletgestookte stoomboiler in combinatie met een toenemend aandeel elektriciteit uit zon-PV en windvermogen het risico dat er een moment komt dat er op een windstille en bewolkte dag niet genoeg elektriciteit kan worden opgewekt.

Met een multi-fuelconfiguratie geschikt voor én (goedkope) biomassa én aardgas<sup>4</sup> en een snel op- en afregelbare gasturbine kan in principe meer flexibiliteit worden gegenereerd, wat die risico's deels vermindert.

<sup>3</sup> WKC = warmtekrachtcentrale.

<sup>4</sup> Het aardgas kan op den duur vervangen worden door groen gas.



## 2.2 Insteek en doel

Het doel van deze beknopte studie is om een vergelijking te maken van enkele configuraties voor productie van industriële stoom, met en zonder inzet van bestaande WKC, met als doel te bepalen:

- Welke configuratie een optimale business case (financieel) of maatschappelijke case (CO<sub>2</sub>-emissies reduceren, rol in stabiel energiesysteem) heeft, waarbij de variabelen zijn:
  - o.a. (additionele) investeringen;
  - commodityprijzen voor gas, biomassa, elektriciteit, CO<sub>2</sub>-emissie;
  - de bedrijfstijden in WKC en in niet-WKC-modus;
  - de waarde van elektriciteitsflexibiliteit (waarde snelle ramp-up/ramp-down).

De configuraties worden daarbij in een grotere scenario-omgeving beschouwd in de vorm van de gehele Nederlandse energiemarkt.

De studie gaat daarnaast in op maatschappelijke kosten en baten, waar mogelijk kwantitatief, anders kwalitatief, zoals de duurzaamheid en leveringszekerheid van biomassa.

Het is de bedoeling dat de uitkomst gebruikt kan worden in de lopende discussies over de invulling van stoomproductie bij de industrie.

Met het oog op de invloed van aspecten als een toenemend aandeel hernieuwbare elektriciteit uit zon-PV en windvermogen in de productiemix en hogere CO<sub>2</sub>-prijzen is uitgegaan van 2030 als zichtjaar.

### Leeswijzer

De beschouwde technische opties voor productie van stoom voor industriële processen worden geïntroduceerd in Hoofdstuk 3. Er wordt ingegaan op de specificaties van de verschillende opties zoals rendement, investeringen en toepasbare biomassa. Ook wordt de technische rijpheid van de verschillende opties beschouwd. Er wordt steeds vergeleken met een gasgestookte WKC, dus zonder biomassa-inzet.

In Hoofdstuk 4 worden de verschillende opties vergeleken op jaarkosten, CO<sub>2</sub>-emissies en gebruik van primaire energie.

In Hoofdstuk 5 zijn de conclusies verrat die op basis van de vergelijking in Hoofdstuk 4 kunnen worden getrokken.

Nadere details zoals de in deze studie aangehouden biomassa-specificaties en prijs-duurkrommen voor de elektriciteitsprijs zijn in de bijlage opgenomen.



## 3 Uitgangspunten voor de vergelijkig

### 3.1 Beschouwde opties voor toepassing van biomassa voor industriële stoomproductie en WKC

In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de ons bekende technische opties om biomassa te gebruiken voor stoomproductie in industriële stand-alone installaties. De verschillende technieken zijn globaal geëvalueerd op:

- kosten, jaarkosten voor afschrijvingen, onderhoud, brandstofinkoop, elektriciteitinkoop, CO<sub>2</sub>-kosten;
- technische rijpheid (zie Paragraaf 3.2);
- flexibiliteit qua elektrisch vermogen;
- totaalgebruik van primaire energie, zowel voor op locatie gebruikte biomassa en aardgas als indirect energiegebruik gerelateerd aan productie van ingekochte elektriciteit;
- CO<sub>2</sub>-emissies op locatie en gerelateerd aan eventueel ingekochte elektriciteit.

Opgemerkt moet worden dat het in stand houden van een bestaande WKC alleen relevant is indien de resterende levensduur van de WKC lang genoeg is. Verder moet er lokaal ruimte zijn voor de *handling* van de benodigde biomassa. Beide zaken betreffen installatiespecifieke kwesties die in deze globalere studie naar optimale inzet van biomassa niet zijn beschouwd (dit is iets voor een eventueel vervolgonderzoek).

#### Referentie-installatie en oorspronkelijke WKC

Om een vergelijking te kunnen maken is een referentie nodig voor een schaal-grootte die ook voor biomassagestookte ketels gangbaar is en tegelijkertijd vergelijkbaar is met de schaalgrootte van in Nederland bij industriële bedrijven opgestelde gasgestookte WKC's. Als eerste benadering is uitgegaan van een referentie WKC met volgende specificaties:

- 25 MW<sub>e</sub> gasturbine ( $T_{\text{rookgas}} = 535^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta_e = 35\%$ ) en 11 MW<sub>e</sub> stoomturbine;
- verse stoom van 420°C, 70 bar;
- bijstook van 45 MW<sub>gas</sub> in de HD-afgassenketel;
- stoomlevering van 60 MW<sub>th</sub> op 170°C en condensaat retour op 100°C.

De specificaties zijn ontleend aan gegevens voor WKC's in papierindustrie en voedingsmiddelenindustrie (VNP, 2003), (CE Delft ; DNV GL, 2014), (diverse websites).

#### Jaarlijkse warmtebehoefte en elektriciteitsbehoefte

Voor de vergelijking is steeds de benodigde warmtelevering als ijkpunt genomen. Er is uitgegaan van levering gedurende 8.000 vollast equivalenturen per jaar en een totale hoeveelheid van 480.000 MWh<sub>th</sub>/jaar.

Ook voor elektriciteit is steeds uitgegaan van een gelijke hoeveelheid per jaar. De hoeveelheid is afgestemd op jaarproductie door het systeem biomassa-vergasser geïntegreerd met gasturbine. In deze configuratie wordt bij 8.000 uur productie op vollast 274.000 MW<sub>e</sub>/jaar geproduceerd.

Er is voor de andere biomassatoepassingsopties aangenomen dat hierin dezelfde hoeveelheid elektriciteit nodig is en dat deze waar qua configuratie mogelijk deels in eigen beheer wordt opgewekt, deels (of voor de pelletboiler: volledig) wordt ingekocht van het net.





### **Aangehouden prijsniveaus**

Voor de prijsniveaus voor het aangehouden zichtjaar 2030 (zie Paragraaf 2.2) is uitgegaan van de scenario's aangehouden in (CE Delft, 2014). Omdat in deze studie voor het ministerie van Economische Zaken in verschillende scenario's voor CO<sub>2</sub>-beprijzing en stroommix is geëvalueerd wat de concurrentiepositie van warmtekrachtkoppeling is, was het logisch bij deze studie aan te sluiten.



Tabel 2 Beschouwde opties voor gebruik van biomassa als brandstof voor industriële stoomproductie. In eerste rijen van de tabel zijn zowel de meer technische beschrijvingen voor de opties als de termen en nummering zoals gehanteerd in Tabel 1 opgenomen. + is gunstig, - is ongunstig, 0 is 'geen effect'

Benaming uit Tabel 1	Pelletboiler	Stand alone WKC (o.b.v. biomassa)	Wervelbedoven, stoomzijdig geïntegreerd	Cycloonoven	Cycloonoven	Vergasser op afgassenketel	Vergasser op gasturbine
Nummering van de optie	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4a	Optie 4b	Optie 5	Optie 6
Vermogens en rendementen WKC							
- Brandstof, MW	67	85	79	79	79	84	124
- Ketelrendement	92%	92%	92%	92%	92%	74%	82%
- Warmte							
• Vermogen, MW	60	60	60	60	60	60	60
• Rendement	90%	71%	76%	76%	76%	72%	48%
- Elektriciteit							
• Vermogen, MW		17	11	11	11	10	34
• Rendement		20%	14%	14%	14%	11%	28%
Kosten							
- Investering	27	94	72	20	20	50	193
- OPEX vaste jaarlasten	1,9	9,8	9,1	2,3	2,3	9,7	14,3
- OPEX €/GJ brandstof	1	4	4	1	1	4	4
Technische rijpheid	++	++	+	0/+		0/+	--
Overblijvend van oorspr. STEG	Niets	Niets	Stoomturbine	Complete WKC		Complete WKC	Complete WKC
Gebruikte brandstof	Pellets	Snippers	Snippers	Pellets + gas	Snippers + gas	Snippers + gas	Snippers
Mogelijkheden piekvermogen, MW <sub>e</sub>	0	0	0	36		36	0
Leveranciers	Kvaerner, Metso, Foster - Wheeler, Andritz, ...			Andritz, Babcock & Wilcox, Weiss, Onix, Saacke, ..		Metso, Carbona, Andritz	
Voorbeelden	Zeer veel installaties in m.n. Scandinavië		AVI Moerdijk, stroboilers in Denemarken bij kolen-centrales	Veel installaties bij plaatmateriaal producenten, kolencentrales in USA en BRD		Skive, Corenso Varkaus, Lahti	Geen

Er zijn voor CO<sub>2</sub>-beprijzing en voor het aandeel zon-PV en windvermogen drie scenario's beschouwd, conform (CE Delft, 2014).

De prijsduurkromme voor de elektriciteitsprijs in deze drie scenario's is opgenomen in Bijlage B. De aangehouden prijzen en opgesteld vermogen aan zon-PV en wind zijn in Tabel 3 gegeven.

Tabel 3 Uitgangspunten aangehouden scenario's - alle scenario's zichtjaar 2030

	Basis-scenario	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs	2030 - Groene revolutie
<b>Prijzen</b>			
Gas (€/GJ)	9	9	9
Elektriciteit (€/MWh), gemiddeld	60	74	53
CO <sub>2</sub> -prijs €/ton	25	71	25
Opgesteld vermogen zon-PV en wind, GW	20	20	30

Bron: CE Delft, 2014. De scenario's zijn opgesteld voor een wkk-studie voor het ministerie EZ.

Voor het illustreren van de effecten van de gasprijs op de kosten is indicatief ook een analyse uitgevoerd voor een gasprijs van € 7/GJ. De analyse is indicatief omdat bij deze gasprijzen de prijsduurkrommen voor de elektriciteitsprijzen in de drie CO<sub>2</sub>-beprijzingsscenario's eigenlijk niet aansluiten bij deze gasprijs. De illustratie geeft echter wel inzicht in de effecten van de gasprijs op de jaarkosten voor de verschillende technische opties.

### Biomassa

Voor het illustreren van de effecten van de biomassaprijs zijn twee soorten biomassa beschouwd:

1. Gecertificeerde industriële pellets met een prijs van € 9/GJ.
2. Houtsnippers met een prijs van € 5/GJ.

De prijzen zijn ontleend aan het SDE+-advies voor 2015 (ECN, 2014).

Voor de optie cycloonoven zijn de jaarkosten voor beide soorten biomassa geschat. De cycloonoven wordt gestookt met houtstof. Houtstof kan makkelijker uit pellets worden geproduceerd vanwege de grotere hardheid van pellets, maar malen van houtsnippers tot houtstof is tegenwoordig ook mogelijk.

Voor wervelbedovens (stand alone WKC en stoomzijdig geïntegreerde WKC) en wervelbedvergassers lijkt het logisch om alleen snippers te beschouwen gezien de geschiktheid van dit soort reactoren voor (droge) snippers en de aangehouden prijs voor houtsnippers. Voor de optie pelletboiler wordt in het werkveld alleen gesproken in relatie tot pelletimport.

Qua productie is aangenomen dat pelletboiler, stand alone WKC, stoomzijdig geïntegreerde WKC en de biomassavergasser geïntegreerd met de gasturbine van de oorspronkelijke WKC de volledige 8.000 vollastuurequivalenten op biomassa draaien.



Voor de opties cycloonoven en vergasser geïntegreerd met de afgassenketel van de oorspronkelijke WKC is daarnaast ook geanalyseerd hoe jaarkosten variëren met het aantal uren waarin met aardgas piekvermogen aan het elektriciteitsnet wordt geleverd. Qua op- en afschakelsnelheid van geleverd vermogen is een cycloonoven superieur aan een wervelbedoven.

### 3.2 Technische rijpheid

Qua technische rijpheid is alleen vergassing in combinatie met inzet van laag calorisch synthesesgas uit biomassa nog geen volwassen technologie. Er zijn enkele demonstratie-eenheden waarbij laagcalorisch synthesesgas uit biomassa in gasmotoren wordt verbrand, maar de combinatie met een gasturbine is tot nu toe alleen in Varnamo gedemonstreerd in de jaren '90 in een inmiddels alleen nog voor onderzoeksdoeleinden gebruikte installatie<sup>5</sup>.

Biomassa gestookte boilers en WKC-installaties zijn standaardtechnologie met brede toepassing in met name de papierindustrie in Scandinavië<sup>6</sup>.

Houtstofgestookte ketels worden vooral toegepast in stadsverwarmings-eenheden in Scandinavië. Vaak betreft het ketels oorspronkelijk ontworpen voor poederkool of olie, die door vervanging van de branders zijn omgebouwd naar houtstof ondervuring (Ingenia, 2005).

Stoomzijdige integratie wordt voornamelijk toegepast voor verbranding van lastige brandstoffen als afval en stro, zie bijvoorbeeld AVI Moerdijk in Nederland of diverse strogestookte centrales in Denemarken.

Vergassing als voorbehandeling om biomassa geschikt te maken voor verbranding of meestoken wordt al enkele decennia toegepast in combinatie met kalkovens, cementovens en kolencentrales<sup>5</sup>.

De combinatie met een gasketel en hoge temperatuur keramisch filter wordt sinds bijna drie jaar gedemonstreerd<sup>7</sup> met beschikbaarheden > 80% in het eerste jaar. Initiële problemen in het eerste jaar met het keramisch filter bij opstart en afschakelen zijn inmiddels verholpen.

---

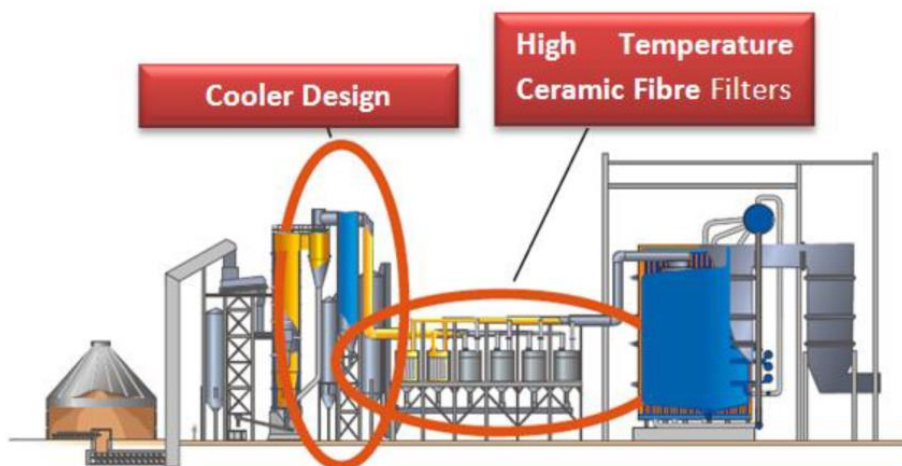
<sup>5</sup> Zie: [www.ieatask33.org/content/thermal\\_gasification\\_facilities](http://www.ieatask33.org/content/thermal_gasification_facilities)

<sup>6</sup> Zie bijvoorbeeld: [www.opet-chp.net/download/wp2/small\\_scale\\_biomass\\_chp\\_technologies.pdf](http://www.opet-chp.net/download/wp2/small_scale_biomass_chp_technologies.pdf)

<sup>7</sup> Zie: [www.valmet.com/en/infocenter/news.nsf/NewsItems/1851150?OpenDocument](http://www.valmet.com/en/infocenter/news.nsf/NewsItems/1851150?OpenDocument)

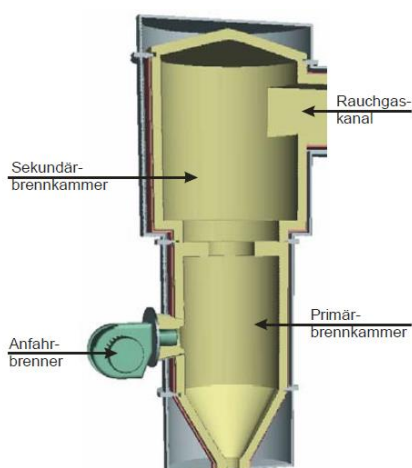


Figuur 1 De 160 MW RDF-vergasser met keramisch filter van Metso in Lahti



Bron: [conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/4\\_1\\_%20Juhani%20Isaksson.pdf](http://conference.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/4_1_%20Juhani%20Isaksson.pdf)

Figuur 2 Voorbeelden van een tweekamer cycloonoven (Andritz Eco-dry) en een éénkamer cycloonoven (ONIX) bij een droogtrommel voor hout



Bron: [www.theonixcorp.com/combustion.html#8](http://www.theonixcorp.com/combustion.html#8)

Cyclonovens zijn standaard technologie voor ondermeer bruinkool- en steenkoolsoorten met een laag assmelpunt, gedroogde RWZI-slib en houtachtige brandstoffen. Slak of assen worden vaak voor >90% (tot 99%) afgescheiden in de cycloonoven zelf. Rookgassen kunnen worden gebruikt voor drogen (bijvoorbeeld van houtsnippers bij pelletproductie) of voor stoomproductie in een aparte boiler.

De combinatie met hoge temperatuur (500-750°C) is niet gebruikelijk. Gebruik van keramische filters - of filters van gesinterd metaal of metaalgaren - bij deze temperaturen is wel gebruikelijk, bijvoorbeeld bij catcrackers in raffinaderijen of als zelfreinigende roetfilters voor dieselmotoren.

<sup>8</sup> Zie: [www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10689314\\_46576/286682dc/KI%C3%A4rschlammstudie%20Steiermark.pdf](http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10689314_46576/286682dc/KI%C3%A4rschlammstudie%20Steiermark.pdf)

Als disclaimer dient te worden opgemerkt dat integratie van afzonderlijk bewezen technieken tot één nieuwe installatie niet automatisch inhoudt dat de nieuwe installatie ook automatisch volgens verwachting functioneert.

### 3.3 Investerings

Ten opzichte van de referentie in de vorm van een houtpelletsgestookte LD-boiler (specifieke investering conform SDE+ € 400/kW) vergen alle opties - behalve een voorgeschakelde vuurhaard - een veelvoud aan investeringskosten. Aangehouden informatiebronnen en referentie-installaties zijn:

- biomassa stoomketel: SDE+ advies 2015;
- biomassa WKC: SDE+ advies 2015, voor geïntegreerde ketel gecorrigeerd voor investeringen voor stoomturbine (€ 300/kW<sub>e</sub><sup>9</sup>);
- biomassa cycloonoven met keramisch filter voor hoge temperatuur ontstopping: technologieleveranciers;
- vergasser met keramisch filter voor hoge temperatuur ontstopping: de 160 MW SRF-vergasser van Metso in Lahti<sup>7</sup>;
- vergasser geïntegreerd met gasturbine: recentelijk bijgestelde investeringsbedragen voor Skive, Denemarken<sup>10</sup> (gecorrigeerd voor investeringen in gasmotoren - € 500/kW<sub>e</sub>).

De investeringen voor een met de afgassenketel geïntegreerde vergasser is een ruwe schatting. In een presentatie wordt aangegeven dat de totale installatie bestaande met naast brandstofopslag, vergassers, gaskoeler en keramische filters (400 °C) ook een gasgestookte boiler, SCR, droge ontzwaveling en meet- en regelapparatuur als geheel M€160 aan investering heeft gekost. Geschat is dat iets meer dan de helft besteed is aan vergasser en gasfiltratie. Een uitsplitsing van de investeringen kon nog niet worden gevonden, waardoor een preciezere inschatting nog niet mogelijk is.

Bij integratie met een bestaande afgassenketel is misschien nog wel een SNCR en in ieder geval een aparte verbrandingskamer nodig om rookgassen op voor de afgassenketel voldoende lage temperatuur te produceren.

### 3.4 Rookgaseigenschappen en massabalans vergelijking voor cycloonoven

Bij voorschakelen van een cycloonoven - of een vergasser met nageschakelde verbrandingskamer voor in ieder geval een deel van het synthesegas - wordt rookgas uit een andere brandstof aangeboden aan de afgassenketel.

Gecontroleerd is middels een globale massa- en energiebalans of de rookgasvolumes en de soortelijke warmte per volume-eenheid rookgas vergelijkbaar zijn. De balansen zijn weergegeven in Figuur 3. De volumes en de soortelijke warmte zijn weergegeven in Tabel 4.

Zoals de vergelijkingen illustreren zijn de rookgasvolumes en de soortelijke warmte per eenheid rookgasvolumes voor rookgassen uit aardgas of biomassa goed vergelijkbaar.

Op basis hiervan zou kunnen worden geconcludeerd dat voorschakelen van een cycloonoven qua warmteoverdracht in de afgassenketel geen technische problemen hoeft op te leveren.

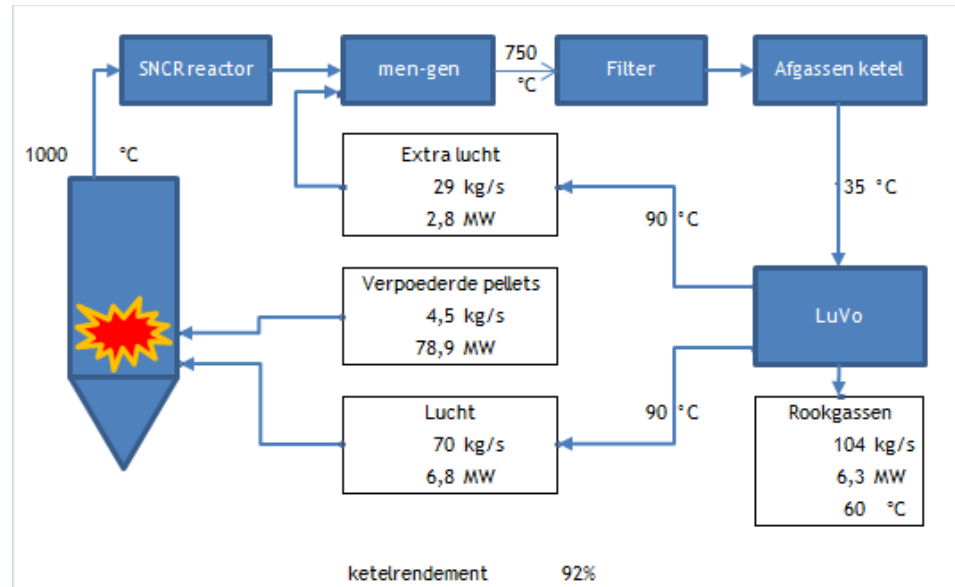
---

<sup>9</sup> De kostenschätzung voor de stoomturbine zijn gebaseerd op cursusmateriaal van Cogen Nederland.

<sup>10</sup> Zie: [www.ieabcc.nl/workshops/task32\\_Copenhagen/11%20Skive.pdf](http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_Copenhagen/11%20Skive.pdf)



Figuur 3 Massabalans en energiebalans voor cycloonoven voorschakelen



Tabel 4 Vergelijking rookgasvolumes en soortelijke warmte van rookgassen uit aardgas en uit biomassa

	Aardgas			Biomassa		
	Nm <sup>3</sup> /s	kg/s	kJ/kg·°K	Nm <sup>3</sup> /s	kg/s	kJ/kg·°K
- N <sub>2</sub>	61,6	77,0	1,1	60,0	75,0	1,1
- O <sub>2</sub>	10,2	14,6	1,0	11,9	17,0	1,0
- Ar	0,7	1,3	0,5	0,5	0,9	0,5
- CO <sub>2</sub>	3,2	6,2	1,1	4,0	7,8	1,1
- H <sub>2</sub> O	6,8	5,7	2,1	3,9	3,2	2,1
	82,5	104,8	118,0	80,2	104,0	114,7
			Somproduct kg/s x kJ/kg·°K			Somproduct kg/s x kJ/kg·°K

Bij gecertificeerde industriële pellets is verder naar verwachting het gehalte aan zwavel zo laag dat geen problemen met zwavelzuurcondensatie te verwachten zijn. Hoge temperatuur ontstopping met hoge efficiëntie en beperking van de vuurhaardtemperatuur door voorkomt problemen met asafzetting, verslakking en erosie.

## 4 Resultaten van de vergelijking van de opties

### 4.1 Jaarkosten

#### Totale kosten

Zoals geïllustreerd in Figuur 4 zijn de totale jaarkosten bij de aangehouden prijzen voor CO<sub>2</sub>, elektriciteit en aardgas duidelijk het laagst voor een cycloonoven gestookt met verpoederde (drogere) houtchips (Optie 4b).

Ook bij pelletstoken in een cycloonoven (Optie 4a) is stoomproductie met een voorgeschakelde cycloonoven goedkoper, voornamelijk vanwege de lagere investeringskosten in vergelijking met de pelletboiler (Optie 1). Maar deze twee technische opties en beide op wervelbedovens gebaseerde opties (Opties 2 en 3, 'Stand alone WKC' en 'Wervelbedoven stoomzijdig geïntegreerd') zijn niet echt onderscheidend wat betreft jaarkosten - alle jaarkosten liggen binnen een bereik van ongeveer M€ 5/jaar van elkaar. Gesteld zou kunnen worden dat de hogere investeringen voor wervelbedreactoren in Opties 2 en 3 worden gecompenseerd door de lagere brandstofkosten. Bij een hogere CO<sub>2</sub>-prijs is een stand alone WKC (Optie 2) even duur als een pelletboiler (Optie 1) vanwege de hogere elektriciteitsprijs en de daardoor hogere inkoopkosten bij Optie 1.

Integratie van een vergasser met de afgassenketel van een bestaande gasgestookte WKC (Optie 5) geeft - ondanks de relatief lage investeringen - iets hogere jaarkosten vanwege het lagere energetische rendement.

Een biomassavergasser integreren met de gasturbine van bestaande WKC (Optie 6) is circa 50% duurder dan de andere opties vanwege de hoge investeringen.

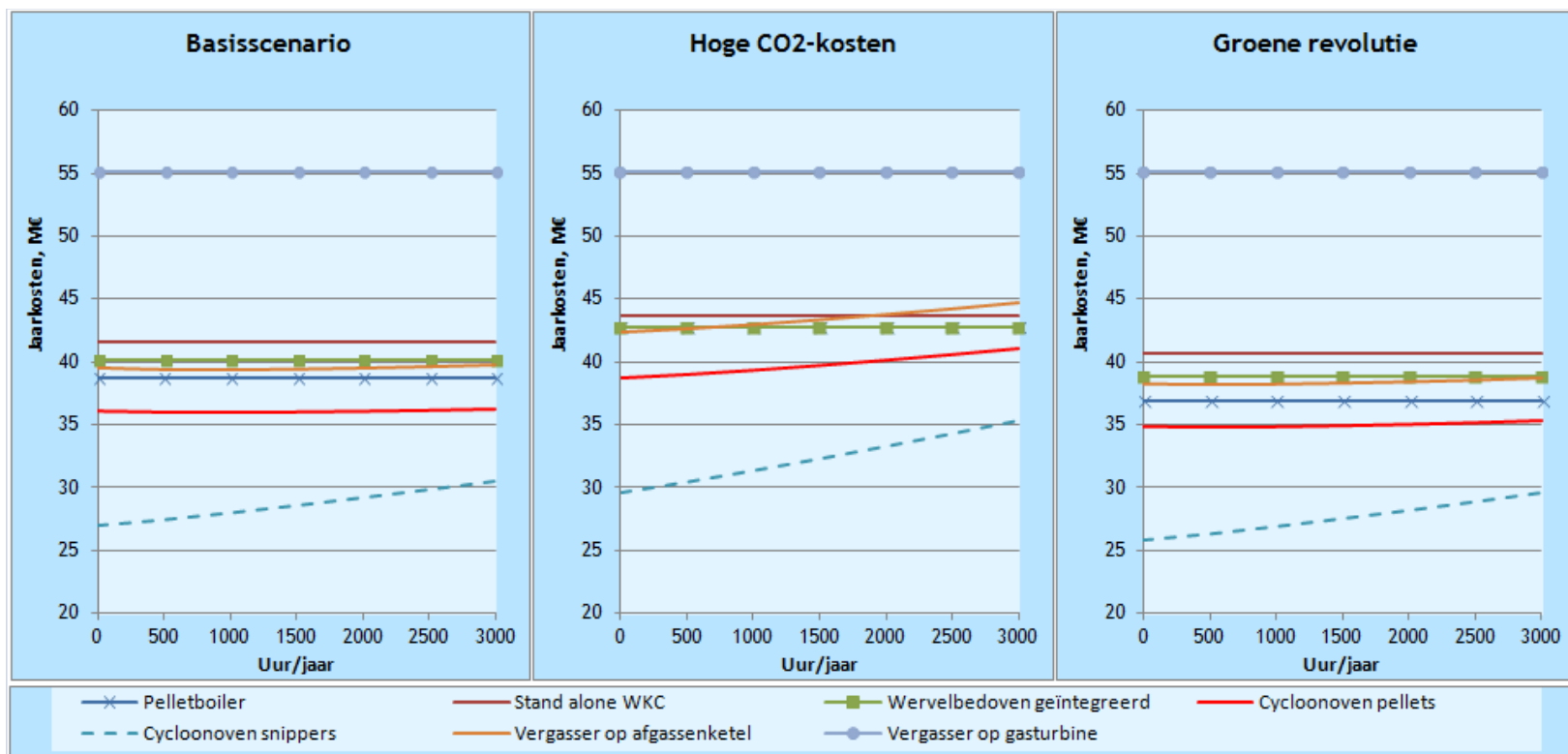
Piekvermogen leveren middels gasstook in de oorspronkelijke WKC bij een configuratie met een op de afgassenketel geïntegreerd cycloonoven (Optie 4) of vergasser (Optie 5) biedt bij de beschouwde prijzen geen voordeel - zie de volgende subparagraaf. De reden is dat bij gasstook het totale energetisch rendement over de WKC lager is dan bij biomassa-inzet in een cycloonoven of vergasser, terwijl de prijs voor aardgas en biomassa gelijk is. De hogere brandstofvraag per eenheid nuttig product bij gasstook betekent ook hogere totale kosten per eenheid nuttig product.

Bij een lagere gasprijs is er echter wel een kostendaling met toenemend aantal uren waarin piekvermogen wordt geleverd, zie Figuur 5. Door de in vergelijking met de biomassaprijs lagere gasprijs wordt het hogere brandstofgebruik meer dan gecompenseerd door de lagere brandstofprijs.





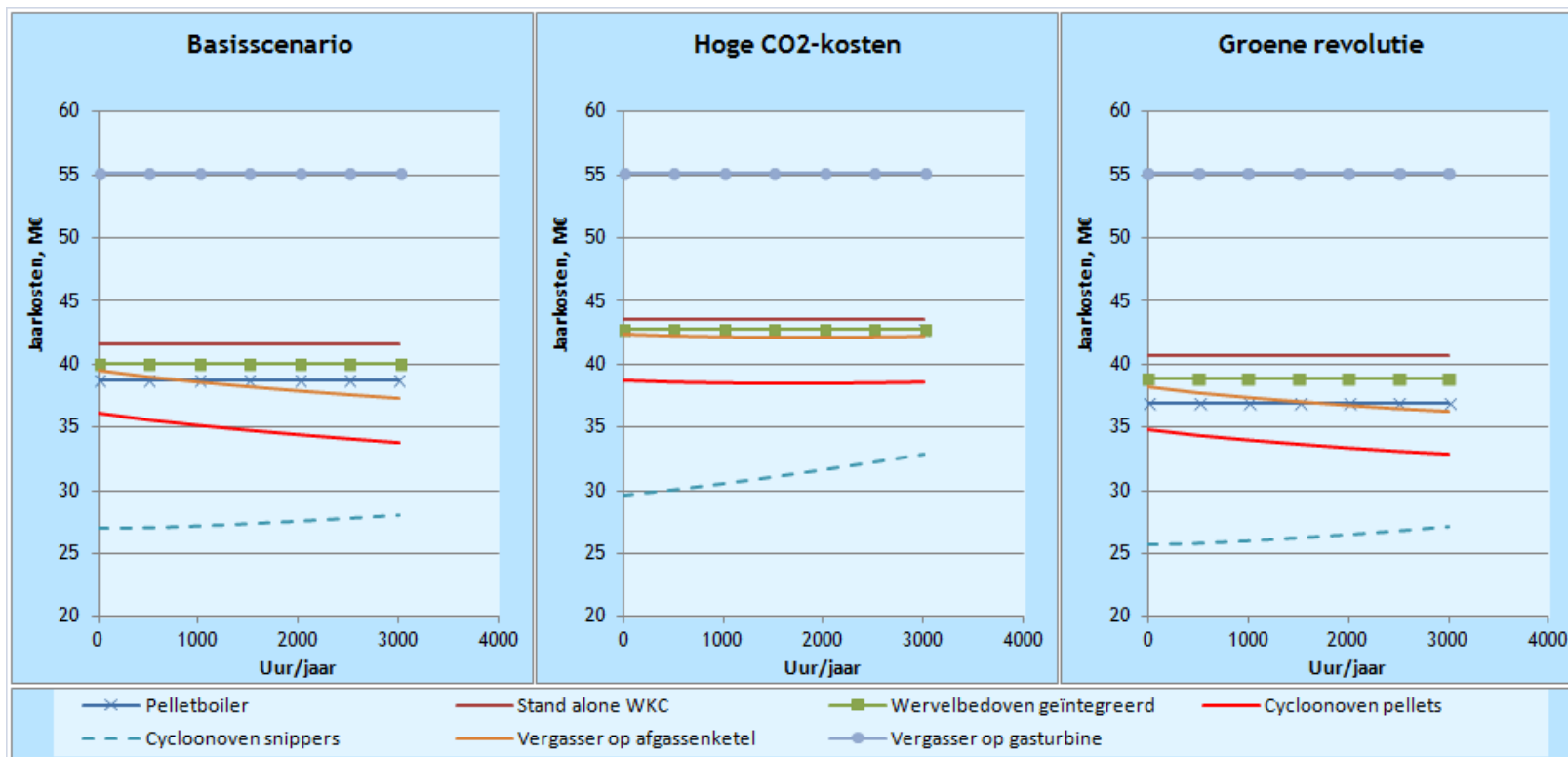
Figuur 4 Totale jaarkosten voor hogere gasprijzen (€ 9/GJ) en voor de drie beschouwde CO<sub>2</sub>-beprijingsscenario's



Toelichting:

Pelletboiler =	Optie 1	Cyclooven pellets =	Optie 4a
Stand alone WKC =	Optie 2	Cyclooven snippers =	Optie 4b
Wervelbedoven (stoomzijdig) geïntegreerd =	Optie 3	Vergasser op afgassenketel =	Optie 5
		Vergasser op gasturbine =	Optie 6

Figuur 5 Totale jaarkosten voor lagere gasprijzen (€ 7/GJ) en voor de drie beschouwde CO<sub>2</sub>-beprijzingsscenario's



Toelichting:

Pelletboiler =	Optie 1	Cycloonoven pellets =	Optie 4a
Stand alone WKC =	Optie 2	Cycloonoven snippers =	Optie 4b
Wervelbedoven (stoomzijdig) geïntegreerd =	Optie 3	Vergasser op afgassenketel =	Optie 5
		Vergasser op gasturbine =	Optie 6

## Opbouw jaarkosten

Ter illustratie van de opbouw zijn in Tabel 5 en Tabel 6 de opbouw van de jaarkosten gegeven voor pelletboiler (Optie 1) en pelletgestookte cycloonoven (Optie 4).

Tabel 5 Opbouw jaarkosten pelletboiler (Optie 1) voor drie CO<sub>2</sub>-beprijzingsscenario's

	Basisscenario	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs	2030 - Groene revolutie
Jaarkosten, M€	38,8	42,7	36,9
- Kapitaallast	3,2	3,2	3,2
- OPEX vaste jaarlasten	1,9	1,9	1,9
- Brandstof	17,3	17,3	17,3
- CO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0
- Elektra-inkoop	16,4	20,3	14,5
<b>Totaal</b>	<b>38,8</b>	<b>42,7</b>	<b>36,9</b>

Tabel 6 Opbouw jaarkosten pelletgestookte cycloonoven (Optie 4a) voor drie CO<sub>2</sub>-beprijzingsscenario's

	Basisscenario		Hoge CO <sub>2</sub> -prijs		2030 - Groene revolutie	
Uren piekvermogen	0	3.000	0	3.000	0	3.000
Jaarkosten, M€	36,1	36,0	38,8	39,7	34,9	34,9
- Kapitaallast	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
- OPEX vaste jaarlasten	2,3	2,4	2,3	2,4	2,3	2,4
- Brandstof	20,5	22,1	20,5	22,1	20,5	22,1
- CO <sub>2</sub>	0,0	0,9	0,0	2,5	0,0	0,9
- Elektra-inkoop	11,0	8,2	13,6	10,4	9,7	7,1

Bron: Prijsniveaus CE Delft, 2014.

De brandstofkosten en de elektriciteitsinkoopkosten vormen steeds het leeuwendeel van de jaarkosten. De brandstofkosten hangen sterk samen met de aard van de brandstof; pellets of snippers. Ze hangen daarnaast sterk samen met het rendement over de totale installatie en dus met de hoeveelheid brandstof per eenheid geleverd nuttige energie.

Bij de aangehouden biomasprijs en gasprijs loont pieklastproductie van elektriciteit door inzet van de gasgestookte WKC in Optie 4 niet. In het basisscenario en het groene revolutiescenario worden eventuele voordelen in de vorm van lagere kosten voor elektriciteitsinkoop teniet gedaan door hogere CO<sub>2</sub>-kosten en hogere brandstofkosten (door het minder gunstige rendement bij gasstook).

## 4.2 Primaire energie en CO<sub>2</sub>-emissies

In zijn CO<sub>2</sub>-emissies en gebruik van primaire energie gegeven als functie van aantal uren waarin piekvermogen wordt geleverd met de gasgestookte WKC.

De pelletboiler (Optie 1) is één van de goedkoopste opties, maar het is ook de optie met de hoogste CO<sub>2</sub>-emissie en het hoogste gebruik aan primaire energie. Dit resultaat heeft vooral te maken met de productie van de in deze

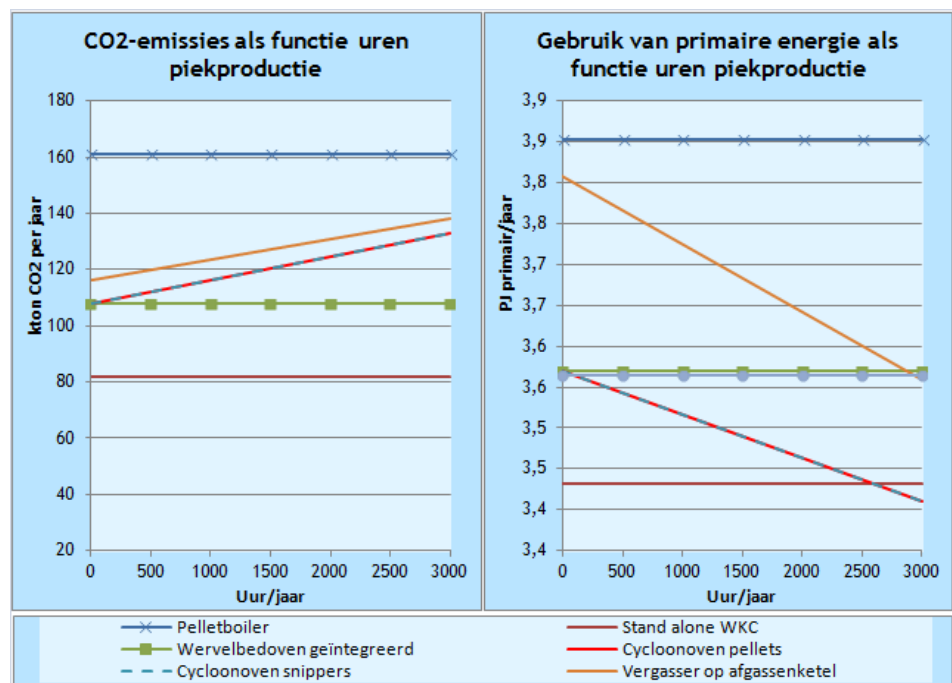
optie in te kopen elektriciteit<sup>11</sup>.

Hoe meer elektriciteit op locatie kan worden geproduceerd uit WKC-bedrijf met biomassa als brandstof, des gunstiger CO<sub>2</sub>-emissies en gebruik van primaire energie zijn.

Bij integratie van een cycloonooven of vergasser met de afgassenketel van een bestaande gasgestookte WKC (Optie 4 en 5) nemen CO<sub>2</sub>-emissies toe, maar het gebruik van primaire energie neemt af met toenemend aantal uren waarin piek-vermogen wordt geleverd. De afname in primaire energie heeft te maken met de - in vergelijking met het gemiddelde productiepark met een hoog aandeel kolenstroom - netto hogere elektrische rendement van de WKC-STEG. De CO<sub>2</sub>-emissies nemen toe doordat niet alleen CO<sub>2</sub>-intensieve elektriciteit van het centrale productiepark wordt vervangen, maar ook CO<sub>2</sub>-neutrale op biomassa- gebaseerde warmteproductie.

Waarschijnlijk is het optimaler alleen aardgas in de gasturbine in te zetten en alleen voldoende aardgas in de afgassenketel bij te stoken om de rookgassen uit de gasturbine op de benodigde temperatuur van 750 °C te brengen.

Figuur 6 CO<sub>2</sub>-emissies en gebruik van primaire energie als functie van aantal uren waarin piekvermogen



Toelichting:

Pelletboiler =	Optie 1	Cycloonooven pellets =	Optie 4a
Stand alone WKC =	Optie 2	Cycloonooven snippers =	Optie 4b
Wervelbedoven (stoomzijdig) geïntegreerd =	Optie 3	Vergasser op afgassenketel =	Optie 5
		Vergasser op gasturbine =	Optie 6

<sup>11</sup> Er is in deze vergelijking voor CO<sub>2</sub>-emissies en primair energiegebruik per eenheid ingekochte elektriciteit uitgegaan van het referentie productiepark uit (CE Delft, 2014). Hierbij is uitgegaan van een mix van kolenvermogen (45% rendement) en gasvermogen (60% rendement) met een aandeel gasvermogen in totale jaarlijkse elektriciteitproductie van 40%.

### 4.3 Overige aspecten

Een ander aspect dat in deze studie beschouwd wordt is de brandstof-flexibiliteit met het oog op een eventuele periode met lage gasprijs of met het oog op beperkte beschikbaarheid van biomassa of meer specifiek goedkope biomassa.

Tabel 7 Vergelijking van de beschouwde opties qua brandstofflexibiliteit

Pellet-boiler	Stand alone WKC	Wervel-bedoven stoomzijdig geïntegreerd	Cycloon-oven	Vergasser op afgassen ketel	Vergasser op gasturbine
Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4	Optie 5	Optie 6
0 / +	-	-	+ / + +	++	++

Van de beschouwde technische opties zijn de op wervelbedovens gebaseerde opties (Opties 2 en 3, 'Stand alone WKC' en 'Wervelbedoven stoomzijdig geïntegreerd') de minst flexibele. Van de oorspronkelijke WKC blijft niets over, terwijl volledig overschakelen op aardgas niet mogelijk is. Bij een blijvende beperkte beschikbaarheid aan goedkope biomassa worden deze opties duur.

Waarschijnlijk kan de pelletboiler (Optie 1) wel worden omgebouwd naar gasstook bij lage gasprijzen en/of bij beperkte beschikbaarheid van biomassa.

Bij een met afgassenketel geïntegreerde cycloonoven (Optie 4) of een met afgassenketel of gasturbine geïntegreerde vergasser is de brandstofflexibiliteit (Opties 5 en 6) qua omschakelen naar aardgas optimaal. De wervelbed-vergasser in Opties 5 en 6 biedt ook optimale flexibiliteit qua inzet van biomassa (snippers of pellets).

Mogelijk zijn de pelletboiler en de cycloonoven ook geschikt voor fijngemalen goedkopere houtsnippers. De cycloonoven wordt bijvoorbeeld in de VS ondervuurd met fijngemalen houtsnippers uit houtbewerkende bedrijven.

## 5 Conclusies

Er zijn in deze studie zes verschillende opties beschouwd voor productie van stoom op basis van biomassa voor industriële processen. Deze worden steeds vergeleken met een gasgestookte WKC, dus zonder biomassa-inzet.

De algemene conclusie uit deze (beknopte) studie is dat de ‘cycloonoven’ (Optie 4) en de ‘vergasser op afgassenketel’ (Optie 5) op maatschappelijke aspecten beter scoren dan de vervanging van een bestaande WKC door een houtpelletgestookte biomassa-boiler (‘pelletboiler’, Optie 1), die de facto de huidige standaard in de marktontwikkeling is. Ook op bedrijfseconomische aspecten scoren Optie 4 en (in mindere mate) Optie 5 beter dan Optie 1. Daar dient echter nadrukkelijk bij te worden opgemerkt dat de technische rijpheid van Opties 4 en 5 minder is dan die van Optie 1, die als installatie al technisch bewezen is.

Qua bedrijfsvoering is voor de ‘cycloonoven’ (Optie 4) en de ‘vergasser op afgassenketel’ (Optie 5) aangenomen dat deze wordt afgestemd op de elektriciteitsprijs:

- bij piek elektriciteitsprijzen wordt gas gestookt in de gasturbine voor maximale elektriciteitsproductie en wordt levering van hete rookgassen door de cycloonoven of stookgas door de vergasser geminimaliseerd;
- bij lage elektriciteitsprijzen wordt de gasturbine afgeschakeld en wordt enkel hoge druk stoom geproduceerd op basis van hete rookgassen uit de cycloonoven of door ‘bijstook’ van stookgas uit de vergasser.

De opties zijn qua technische rijpheid in twee verschillende klassen verdeelbaar:

1. Technisch (ruimschoots) bewezen opties - Opties 1 t/m 3.
2. Nog deels in ontwikkeling zijnde opties - Opties 4 t/m 6.

Bij de reeds technisch bewezen opties is de pelletboiler (Optie 1) relatief iets goedkoper, maar geeft deze optie wel een significant hoger gebruik aan primaire energie en een significant hogere CO<sub>2</sub>-emissie dan Opties 2 en 3. Dit heeft vooral te maken met het volledig moeten inkopen van elektriciteit bij de optie pelletboiler.

Geconcludeerd moet worden dat gebruik van biomassa voor productie van industriële warmte middels de optie pelletboiler (Optie 1) maatschappelijk gezien minder efficiënt is dan beide andere opties.

Van de technisch nog gedeeltelijk in ontwikkeling zijnde opties (Opties 4-6) lijkt vooral het voorschakelen van een houtpelletgestookte cycloonoven bij de afgassenketel van een bestaande WKC (de vierde optie in de tabel) interessant:

- Het is van alle beschouwde zes opties de goedkoopste optie.
- Deze optie heeft de grootste flexibiliteit qua brandstofinzet en biedt ook de mogelijkheid voor pieklastproductie van elektriciteit. Dit kan een belangrijk voordeel zijn wanneer het aandeel hernieuwbare energie uit wind en zon-PV in de productiemix toeneemt omdat op deze manier back-up vermogen beschikbaar blijft.
- Gebruik van primaire energie en CO<sub>2</sub>-emissies zijn niet zo laag als bij een stand alone WKC met hoge stoomparameters, maar zijn wel duidelijk lager dan emissies en primair energiegebruik bij een pelletboiler.



Gezien de mogelijke voordelen van dit concept doen wij de aanbeveling in ieder geval het concept 'voorschakelen van een cycloonoven' en daarnaast ook het concept 'vergasser op afgassenketel' nader te onderzoeken op de volgende aspecten:

- bedrijfszekerheid, met name wat betreft het functioneren van de hoge temperatuur rookgasontstopping;
- investeringskosten en operationele kosten, het maken van een preciezere schatting van de investeringen op basis van een compleet predesign ontwerp;
- optimale bedrijfsvoering van een cycloonoven in combinatie met pieklastbedrijf van de gasturbine van de oorspronkelijke WKC.

Als kanttekening moet worden opgemerkt dat deze opties alleen relevant zijn bij WKC's waarvan de resterende technische levensduur voldoende lang is. Ook moet er voldoende ruimte zijn voor de *handling* van de benodigde biomassa.

Onze verwachting is dat een TKI-project een uitstekend platform zou zijn voor dergelijke onderzoeken.



## 6 Literatuur

Air Liquide Industrie bv, 2011. Use of Medal membranes in CO/H<sub>2</sub> separation. [Online]

Available at:

<http://deltalingsenergyforum.nl/documents/Nieuwsbrief%20november%202011/Scheidingstechnologie/Air%20Liquide%20-%20Jaap%20Oldenziel%20-%20Use%20of%20Medal%20membranes%20in%20COH2%20separation.pdf>

[Geopend 2015].

Aster Thermoakoestische Systemen, 2009. Haalbaarheidsstudie TAP : SBIR opdracht, fase 1. [Online]

Available at: <http://vnp.nl/wp-content/uploads/2014/01/14-Thermo-Acoustic-Power-TAP-van-industri%C3%ABle-restwarmte-naar-elektriciteit.pdf>

[Geopend 2015].

Brandin, J., Tunér, M. & Odenbrand, I., 2011. Small Scale Gasification : Gas Engine CHP for Biofuels, Växjö/Lund: Linnaeus University.

CE Delft ; DNV GL, 2014. Toekomst WKK en warmtevoorziening industrie en glastuinbouw, Delft: CE Delft.

ECN, 2014. Conceptadvies basisbedragen SDE+ 2015 voor marktconsultatie, Petten: ECN.

Highbeam Business, 1994. PNEM cuts NO<sub>x</sub> with GT10 combined cycle cogen plants. (Dutch utility NV Provinciale Noordbrabantse Energie Maatschappij; cogeneration power plant). [Online]

Available at: <http://business.highbeam.com/4364/article-1G1-15208225/pnem-cuts-nox-gt10-combined-cycle-cogen-plants>

[Geopend 2015].

IEA Bioenergy, [2015]. The Task 33 / Thermal Gasification of Biomass : Thermal Gasification Facilities. [Online]

Available at:

[http://www.ieatask33.org/content/thermal\\_gasification\\_facilities](http://www.ieatask33.org/content/thermal_gasification_facilities)

[Geopend 2015].

Ingenia, 2005. Symposium 'bio-energie in de industrie' donderdag 17 maart. Eindhoven, Ingenia.

Jacobs Consultancy, 2009. Techno-Economische Parameters, MEP/SDE WKK 2008, Leiden: Jacobs Consultancy.

LinkedIn, 2015. Remie Herben Operator Meldkamer Techniek bij azM / Maastricht UMC+. [Online]

Available at: <https://www.linkedin.com/pub/remie-herben/b/3a3/a82/nl>

[Geopend 2015].





Maintenance Benelux, 2013. Nieuw filterconcept moet leiden tot forse energiebesparing ; Crown Van Gelder schakelt EFC Filtration in voor gedegen advies. [Online]  
Available at: <http://www.maintenancebenelux.nl/magazine/2013/MP2013-3p20.pdf>  
[Geopend 2015].

VNP, 2003. Energieverbruik in de Nederlandse papier-en kartonindustrie, Hoofddorp: Koninklijke vereniging van Nederlandse papier en kartonfabrieken (VNP).



## Bijlage A Beschouwde configuraties

Tabel 8 Overzicht van beschouwde configuraties voor inzet van inzet van biomassa voor industriële warmte

Ref	Type	Beschrijving
	Gasgestookte WKC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De oorspronkelijke gasgestookte industriële WKC betreft een gasturbine met een afgassenketel met bijstook voor productie van hoge druk (420 °C, 70 bar) stoom.</li> <li>- De afgassenketel kan volledig worden bijgestookt.</li> <li>- Stoom wordt deels geëxpandeerd in een tegendruk stoomturbine voor elektriciteitsproductie. Stoom van 170 °C wordt aan het industriële proces geleverd.</li> </ul>
1	Pelletboiler	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deze installatie komt volledig in de plaats van de oorspronkelijke gasgestookte WKC.</li> <li>- De installatie betreft een stoomketel voor lage druk (170 °C, 8 bar) stoom.</li> <li>- Er wordt geen elektriciteit geproduceerd.</li> <li>- De vuurhaard is een stofwolk vuurhaard die wordt gestookt met verpoederde houtpellets.</li> <li>- De boiler heeft een rookgasreiniging bestaande uit stoffilter met absorbensinjectie en een SNCR DeNO<sub>x</sub>.</li> </ul>
2	Stand alone WKC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deze installatie komt volledig in de plaats van de oorspronkelijke gasgestookte WKC.</li> <li>- De installatie betreft een stoomketel voor hoge druk (515 °C, 95 bar) stoom.</li> <li>- Stoom wordt deels geëxpandeerd in een tegendruk stoomturbine voor elektriciteitsproductie. Stoom van 170 °C wordt aan het industriële proces geleverd.</li> <li>- De vuurhaard is een met houtsnippersgestookte wervelbedoven.</li> <li>- De boiler heeft een rookgasreiniging bestaande uit stoffilter met absorbensinjectie en een SNCR DeNO<sub>x</sub>.</li> </ul>
3	Wervelbedoven stoomzijdig geïntegreerd	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deze installatie wordt geïntegreerd met de stoomcyclus van de oorspronkelijke gasgestookte WKC.</li> <li>- De installatie betreft een stoomketel voor hoge druk (420 °C, 70 bar) stoom.</li> <li>- De geproduceerde stoom wordt geleverd aan de stoomcyclus van de oorspronkelijke gasgestookte WKC.</li> <li>- Stoom wordt deels geëxpandeerd in een tegendruk stoomturbine voor elektriciteitsproductie. Stoom van 170 °C wordt aan het industriële proces geleverd.</li> <li>- De vuurhaard is een met houtsnippersgestookte wervelbedoven.</li> <li>- De boiler heeft een rookgasreiniging bestaande uit stoffilter met absorbensinjectie en een SNCR DeNO<sub>x</sub>.</li> </ul>
4	Cycloonoven	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De installatie betreft een cycloonoven die hete rookgassen levert aan de afgassenketel van de oorspronkelijke gasgestookte WKC, die volledig intact kan blijven.</li> <li>- De vuurhaard is een stofwolk vuurhaard die wordt gestookt met verpoederde houtpellets.</li> <li>- De rookgassen worden voor levering aan de afgassenketel eerst met een hoge temperatuur filter en een SNCR DeNO<sub>x</sub> gereinigd.</li> <li>- De brandstof voor de installatie is zowel biomassa als gas.</li> <li>- Bedrijfsvoering wordt afgestemd op elektriciteitsprijs: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij piek-elektriciteitsprijzen wordt gas gestookt in de gasturbine voor maximale elektriciteitsproductie en wordt levering van hete rookgassen door de cycloonoven geminimaliseerd.</li> <li>• Bij lage elektriciteitsprijzen wordt de gasturbine afgeschakeld en wordt enkel hoge druk stoom geproduceerd op basis van hete rookgassen uit de cycloonoven.</li> </ul> </li> </ul>

	Type	Beschrijving
5	Vergasser op afgassenketel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– De installatie betreft een houtsnippers vergasser die laagcalorisch stookgas voor bijstook levert aan de afgassenketel van de oorspronkelijke gasgestookte WKC, die volledig intact kan blijven.</li> <li>– Het stookgas wordt voor levering aan de afgassenketel eerst met een hoge temperatuur filter gereinigd.</li> <li>– De brandstof voor de installatie is zowel biomassa als gas.</li> <li>– Bedrijfsvoering wordt afgestemd op elektriciteitsprijs: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij piek elektriciteitsprijzen wordt gas gestookt in de gasturbine voor maximale elektriciteitsproductie en wordt levering van stookgas door de vergasser geminimaliseerd.</li> <li>• Bij lage elektriciteitsprijzen wordt de gasturbine afgeschakeld en wordt enkel hoge druk stoom geproduceerd op basis van ‘bijstook’ van stookgas uit de vergasser.</li> </ul> </li> </ul>
6	Vergasser op gasturbine	<ul style="list-style-type: none"> <li>– De installatie betreft een houtsnippervergasser die laagcalorisch stookgas levert aan de gasturbine en (voor bijstook) de afgassenketel van de oorspronkelijke gasgestookte WKC.</li> </ul>

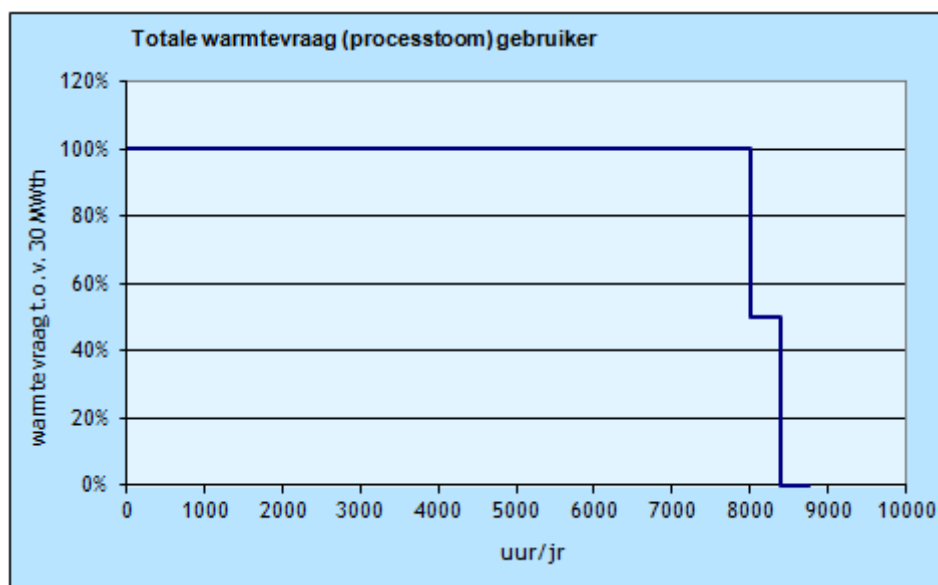


## Bijlage B Uitgangspunten

### B.1 Warmtevraag

De stoom wordt geleverd aan een industrieel proces met een vrijwel constante warmtevraag, afgezien van perioden met storingen. De storingen worden verondersteld evenredig over dag/nacht en het jaar op te treden.

Figuur 7 Warmtevraagprofiel over het jaar



Bron: Eigen inschatting.

Er wordt verder aangenomen dat de stoom volledig wordt getourneerd als condensaat op 110°C en dat ketelvoedingswater op 115°C aan de ketel wordt gevoed.

### B.2 Prijzen voor energie en CO<sub>2</sub>

Prijzen voor CO<sub>2</sub> en aardgas zijn ontleend aan de door CE Delft en DNV uitgevoerde studie naar de concurrentiepositie van WKC op de Nederlandse energiemarkt (zie Tabel 9).

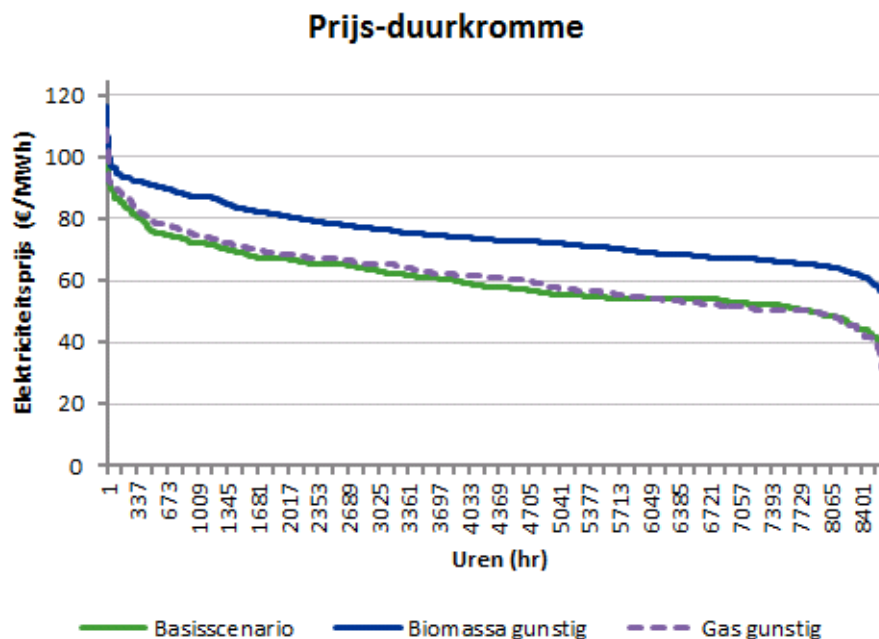
Bijbehorende elektriciteitsprijzen zijn weergegeven in Figuur 8.

Tabel 9 Uitgangspunten aangehouden scenario's

	Basisscenario	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs	2030 - Groene revolutie
Prijzen			
Gas (€/GJ)	9	9	9
Elektriciteit (€/MWh), gemiddeld	59,7	74,3	53,1
CO <sub>2</sub> -prijs €/ton	25	71	25
Opgesteld vermogen zon-PV en wind, GW	20	20	30

Bron: (CE Delft ; DNV GL, 2014).

Figuur 8 Prijs-duurcurve per scenario



Bron: CE Delft, 2014.

### B.3 Biomassapellets

Er is conform de kwaliteit van op de markt aangeboden industriële pellets (zie ECN Phyllis database) uitgegaan van pellets met de in Tabel 10 gegeven specificaties.

Tabel 10 Aangehouden biomassa specificaties

Samenstelling	
Vochtgehalte	7,2%
Asgehalte	0,5%
C	47,0%
H	5,8%
O	39,4%
N	0,2%
S	0,02%
Stookwaarde	17,4

Bron: ECN Phyllis database.

De specificaties voldoen aan de IWPB specificatie-eisen voor industriële pellets.

Conform SDE+ zal worden uitgegaan van een prijs van € 150 bij een stookwaarde van 17 GJ/ton (8,8 €/GJ) als bovengrens.

Voor de ondergrens wordt voorgesteld om uit te gaan van de prijs van snoeihout zoals genoemd in (ECN, 2014): Als referentieprijs is 48 €/ton aangenomen of 5,3 €/GJ.

## B.4 Biomassa vuurhaard geïntegreerd met bestaande afgassenketel

In dit alternatief wordt een vuurhaard geplaatst voor de afgassenketel van de bestaande gasgestookte referentie WKC (Tabel 8, referentie) om als substituuut voor de gasturbine warmte aan de afgassenketel te leveren.

De vuurhaard bestaat uit een betegelde ruimte met getrapte verbranding. Pellets worden verpoederd en poeder wordt pneumatisch met verbrandingslucht in de low-NO<sub>x</sub>-poederbrander ingezet<sup>12</sup>. De verbrandingskamer is voorzien van SNCR voor NO<sub>x</sub>-reductie.

Figuur 9 Voorbeeld van een vuurhaard voor productie van heet gas



Bron: [www.saacke.com/products/combustion-chambershot-gas-generators/ccs-ht/](http://www.saacke.com/products/combustion-chambershot-gas-generators/ccs-ht/)

De rookgassen worden in een keramisch filter (bijvoorbeeld van BWF Envirotec) met katalytische denitrificatiecapaciteit ontstoft en na menging met verse lucht door de afgassenketel geleid. Voor optimalisatie van het energetisch rendement wordt de resterende warmte van de rookgassen na de afgassenketel benut voor voorverwarmen van de verbrandingslucht. Voor verwijdering van de laatste sporen aan luchtverontreinigende stoffen en maximaliseren van het rendement kan eventueel gebruik worden gemaakt van een rookgascondensator.

Een prijsopgave van een leverancier van een dergelijke verbrandingskamer komt uit voor een schaalgrootte van 30 MW<sub>th</sub> op een specifieke investering van € 25/kW<sub>th</sub>. De verbrandingskamer is uitgerust met een ultra low-NO<sub>x</sub>-brander voor houtstof.

Een bijbehorend keramisch filter uitgelegd op een rookgastemperatuur van 700 °C en een restconcentratie PM<sup>10</sup> van 5 mg/Nm<sup>3</sup> (11vol% O<sub>2</sub>, droog) kost volgens opgave van de leverancier € 11/kW<sub>th</sub>.

In beide gevallen betreft het de kale apparaatkosten. Voor totale investeringen voor geïnstalleerde apparatuur wordt uitgegaan van een totaalbedrag van (afgerond) € 75/kW<sub>th</sub> en voor de complete configuratie - inclusief DeNO<sub>x</sub>, aansluiting op bestaande rookgaskanalen en warmtewisselaar voor voorverwarmen van verbrandingslucht van €100/kW<sub>th</sub>.

<sup>12</sup> Alternatief is een onderschroefvuring. Hierbij is het niet nodig te investeren in een hamermolen met zeef.

Voor de opslag, verpoederen en interne transporten is vooralsnog uitgegaan van een specifieke investering van € 100/kW<sub>th</sub>. De totale investering wordt zekerheidshalve geschat op € 250/kW<sub>th</sub>.

