



# Toekomst warmtekrachtkoppeling en warmtevoorziening industrie en glastuinbouw

## **Rapport**

Delft, oktober 2014

## **Opgesteld door:**

CE Delft: Ab de Buck  
Sebastiaan Hers  
Maarten Afman  
Harry Croezen  
Frans Rooijers

DNV GL: Wim van der Veen  
Pieter van der Wijk  
Thijs Slot



# Colofon

## Bibliotheekgegevens rapport:

Ab de Buck, Sebastiaan Hers, Maarten Afman, Harry Croezen, Frans Rooijers (allen CE Delft)  
Wim van der Veen, Pieter van der Wijk, Thijs Slot (allen DNV GL)  
Toekomst WKK en warmtevoorziening industrie en glastuinbouw  
Delft, CE Delft, oktober 2014

Industrie / Glastuinbouw / Energievoorziening / Warmte / Warmtekrachtkoppeling / Effecten /  
Capaciteit / Rendement / Energieverbruik / Emissies / Kooldioxide

Publicatienummer: 14.3D38.67

Opdrachtgever: Ministerie van Economische Zaken  
Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Ab de Buck.

© 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.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Achtergrond	7
1.2	Uitvoering onderzoek	9
1.3	Leeswijzer	9
<b>2</b>	<b>Opbouw WKK-park</b>	<b>11</b>
2.1	WKK-park per 01/01/2014	11
2.2	Flexibel en must-run	12
2.3	Ontwikkeling over de afgelopen jaren	15
<b>3</b>	<b>Positie WKK in energiemarkt 2020/2030</b>	<b>17</b>
3.1	Aanpak	17
3.2	Elektriciteitsmarkt 2020	19
3.3	Marktpositie WKK in 2020	20
3.4	Raming afschakeling WKK-vermogen	22
3.5	Marktpositie WKK in 2030	22
3.6	Positie van WKK in 2030 bij andere scenario's	23
<b>4</b>	<b>Impact afschakelen WKK op energiegebruik en CO<sub>2</sub>-emissies</b>	<b>29</b>
4.1	Welke installaties zullen bij wegvallen van WKK de productie van warmte en elektriciteit overnemen?	29
4.2	Impact op primair energiegebruik	31
4.3	Impact op finaal energiegebruik	32
4.4	Impact op emissies CO <sub>2</sub>	32
4.5	Impact op andere emissies	33
<b>5</b>	<b>Positie flexibele WKK in energiemarkt 2030</b>	<b>35</b>
5.1	Rentabiliteit flexibele vs. must-run WKK-installaties	35
5.2	Ombouw van must-run naar flexibele WKK	37
5.3	Positie WKK bij opvangen schaarste-situaties	37
5.4	Positie flexibele WKK bij opvangen overschotsituaties	39
5.5	Huidige beloning van flexibiliteit	40
5.6	Extra kosten voor flexibiliteit	41
<b>6</b>	<b>Opties voor efficiënte en/of duurzame invulling warmtevraag industrie</b>	<b>43</b>
6.1	Toegepaste alternatieven voor verduurzaming opwekking warmte	43
6.2	Andere alternatieven	47
6.3	Besparingspotentiëlen, kosten en bijdrage aan doelstellingen voor hernieuwbare energie	48
<b>7</b>	<b>Conclusies</b>	<b>51</b>

	<b>Bibliografie</b>	<b>57</b>
<b>Bijlage A</b>	<b>Stuurgroep en klankbordgroep</b>	<b>61</b>
<b>Bijlage B</b>	<b>WKK-productiepark per 01-01-2014</b>	<b>63</b>
<b>Bijlage C</b>	<b>Flexibiliseren WKK-installaties</b>	<b>67</b>
<b>Bijlage D</b>	<b>NO<sub>x</sub>-emissies WKK-installaties</b>	<b>71</b>
<b>Bijlage E</b>	<b>Uitgangspunten scenario's</b>	<b>73</b>
<b>Bijlage F</b>	<b>Simulatiemodel Noordwest-Europese markt: beschrijving model en uitgangspunten</b>	<b>77</b>
F.1	Beschrijvingsmodel	77
F.2	Productiepark Nederland	78
F.3	Interconnectie capaciteit	79
F.4	Productiepark in omliggende landen	80
F.5	WKK-park Nederland	81
<b>Bijlage G</b>	<b>Rentabiliteitsmodel</b>	<b>83</b>
<b>Bijlage H</b>	<b>Elektriciteitsmarkt in de scenario's</b>	<b>87</b>
<b>Bijlage I</b>	<b>Marktpositie WKK-eenheden op basis van variabele kosten/baten</b>	<b>93</b>
<b>Bijlage J</b>	<b>Resultaten modellering rentabiliteitsmodel</b>	<b>99</b>
J.1	Basisscenario 2020	99
J.2	Basisscenario 2030	101
J.3	2030 - Hoge CO <sub>2</sub> -prijzen	103
J.4	2030 - Veel hernieuwbaar	105
J.5	2030 - mark-up (€8,1/ MWh)	107
J.6	Positie must-run en flexibele WKK-installaties in 2030-scenario's met hoog aandeel HE, mark-up en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	109
<b>Bijlage K</b>	<b>Berekening impact afschakeling WKK-vermogen op primair energiegebruik en emissies CO<sub>2</sub></b>	<b>111</b>
<b>Bijlage L</b>	<b>Suggesties uit case-studies</b>	<b>115</b>

# Samenvatting

Met WKK, WarmteKrachtKoppeling, wordt gecombineerd elektriciteit en warmte opgewekt, met een hoog rendement. De huidige marktcondities voor WKK zijn ongunstig. Dit kan leiden tot afschakelen van WKK's, wat nadelige gevolgen kan hebben voor energiegebruik en emissies.

Het Ministerie van EZ heeft daarom aan CE Delft en DNV GL gevraagd om de toekomstige positie van WKK in kaart te brengen. Specifieke aandachtspunten zijn de positie van flexibele WKK in een markt met veel hernieuwbaar vermogen, en de mogelijkheden van alternatieve oplossingen om in de warmtevraag te voorzien.

## Marktpositie WKK in 2020 en 2030

Uit een gedetailleerde simulatie voor de Noordwest-Europese markt blijkt dat de huidige zwakke marktpositie van WKK de komende jaren niet vanzelf verbetert. Het simulatiemodel laat zien dat op basis van variabele kosten must-run WKK's niet kostendekkend opereren, en flexibele WKK's marginaal. Als daarnaast ook investeringen worden meegenomen, blijkt dat in 2020 meer dan de helft van de WKK-installaties in 2020 een onrendabele top heeft. De overige installaties zijn net rendabel. Uitgangspunt bij deze berekening is een basisscenario van de IEA voor ontwikkeling van brandstof en CO<sub>2</sub>-prijzen en de afspraken in het SER Energieakkoord voor de ontwikkeling van hernieuwbare energie. Berekeningen zijn uitgevoerd met het onrendabele top model dat het ECN tot in 2009 hanteerde in het kader van vaststelling van SDE-subsidies voor WKK. Voor financieringslasten geldt daarbij het uitgangspunt van 80% vreemd vermogen met 6% rendement, en 20% eigen vermogen met 15% rendement.

De simulatie laat zien dat onder de voorziene marktcondities andere gasgestookte elektriciteitscentrales in een nog moeilijker positie verkeren. Uit het simulatiemodel blijkt dat in 2030 de marktpositie van WKK-installaties gunstiger zal zijn dan in 2020. Er is dan in Duitsland, België en Nederland veel fossiel en nucleair vermogen uit bedrijf genomen, leidend tot hogere elektriciteitsprijzen. Deze berekening gaat uit van het park per 01/01/2014, en houdt er geen rekening mee dat dan mogelijk al veel WKK-installaties uit bedrijf zijn genomen.

De positie van WKK-installaties in 2030 is ook onderzocht bij andere marktcondities. Hieruit blijkt:

- Bij hoge CO<sub>2</sub>-prijzen (70 €/ton CO<sub>2</sub>) verbetert de positie van WKK sterk. Alle typen installaties worden dan rendabel.
- Bij een mark-up op elektriciteitsprijzen (een extra verhoging op productieprijs die kan ontstaan bij krapte in de markt) is dit ook het geval.
- Bij een sterke groei van hernieuwbare energie verzwakt de positie van WKK, door daling van de elektriciteitsprijzen. Dit geldt ook voor andere fossiele eenheden.

## **Invloed van afschakelen WKK op CO<sub>2</sub>-emissies en primair energiegebruik**

Het uit bedrijf nemen van WKK-installaties leidt waarschijnlijk tot een substantiële groei van CO<sub>2</sub>-emissies en energiegebruik. De simulatie laat zien dat elektriciteitsproductie wordt overgenomen door energetisch minder rendabele fossiele eenheden. Meest voor de hand liggend zijn vervanging door Nederlandse gascentrales of buitenlandse kolencentrales. Uit de simulatie blijkt dat de laatste optie het meest aannemelijk is. Bij vervanging van de helft van het WKK-vermogen (4,6 GWe) door kolencentrales groeien CO<sub>2</sub>-emissies met 8 Mton, en primair energiegebruik met 40 PJp. Bij vervanging door gascentrales ligt dit aanzienlijk lager (0,6 Mton CO<sub>2</sub>-emissies, 11 PJ primair energiegebruik). Het finale energiegebruik verandert niet. Als meer vermogen wordt afgeschakeld nemen CO<sub>2</sub>-emissie toe met resp. 12 (kolen) en 0,9 (gas) Mton. De meeste CO<sub>2</sub>-emissies vallen onder het plafond van het Europese EU ETS.

## **Positie flexibele WKK**

Flexibele WKK-installaties kunnen inspelen op variaties in elektriciteitsprijzen door tijdelijk elektriciteitsproductie te verhogen of verlagen. De WKK-installaties in de glastuinbouw zijn in hoge mate flexibel. In de industrie is ongeveer de helft van installaties tot op zekere hoogte ook flexibel. De analyse laat zien dat flexibele eenheden in industrie en glastuinbouw doorgaans een beter economisch rendement halen dan WKK-eenheden die niet flexibel kunnen opereren.

Flexibele WKK kan ook inspelen op situaties met overschot via power to heat, het omzetten van overschotten aan elektriciteit in warmte. Dit geldt met name in een scenario met veel hernieuwbare energie.

Er zijn technische mogelijkheden om must-run WKK's flexibel te maken. Dit biedt mogelijkheden om snel (minder dan een uur) en volledig (0-100%) op fluctuaties in te spelen. De kosten om bestaande must-run WKK's (ca. 20% van het WKK-park) om te bouwen liggen op M€ 75 - € 150. Flexibilisering kan leiden tot een vermindering van de besparing van energie. Fiscale bepalingen en transportvergoedingen kunnen zorgen voor extra kosten bij flexibilisering van WKK-installaties. Zo geldt dat installaties alleen zijn vrijgesteld van belasting op gas als het elektrisch rendement boven de 30% ligt.

## **Alternatieven voor industriële warmtevoorziening**

In de industrie worden diverse duurzame alternatieven ingezet om warmte te produceren. Een route is opwekking van stoom uit afval. Dit blijkt technisch en economisch haalbaar, maar de potentiëlen zijn zeer beperkt. De potentiëlen van biomassa en geothermie zijn hoger, maar deze opties zijn alleen rendabel met subsidie. Wel kan duurzame warmte in de industrie een relatief goedkope optie zijn om doelstellingen voor duurzame energie te realiseren.

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

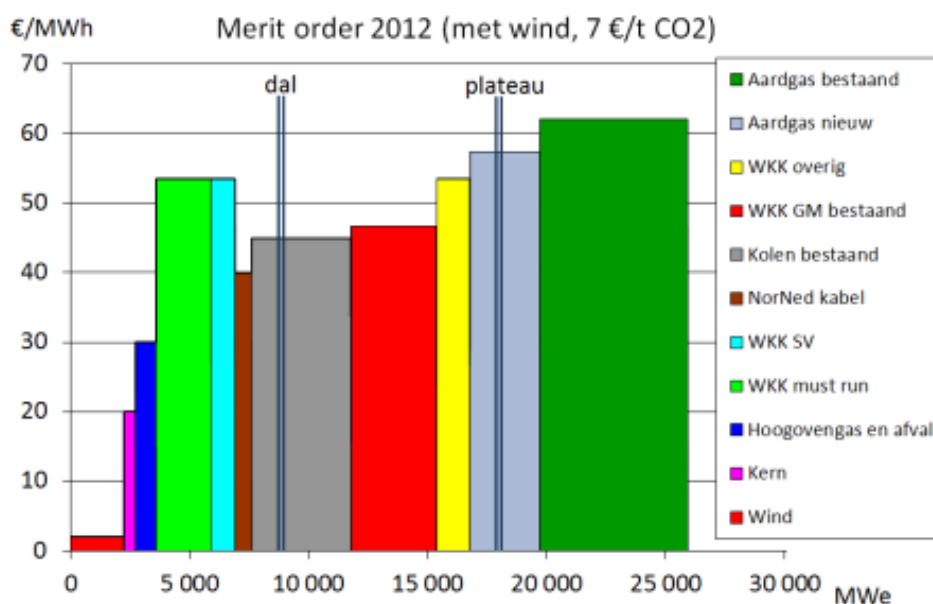
In het SER Energieakkoord voor duurzame groei (SER, 2013) is afgesproken dat het Rijk en bedrijven een onderzoek gaan doen naar mogelijkheden om de warmtevraag in de industrie duurzaam in te vullen.

Achtergrond van deze afspraak is dat een substantieel deel van de nationale warmtevraag betrekking heeft op de industrie. Deze warmte wordt voor een belangrijk deel ingevuld met WKK. WKK, WarmteKrachtKoppeling, is een techniek waarmee op een efficiënte manier uit brandstoffen elektriciteit en warmte worden geproduceerd. Typierend kunnen rendementen van 75-94% worden gehaald.

De huidige marktcondities, met relatief hoge gasprijzen en lage elektriciteitsprijzen, zijn echter ongunstig voor WKK. Dit wordt geïllustreerd door Figuur 1, de merit-order op het Nederlandse elektriciteitsnet in 2012.

De figuur laat zien dat de gemiddelde variabele productiekosten van WKK's hoger liggen dan die van windenergie en hoger dan van kolenvermogen.

Figuur 1 Merit-order op het Nederlandse elektriciteitsnet in 2012



Bron: Energy Matters, 2012.

De ongunstige marktpositie van WKK komt voort uit een complex van tegelijk optredende factoren (beperkte groei vraag, veel hernieuwbare energie uit Duitsland, groei productievermogen fossiele centrales, lage prijzen kolen, relatief hoge prijzen gas, lage CO<sub>2</sub>-prijzen). De relatief hoge prijzen voor gas leiden tezamen met de lage elektriciteitsprijzen tot een ongunstig verdienmodel voor de gasgestookte WKK-installaties. Onder deze condities wordt WKK-vermogen afgeschakeld. Het gevolg kan zijn warmte en elektriciteit op een minder efficiënte wijze worden opgewekt, leidend tot een hoger energiegebruik en hogere CO<sub>2</sub>-emissies in de productieketen.

In samenhang hiermee vormen de hoge kosten voor productie van warmte een punt van zorg, met het oog op de economische positie van energie-intensieve sectoren.

In dit perspectief heeft het Ministerie van Economische Zaken behoefte aan inzicht in de toekomstige positie van WKK. Een vraag is daarbij wat naar verwachting het opgestelde WKK-vermogen zal zijn per 2020 en 2030, en hoeveel vermogen er zal zijn afgeschakeld. In het verlengde daarvan wat dit betekent voor het energiegebruik en de emissies van CO<sub>2</sub>.

Hierbij past de kanttekening dat een groot deel van de WKK-installaties valt onder het EU ETS-systeem. Dit geldt ook voor installaties die vervangende productie leveren. Voor installaties onder het EU ETS wordt geen nationaal CO<sub>2</sub>-beleid wordt gevoerd. Verder geldt dat Nederland voor energiegebruik alleen een doel heeft geformuleerd voor het finale energiegebruik.

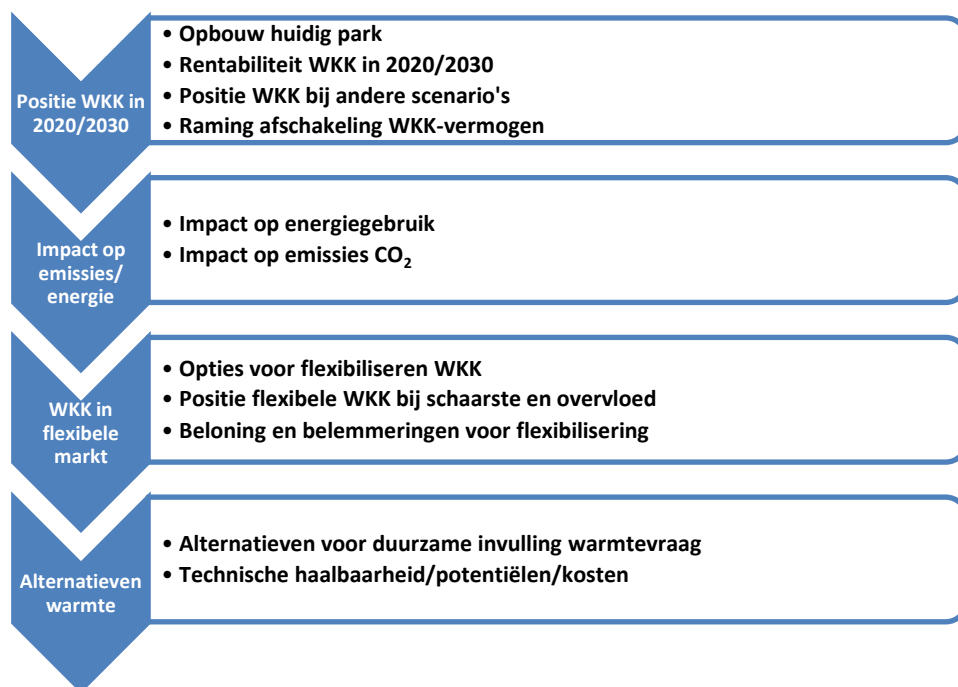
Omdat de komende jaren de productie van zon en wind fors zal groeien, is hierbij een aandachtspunt wat de positie is van flexibel opererende WKK-installaties: WKK-installaties die snel kunnen bijschakelen als wind en zon weinig elektriciteit produceren, en afschakelen bij een groot aanbod. Verder is er de vraag welke alternatieven er zijn voor WKK: wat zijn mogelijkheden om op een (relatief) duurzame manier in de industriële warmtevraag te voldoen?

Dit rapport beschrijft de resultaten van een onderzoek naar deze vragen. Aanvullend daarop hebben industriële partijen aangegeven behoefte te hebben aan inzicht in de toekomstige warmtekosten van de Nederlandse industrie, en een vergelijking met de situatie in andere landen. De studie gaat in op de kosten van warmte-opwekking door WKK-installaties in duurzame alternatieven, zoals biomassa en geothermie. De studie geeft echter geen vergelijking tussen de situatie in Nederland en in omliggende landen.

Het onderzoek is gezamenlijk uitgevoerd door CE Delft en DNV GL, in opdracht van het Ministerie van EZ. Het onderzoek is begeleid door een stuurgroep met vertegenwoordigers van VNCI (chemische industrie), VNP (papierindustrie), Cogen Nederland (WKK-installaties), LTO Glaskracht en Energie Nederland (energieproductiebedrijven). De uitgevoerde casestudies zijn begeleid door een klankbordgroep met vertegenwoordigers van industriële sectoren. Bijlage A geeft een overzicht van de deelnemers aan stuurgroep en klankbordgroep.



## Onderzoeksvragen



### 1.2 Uitvoering onderzoek

In het onderzoek is gebruik gemaakt van *twee modellen*:

1. als eerste is een gedetailleerd simulatiemodel ingezet dat op uurbasis het energiesysteem in Nederland en de Noordwest-Europese markt weergeeft;
2. resultaten van dit simulatiemodel zijn ingezet in een business-case model, waarmee de rentabiliteit van investeringen in WKK en andere opties zijn door gerekend.

Voor de derde onderzoeksvraag zijn *casestudies* uitgevoerd bij bedrijven. De casestudies geven inzicht in praktijkervaringen bij het verduurzamen van de warmtevraag. In aanvulling hierop is een deskstudie uitgevoerd naar recente inzichten uit onderzoeksprogramma's. De resultaten van de casestudies zijn getoetst met een klankbordgroep van vertegenwoordigers uit de industrie (samenstelling is weergegeven in Bijlage A).

### 1.3 Leeswijzer

Dit rapport begint in hoofdstuk 2 met een overzicht van het WKK-productiepark per 01/01/2014. Dit betreft de installaties in industrie, glastuinbouw en gebouwde omgeving. Deze zijn ingedeeld naar must-run en flexibel vermogen. We geven daarbij aan wat de ontwikkelingen zijn in het opgestelde WKK-productievermogen, en in de productie van elektriciteit en warmte uit WKK-installaties.

Het derde hoofdstuk beschrijft de positie van deze WKK-installaties per 2020 en 2030. Basis hiervan zijn uitgevoerde modelberekeningen met het simulatiemodel van de Noordwest-Europese markt. Modelberekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende scenario's van aandelen Hernieuwbare energie en prijspaden. Vervolgens zijn business-case berekeningen uitgevoerd met een rentabiliteitsmodel. De modelanalyse gaat uit van het huidige park,

tussentijdse afschakeling van WKK-installaties is niet verdisconteerd. Uit de analyse volgt wel hoeveel WKK-vermogen in 2020 een onrendabele top heeft en waarschijnlijk wordt afgeschakeld.

Het volgende hoofdstuk, 4 geeft een beschrijving van de impact van afschakeling van WKK-installaties op het energiegebruik (finaal en primair) en de emissies van CO<sub>2</sub>.

Hoofdstuk 5 beschrijft de positie van flexibele WKK in een productiepark met een groot aandeel HE-productievermogen. De analyse focust op de WKK-installaties in de sectoren industrie en glastuinbouw.

Hoofdstuk 6 beschrijft mogelijkheden om de warmtevraag in industrie en glastuinbouw efficiënt en duurzaam in te vullen, als alternatief voor of in aanvulling op WKK. Dit is gebaseerd op een vijftal casestudies bij bedrijven (Akzo Nobel, Ammerlaan-TGI, AVEBE, Eska Graphic Board en Parenco), en deskstudie.

Het rapport sluit af met conclusies.

## 2 Opbouw WKK-park

Deze paragraaf geeft de actuele opbouw van het WKK-park en de ontwikkeling in de afgelopen jaren. We geven daarbij een specificatie naar de verschillende typen WKK-installaties, en de sectoren waar deze staan opgesteld. De paragraaf geeft antwoord op de volgende vragen:

- Hoeveel WKK-vermogen is must-run, hoeveel flexibel?
- Hoeveel WKK-vermogen is in de afgelopen jaren afgeschakeld?

Bijlage B geeft in aanvulling op dit hoofdstuk achtergronden over de leeftijdsopbouw van het WKK-park en de ontwikkeling van WKK-installaties in de periode 2000-2012.

### 2.1 WKK-park per 01/01/2014

Tabel 1 geeft de opbouw van het WKK-productiepark op de peildatum van 1 januari 2014. Data zijn gebaseerd op de database van Energy Matters<sup>1</sup>.

Tabel 1 Opgesteld productievermogen WKK per 01/01/2014 (exclusief kolen, in MWe)

	Gasmotor	STEG	Gasturbine	Stoomturbine	Totaal
Industrie	-	2.316	373	174	2.863
- raffinaderijen	-	667	21	24	712
- voedingsmiddelenindustrie	-	147	117	62	326
- chemische industrie	-	1.006	153	74	1.233
- papierindustrie <sup>2</sup>	-	208	4	6	218
- overige industrie	-	288	78	8	374
Glastuinbouw	3.060	-	-	-	3.060
Gebouwde omgeving	580	2.055	-	321 <sup>3</sup>	2.956
<b>Totaal</b>	<b>3.640</b>	<b>4.371</b>	<b>373</b>	<b>495</b>	<b>8.879</b>

Bron: Energy Matters, 2014.

In totaal is 8,9 GWe WKK-productievermogen opgesteld<sup>4</sup>. Het overgrote deel, ca. 8,4 GWe, wordt met aardgas aangedreven. Een klein gedeelte wordt aangedreven met andere brandstoffen, zoals afval, hoogovengas en industriële restgassen. Het meeste vermogen is bij STEG's (4,4 GWe) en gasmotoren (3,6 GWe). Gasturbines (0,37 GWe) en stoomturbines (0,5 GWe) hebben een kleiner aandeel in het park.

<sup>1</sup> Deze database is gebaseerd op enquêtes onder leden van Cogen Nederland, databases van typen WKK-installaties en klant-contacten. Dit laatste betreft vooral informatie uit laatste paar jaren met betrekking tot aanpassingen van WKK's, uit bedrijfstelling en sloop.

<sup>2</sup> De VNP geeft aan dat er relatief minder STEG-vermogen is opgesteld, en meer gasturbines. Het totaalcijfer van opgesteld vermogen stemt wel overeen met de raming van de brancheorganisatie.

<sup>3</sup> Exclusief de (kolengestookte) Amercentrale van 600 MWe.

<sup>4</sup> Dit is exclusief de kolengestookte Amercentrale.

De meeste WKK-installaties dateren uit de periode 1985-2005, met een piek in de jaren 1995-2000. De piek in de glastuinbouw ligt op 2000-2005. Veel WKK-installaties zijn daarmee op een leeftijd van 15-20 jaren. Bijlage B geeft een nadere specificatie van de leeftijdsopbouw van WKK, zoals de leeftijdsopbouw van STEG's en de gasmotoren in de glastuinbouw.

De WKK-installaties leveren een fors deel van de Nederlandse elektriciteitsproductie. In 2012 lag dit aandeel op 42% (zie ook Tabel 4 in Paragraaf 3.2 en Figuur 29 in Bijlage H).

## 2.2 Flexibel en must-run

WKK-eenheden hebben een technisch ontwerp waarbij productie van warmte en elektriciteit aan elkaar zijn gekoppeld. Productie van warmte gaat bij een WKK-installatie altijd gecombineerd met productie van elektriciteit. De mate waarin een WKK - bij gelijkblijvende warmteproductie - zijn elektriciteitsproductie kan variëren, bepaalt de flexibiliteit. Is deze gering dan worden eenheden aangeduid met de term 'must-run'. Daarnaast zijn er ook WKK-eenheden in de industrie die warmte produceren, en waarbij de productie van elektriciteit variabel is ten opzichte van de warmteproductie. Deze kunnen daarmee inspelen op variaties in elektriciteitsprijzen: bij hoge elektriciteitsprijzen produceren ze warmte en elektriciteit, bij lage elektriciteitsprijzen alleen of hoofdzakelijk warmte. Deze eenheden worden aangeduid met flexibel.

Daarnaast zijn er ook eenheden die door een warmtebuffer tijdelijk warmte op kunnen slaan. Deze hebben daardoor de mogelijkheid om warmteproductie en -afname te ontkoppelen. Dit is alleen mogelijk als warmte in de vorm van warm water wordt geproduceerd. Een voorbeeld zijn de gasmotoren in de glastuinbouw: de eenheden kunnen snel worden af- en aangeschakeld, door toepassing van warmtebuffers. Dit maakt het mogelijk om gasmotoren te laten draaien wanneer de elektriciteitsprijs hoog is en de warmtevraag op een later moment optreedt. Daardoor kunnen de WKK-installaties in de glastuinbouw overdag de elektriciteit leveren en 's nachts de warmte inzetten voor verwarming.

Tabel 2 geeft de belangrijkste opties voor flexibilisering van WKK-installaties. De eerste twee opties gaan uit van een ketel die zelfstandig op basis van aardgas stoom kan produceren. In het eerste geval door het bijplaatsen van een ketel, in het tweede geval door aanpassingen in de afgassenketel. Met deze opties is in principe 100% flexibiliteit haalbaar. Bij ketels die verwarmd zijn liggen schakelsnelheden op minder dan een uur.

De onderste optie in de tabel geeft aan dat vaak ook een zekere mate van flexibiliteit haalbaar door WKK-installaties in deellast te laten draaien. Dit betekent dat de installatie niet op vol vermogen draait, en minder elektriciteit levert. De mogelijkheden hiervoor zijn beperkt, omdat bij lagere vermogens het energetisch rendement daalt (zie figuur in Bijlage C, onderdeel f), ook kunnen de NO<sub>x</sub>-emissies omhoog gaan. Typischerwijs kunnen vermogens tot maximaal 75% thermisch en 50% elektrisch worden terug gedraaid. Bijlage C geeft een verdere uitwerking van de diverse flexibiliteits-opties.

Tabel 2 Flexibiliserings-opties voor WKK-installaties

Flexibiliserings-optie	Mate van flexibiliteit	Schakelsnelheid	Typerende kosten voor ombouw	Randvoorwaarden
Bijplaatsen van een aparte ketel	0-100%	GT: 10-20 min STEG: 30-60 min	120-150 €/kW	Vergt voldoende ruimte op locatie
Aanbrengen van branders in afgassenketel en additionele verbrandings-luchtventilator	0-100%	GT: 10-20 min STEG: 30-60 min	30-40 €/kW	Technisch complexe aanpassing. Vergt voldoende ruimte in rookgaskanaal
Bijplaatsen van warmtebuffer	0-100%	< 30 min	Ca. 250 €/m <sub>3</sub> opslag	Alleen te gebruiken voor WKK-installaties die warm water produceren (glastuinbouw, stadsverwarming)
Draaien in deellast	75-100%	< 15 min	Beperkt, mits variabele inlaatschoepen aanwezig zijn (doorgaans het geval)	Als installatie in deellast draait gaat rendement omlaag, en NO <sub>x</sub> -emissies kunnen omhoog gaan

Bron: Energy Matters.

Op basis van informatie van Energy Matters (2014) is er onderscheid gemaakt tussen drie types van WKK-flexibiliteit:

- *must-run*: hebben een uurlijks vast profiel voor warmte- en elektriciteitsproductie;
- *partial spark-spread*: hebben een uurlijks vast profiel voor de warmteproductie en een daarbij behorende minimale elektriciteitsproductie, in uren met een hoge elektriciteitsprijs kunnen ze extra elektriciteit produceren;
- *flexibel*: hebben een vaste uurlijkse warmtevraag maar geen elektriciteitsproductie beperkingen, ze maken de afweging om in WKK-modus de gevraagde warmte te produceren of via pure stoommodus dan wel een gasboiler te gebruiken. Hierdoor is de warmteproductie en elektriciteitsproductie ontkoppeld.

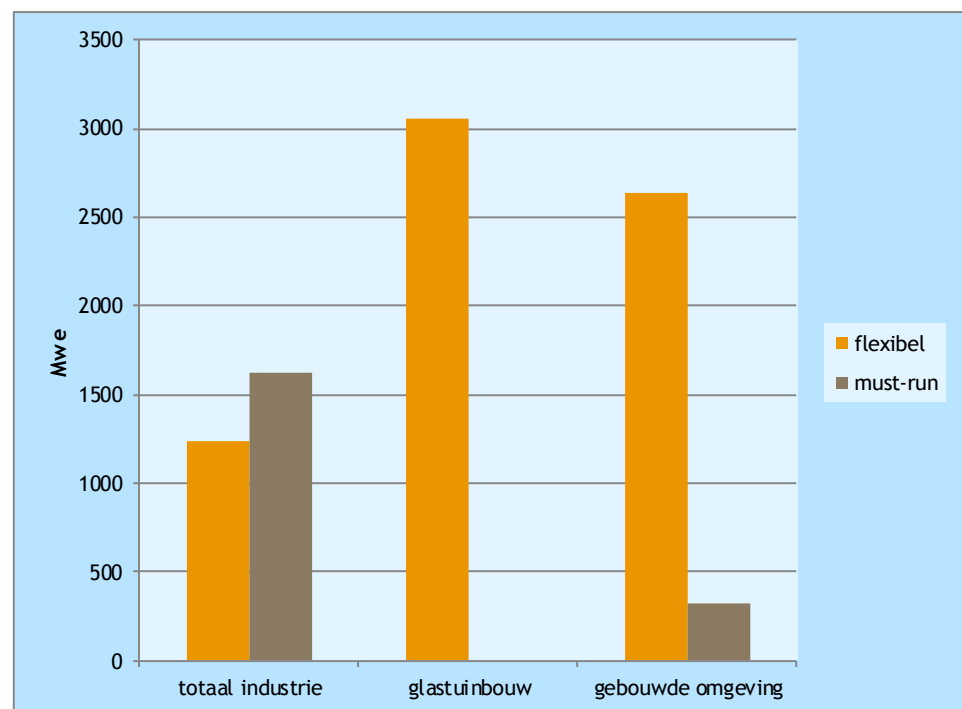
Bijlage B geeft een indeling van opgesteld vermogen naar deze drie categorieën.

Deze indeling is gehanteerd in de simulatieberekeningen voor de positie van WKK in de energiemarkt 2020/2030 (Hoofdstuk 3). Daarbij bleek dat de partial spark-spread eenheden vrijwel identiek functioneerden als de must-run eenheden: ze maken geen gebruik van de mogelijkheid om extra elektriciteit te produceren. Daarom zijn de partial spark-spread installaties in de verdere analyse samengevoegd met de must-run eenheden.

Figuur 2 geeft een onderverdeling van het opgestelde productievermogen naar must run (inclusief partial spark-spread) en flexibel. De toedeling van installaties is gebaseerd op informatie van Energy Matters en niet bij de bedrijven zelf geverifieerd. Deze heeft dan ook een indicatief karakter. In totaal is 1,95 GW als must run en 6,93 GW als flexibel ingedeeld. Van de installaties in de industrie is 1,62 GWe flexibel. Figuur 9 in Bijlage B geeft een verdere specificatie.

Figuur 3 laat zien dat in de industrie ongeveer de helft van de WKK-installaties als flexibel aangemerkt worden. In de glastuinbouw zijn alle WKK-eenheden (gasmotoren) flexibel inzetbaar. In de gebouwde omgeving zijn de meeste WKK-installaties technisch gezien in staat om flexibel te opereren, maar leidt de structuur van energiebelastingen, die een eis stelt aan het elektrisch rendement, er voor dat ze feitelijk als 'must-run' opereren. De eenheden zijn doorgaans uitgerust met hulpwarmteketels, en zijn daardoor technisch in staat om te switchen van levering van warmte uit de WKK en warmtelevering uit de ketels.

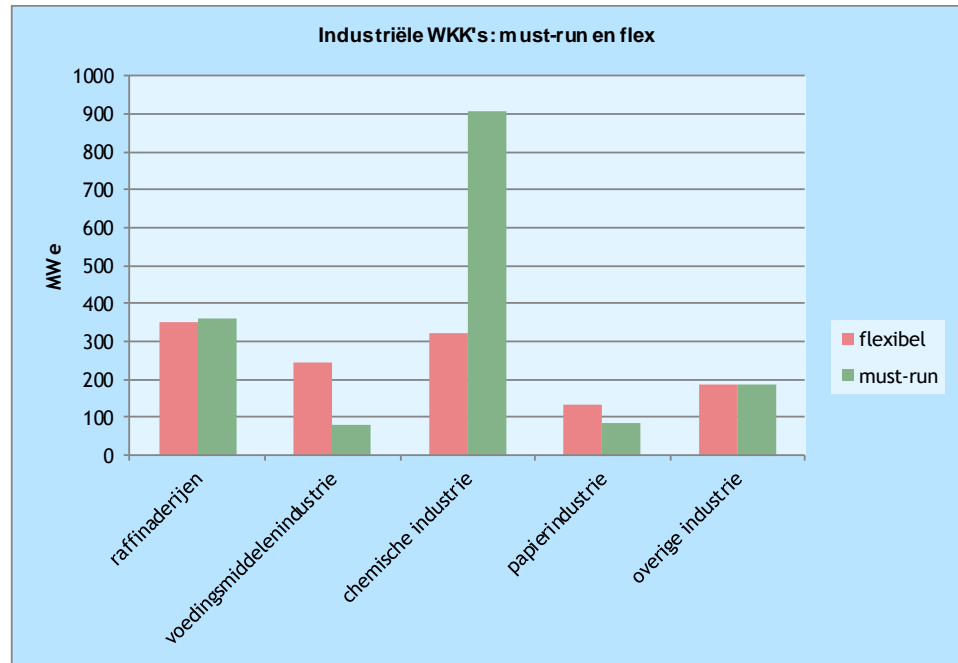
Figuur 2 Flexibel en must-run WKK-vermogen in industrie, glastuinbouw en gebouwde omgeving



Bron: Energy Matters.

Figuur 3 geeft een verdere specificatie naar de industrie. De figuur geeft aan dat vooral in de papier- en voedingsmiddelindustrie WKK-installaties staan opgesteld die flexibel ingezet kunnen worden. In de chemische industrie is juist het meeste opgestelde vermogen 'must-run'.

Figuur 3 Specificatie naar industriële sectoren



Bron: Energy Matters.

### 2.3 Ontwikkeling over de afgelopen jaren

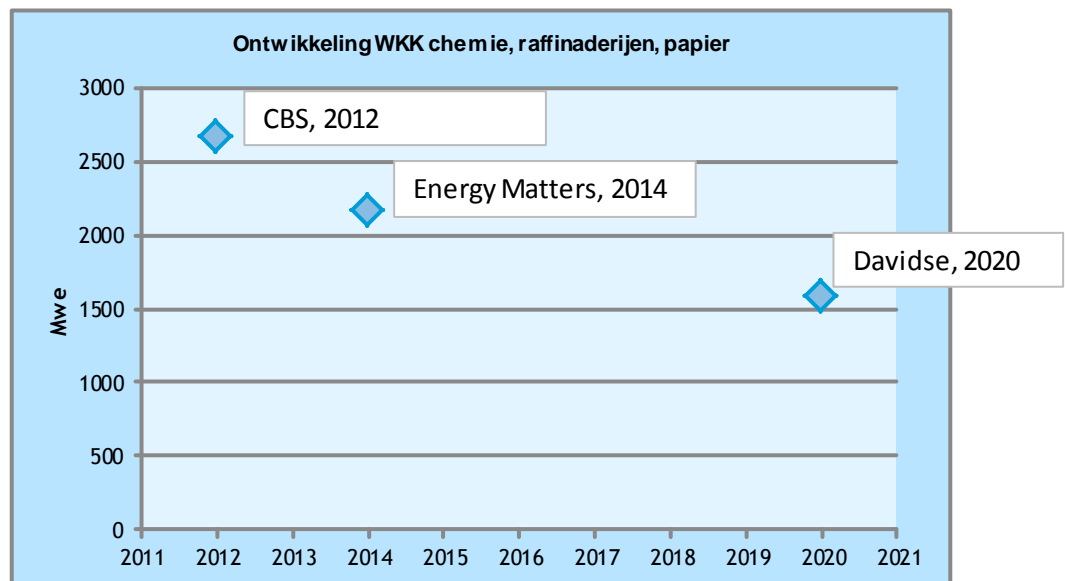
Het opgestelde WKK-vermogen is in de afgelopen drie jaren aanzienlijk gedaald. Volgens EnergyMatters is in de afgelopen 4 jaar in de industrie 996 MWe buiten gebruik gesteld, waarvan 511 definitief en 485 'in de mottenballen'.<sup>5</sup> Deze daling volgt ook uit een vergelijking met CBS-cijfers. Vergelijking tussen de Energy Matters- en CBS-cijfers laat zien dat volgens het CBS er in 2012 nog 3,1 MWe meer stond opgesteld. Naast het uitfaseren van WKK-installaties geldt is dit waarschijnlijk voor een belangrijk deel te verklaren uit definities, in de CBS-cijfers zijn ook kolengestookte WKK-installaties en AVI's opgenomen. Daarnaast zit mogelijk in de data van het CBS een zekere vertraging.

<sup>5</sup> Het verschil tussen de daling t.o.v. CBS-cijfers en Energy Matters-cijfers ligt waarschijnlijk aan vertragingen in de CBS-database.

De daling in opgesteld vermogen sluit aan bij de resultaten van een studie van Davidse Consultancy uit 2012<sup>6</sup>. Deze studie geeft voor de sectoren chemie, papier en raffinaderijen een indicatie van het te verwachten af te schakelen vermogen aan WKK. De gegevens zijn verzameld via een enquête onder de bedrijven. Het rapport geeft aan dat naar verwachting in deze drie sectoren in de periode tot 2020 915 MWe WKK-vermogen zal worden afgeschakeld. Ook de chemische industrie rapporteerde recent in haar rapport duurzaamheid 2013 dat er 2012 veel WKK-installaties zijn afgeschakeld<sup>7</sup>.

Figuur 4 zet de cijfers van CBS en Energy Matters naast de prognoses van Davidse.

Figuur 4 Ontwikkeling opgesteld WKK-vermogen in de sectoren raffinaderijen, chemie en papierindustrie



<sup>6</sup> Davidse Consultancy, 2012, Warmte-energie, de motor van de industrie, 2012  
<http://www.vnpi.nl/Files/file/20121021%20Davidse%20Rapport%20Warmteonderzoek%20MEE%20definitief.pdf>.

<sup>7</sup> Door het afschakelen van WKK's produceerde de chemische industrie in 2012 20% minder elektriciteit dan in 2011, leidend tot een verhoging in de indirecte emissies van CO<sub>2</sub> (VNCI, Rapport Duurzaamheid 2013).



# 3 Positie WKK in energiemarkt 2020/2030

In dit hoofdstuk richten we ons op de economische positie van WKK in de toekomstige energiemarkt. De centrale vraag is: *In hoeverre opereren WKK-installaties rendabel in 2020, en hoe is de situatie in 2030?*

We kijken daarbij eerst op basis van een simulatiemodel naar de toekomstige energiemarkt en wat daarin de positie van WKK-installaties is op basis van variabele kosten en baten. Daarna kijken we welke investeringen nodig zijn om WKK-installaties in bedrijf te houden, en wat daarvan de impact is op de rentabiliteit.

Specifieke vragen zijn:

- Wat is de positie van WKK-installaties in 2020/2030?
- Wat is de verwachting van WKK-vermogen dat afgeschakeld zal worden?
- Wat is de positie van WKK-installaties bij hogere CO<sub>2</sub>-prijzen?
- Wat is de positie als het aandeel hernieuwbare energie sterker stijgt dan voorzien?
- Wat is de positie als vraag en aanbod op de elektriciteitsmarkt meer in evenwicht zijn, en er weer een ‘mark-up’<sup>8</sup> komt op de elektriciteitsprijs?

## 3.1 Aanpak

### Modellen

De positie van WKK-installaties is in kaart gebracht via een analyse met twee modellen.

Als eerste is een **simulatiemodel** van de NW-Europese markt gebruikt.

Dit model berekent voor elk uur in een jaar welke productie-eenheden worden ingezet. In dit model zijn de elektriciteitscentrales in Nederland op individueel niveau gemodelleerd, waaronder ook de grotere WKK-eenheden. In de modellering is een onderscheid gemaakt tussen must-run, partial spark-spread en flexibele eenheden, zoals beschreven in Paragraaf 2.2.

Uit de modellering volgen de prijzen voor elektriciteit. Op uurbasis volgt hieruit hoe veel de WKK-installaties worden ingezet en wat hiervan de variabele kosten en baten zijn. Voor de WKK-eenheden is verondersteld dat deze in de markt aanwezig zijn, voor must-runs dat ze continue draaien. Bijlage F geeft een gedetailleerde beschrijving van het simulatiemodel. Als tweede is berekend wat de positie van WKK-installaties is als ook benodigde investeringen in ogenschouw worden genomen. Dit is gebeurd met een **rentabiliteitsmodel**. Het rentabiliteitsmodel berekent per individuele WKK-installatie de onrendabele top. Basis hiervoor is de output van het simulatiemodel (electriciteitsprijzen, warmteproductie, elektriciteitsproductie, start/stopkosten), en anderzijds benodigde investeringen. De resultaten worden geclusterd naar vijf typen van WKK-installaties: STEG (groot/klein), gasturbine (groot/klein) en gasmotor. H geeft in meer detail een beschrijving van het rentabiliteitsmodel, en de daarin gehanteerde uitgangspunten.

---

<sup>8</sup> De ‘mark-up’ is een verhoging van de elektriciteitsprijs die in de markt kan ontstaan in situaties van krapte.

In de modellering is de zgn. **warmtekorting** niet meegenomen. De warmtekorting is een korting die op de prijs van door WKK-geleverde warmte gemaakt kan worden, en vertegenwoordigt extra risico's die WKK-warmte kan hebben ten opzichte van warmte uit een ketel. De korting is niet meegenomen omdat er weinig objectief materiaal beschikbaar is over de omvang van deze korting.

### Uitgangspunten basis-scenario

Uitgangspunt voor het basis-scenario is ontwikkeling van prijzen van brandstoffen en CO<sub>2</sub>-prijzen volgens het 'new policies'-scenario uit de World Energy Outlook 2013 van de IEA. Dit scenario gaat uit van een brede politieke steun voor een actief klimaatbeleid en uitvoering van plannen om emissies van broeikasgasemissies te reduceren. Het betreft daarbij ook plannen die nog niet zijn opgesteld, maar nog ontwikkeld moeten worden. Dit scenario kan worden gezien als het IEA-basisscenario. Voor de ontwikkeling van productievermogen van hernieuwbare energie is aangesloten bij de afspraken uit het SER Energieakkoord. Voor de ontwikkeling van hernieuwbare energie in andere landen is uitgegaan we uit van prognoses van de Europese branche-organisatie van netbeheerders, ENTSO-E. Een en ander is samengevat in Tabel 3. De tabel geeft ook de waarden voor 2012 en 2030. Uitgangspunten voor het scenario zijn verder beschreven in Bijlage E.

Tabel 3 Uitgangspunten basis-scenario 2020 en 2030

			2012	2020	2030
Prijzen	Gas	€/GJ	8,5	8,7	9,0
	Kolen	€/GJ	2,6	2,8	2,9
	CO <sub>2</sub>	€/ton CO <sub>2</sub>	8,0	15	24
Opgesteld vermogen HE in Nederland	Zon	MW	365	4.000	8.000
	Wind	MW	2.391	8.050	12.000

### Benodigde investeringen

Bij veel WKK-installaties moeten investeringen plaatsvinden voor revisie/grootschalig onderhoud. Tevens speelt dat vanaf 2016/2017 WKK-installaties moeten voldoen aan aangescherpte NO<sub>x</sub>-emissie-eisen. Voor deze twee factoren zijn ramingen gemaakt van typerende kosten.

#### *Periodieke revisie/grootschalig onderhoud*

Een grote kostenpost zijn de kosten voor revisie/grootschalig onderhoud. Veel WKK-installaties hebben een leeftijd van 10-20 jaren en zijn toe aan investeringen voor grootschalig onderhoud. Hiervoor is een raming ontleend aan Jacobs Consultancy (2009)<sup>9</sup>, na toetsing bij contacten uit de markt. Deze komt neer op van 25% van de initiële investering<sup>10</sup>. Deze waarde is in alle rentabiliteitsberekeningen gehanteerd. Omdat dit een belangrijke factor is in de rentabiliteit van installaties, is de rentabiliteit ook berekend voor hogere en lagere waarden (resp. 0, 15 en 35). Dit is voor de diverse scenario's weergegeven in de Bijlage J.

<sup>9</sup> Techno-Economische Parameters, MEP/SDE WKK 2008, Jacobs Consultancy, 2009.

<sup>10</sup> Markconsultatie gaf aan dat voor gasturbines typerende revisie-investeringen hoger kunnen liggen, in de orde van 35%. Voor de consistentie van modellering is overal 25% aangehouden.

### *Investeringsen om aan NO<sub>x</sub>-emissie-eisen te voldoen*

Kleinere WKK-installaties moeten vanaf 1 januari 2016/1 januari 2017 aan aangescherpte NO<sub>x</sub>-emissie-eisen voldoen<sup>11</sup>. Deze zijn opgenomen in het Activiteitenbesluit. De kosten om hieraan te voldoen voor bestaande installaties zijn ontleend aan een studie van het ECN<sup>12</sup>. Investeringsen liggen in de orde-grootte ca. 30-120 €/kWe. Daarnaast zijn er voor de NO<sub>x</sub> variabele kosten in de orde van 0,9 €/MWe/uur. Bijlage D geeft nadere informatie over de NO<sub>x</sub>-emissie-eisen uit het Activiteitenbesluit en technische maatregelen waarmee hieraan kan worden voldaan.

## 3.2 Elektriciteitsmarkt 2020

Op basis van deze gegevens volgt uit het simulatiemodel van de Noordwest-Europese markt hoe de elektriciteitsmarkt in Nederland zich ontwikkelt. Tabel 4 zet de berekende aandelen in de productie in 2012 en 2020<sup>13</sup> naast elkaar. Figuur 5 geeft opgesteld vermogen en draaiuren.

Tabel 4 Opbouw elektriciteitsproductie in 2012 en 2020 (gemodelleerd), in TWh

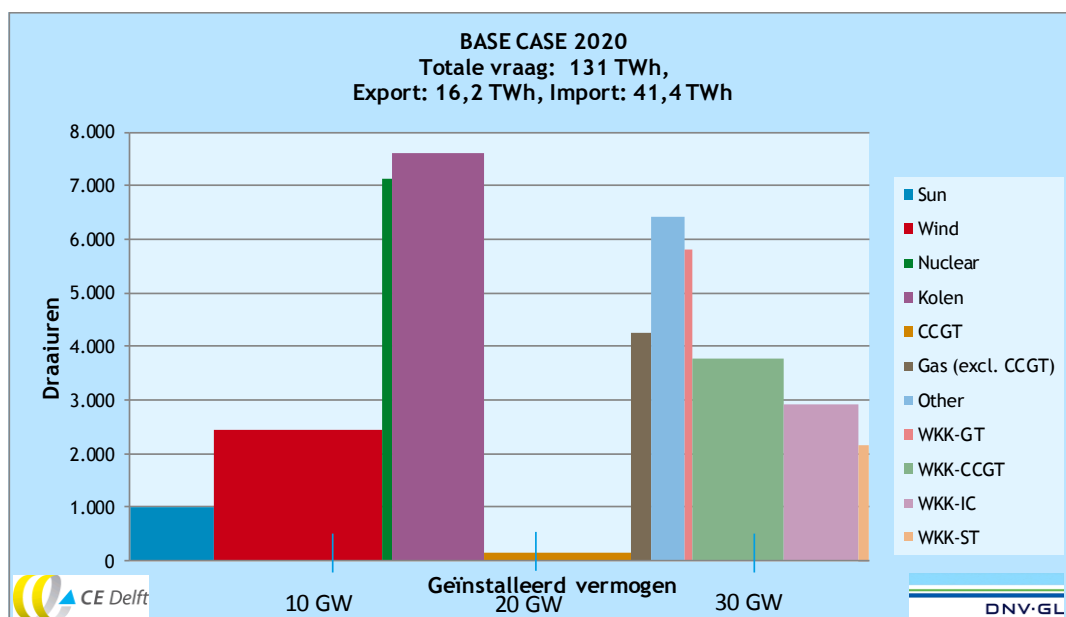
	2012	2020
Zon	0	3
Wind	4	13
Nucleair	3	2
Kolen	23	23
Gas	1	1
Overig gas (o.a. hoogovengas)	3	3
Overig (waaronder biomassa)	8	7
WKK	31 (42%)	20 (28%)

<sup>11</sup> Het betreft de installaties die onder het BEMS (Besluit Emissies Middelgrote Stookinstallaties) vielen, en nu onder het Activiteitenbesluit.

<sup>12</sup> Effecten van de afschaffing van NO<sub>x</sub>-emissiehandel, ECN, 2012  
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2012/n12015.pdf>.

<sup>13</sup> De berekende productie wijkt op bepaalde punten af van de werkelijke opbouw van elektriciteitsproductie in 2012. In 2012 was volgens CBS totale productie van gasgestookte centrales 54 TWh, dit is substantieel hoger dan de hier gemodelleerde waarde van 32 TWh.  
<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=80030NED&D1=1&D2=a&D3=0,2-6,11&D4=14&HDR=T,G1&STB=G3,G2&VW=T> (CBS Statline, 2014).

Figuur 5 Elektriciteitsmarkt 2020 in basis-scenario



De marktsituatie rond 2020 wordt gekenmerkt door een sterk toegenomen aandeel wind en zon (van 6 naar 24%), een geringe stijging van de vraag naar elektriciteit en een aanhoudend aanbod van goedkope stroom uit het buitenland en kolencentrales. In deze markt liggen de prijzen op een laag niveau, met een gemiddelde van 51,7 €/MWh. Het marktaandeel van gasgestookte centrales, waaronder WKK, staat fors onder druk. Achtergronden zijn opgenomen in Bijlage H (Elektriciteitsmarkt in de scenario's).

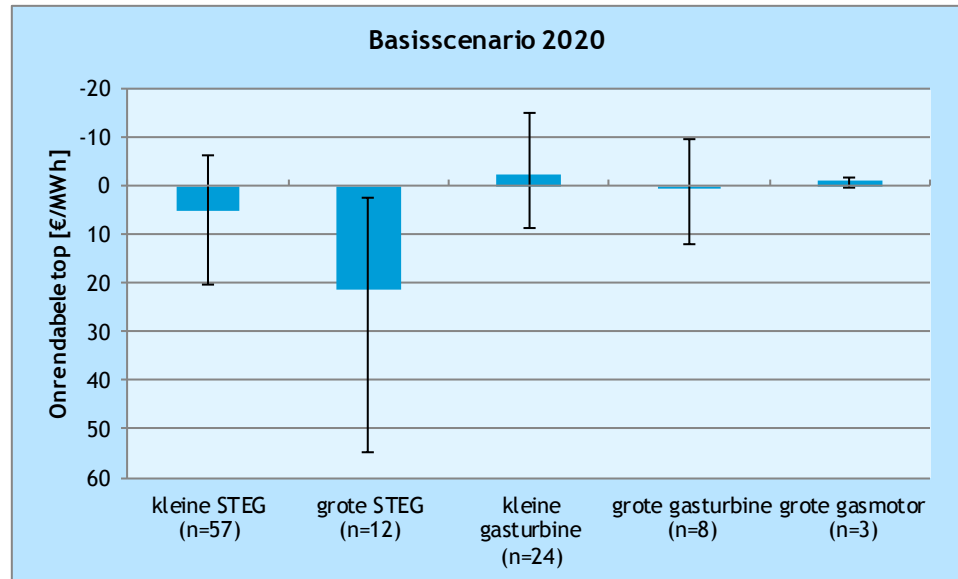
### 3.3 Marktpositie WKK in 2020

Uit de simulatie blijkt wat onder deze marktcondities de positie is op basis van variabele kosten en baten. Bijlage I geeft hiervan resultaten. Dit laat zien dat bij must-run WKK-installaties de variabele kosten vrijwel gelijk zijn aan de variabele opbrengsten. Flexibele WKK-installaties draaien op basis van de variabele kosten/ baten doorgaans wel positief.

Figuur 6 geeft de onrendabele top van WKK-installaties in 2020.

De onrendabele top is het bedrag wat nodig is om exploitatie rendabel te maken, rekening houdend met de vaste kosten, waaronder kapitaalskosten. Een 'positieve' onrendabele top betekent dat de investering niet rendabel is, een 'negatieve' onrendabele top dat deze wel rendabel is. Onderaan Figuur 6 staan de aantallen installaties per categorie, In Hoofdstuk 5 wordt verder ingegaan op de rentabiliteit van must-run en flexibele WKK-installaties.

Figuur 6 Onrendabele top van WKK-installaties in 2020. De figuur geeft de ORT en de bandbreedte van de verschillende installaties<sup>14</sup>



De positie van meeste WKK-installaties is in 2020 ongunstig, met een onrendabele top > 0. De prestatie verschilt sterk per WKK, afhankelijk van factoren als flexibiliteit, aantal draaiuren, leeftijd en rendement. In de figuur zijn daarom foutbalken opgenomen. Deze geven de spreiding aan van individuele WKK-installaties.

Vrijwel alle grote **STEG's** hebben een onrendabele top. Omdat de STEG's bijna 50% uit van het totale productiepark uitmaken, heeft dit een forse impact op de totale rentabiliteit.

**Gasmotoren** presteren relatief beter. Deze zijn in staat zijn flexibel te opereren, en presteren daardoor beter op de elektriciteitsmarkt.

De relatief betere positie van **gasturbines** ten opzichte van STEG's valt te verklaren uit het gegeven dat deze relatief meer warmte en minder elektriciteit produceren dan STEG's<sup>15</sup>.

De onrendabele installaties hebben een gemiddelde ORT van 7,9 €/MWh. Voor de industriële WKK-installaties ligt de onrendabele top gemiddeld op 3,2 €/MWh. De gasmotoren in de glastuinbouw hebben een onrendabele top van -1,6 €/MWh en zijn daarmee marginaal rendabel. In totaal bedraagt de onrendabele top voor de 'onrendabele WKK-installaties 131 M€/jaar.

De ongunstige marktpositie van de WKK-installaties kan verklaard uit de marktcondities in 2020. De prijzen voor elektriciteit zijn relatief laag, 51,7 €/MWh. Deze leiden er toe dat WKK-installaties relatief weinig opbrengst hebben uit de geproduceerde elektriciteit. Als gevolg hiervan zijn de variabele opbrengsten (uit geproduceerde warmte en elektriciteit) nauwelijks hoger dan

<sup>14</sup> Voor kleine STEG gaat het om 3,06 GWe vermogen, bij grote STEG om 0,45 GWe vermogen, bij kleine gasturbine om 0,52 GWe, bij grote gasturbine om 0,22 GWe en bij de gasmotor om 3,62 GWe.

<sup>15</sup> In deze analyse presteren gasturbines ongeveer vergelijkbaar met gasmotoren. Dit verschilt met berekeningen van Cogen Nederland (Cogen Nederland, 2013) en ECN (ECN, 2008) waarin gasturbines een hogere ORT hebben dan gasmotoren. Verschillen kunnen toe te schrijven zijn aan de gehanteerde rendementen van gasturbines (in deze studie 32%, in andere studies 28%). Een tweede factor is dat in deze studie voor revisie van GT-installaties een investering van 25% is aangehouden, wat mogelijk aan de lage kant is.

de variabele kosten (brandstoffen, CO<sub>2</sub>-rechten). Benodigde investeringen verdienen zich vervolgens onvoldoende terug.

Bijlage J geeft een nadere uitwerking. Hierin is aangegeven per type WKK hoeveel installaties een bepaalde ORT hebben. Een belangrijke factor is bij de onrendabele top is hoe hoog de investering is voor revisie. Een gevoeligheidsanalyse laat ook zien wat de invloed is bij een hoger of lager percentage. Bij een investering van 35% zijn ook de gasmotoren in de tuinbouw onrendabel.

### 3.4 Raming afschakeling WKK-vermogen

Onder de gegeven condities heeft in 2020 53% van het opgestelde WKK-vermogen een onrendabele top. Dit komt overeen met 4.600 MWe, en betreft bijna 80% van het in de industrie en gebouwde omgeving opgestelde vermogen. Afschakeling van deze installaties leidt tot een derving van 40,3 PJ warmte en 56,9 PJ elektriciteit.

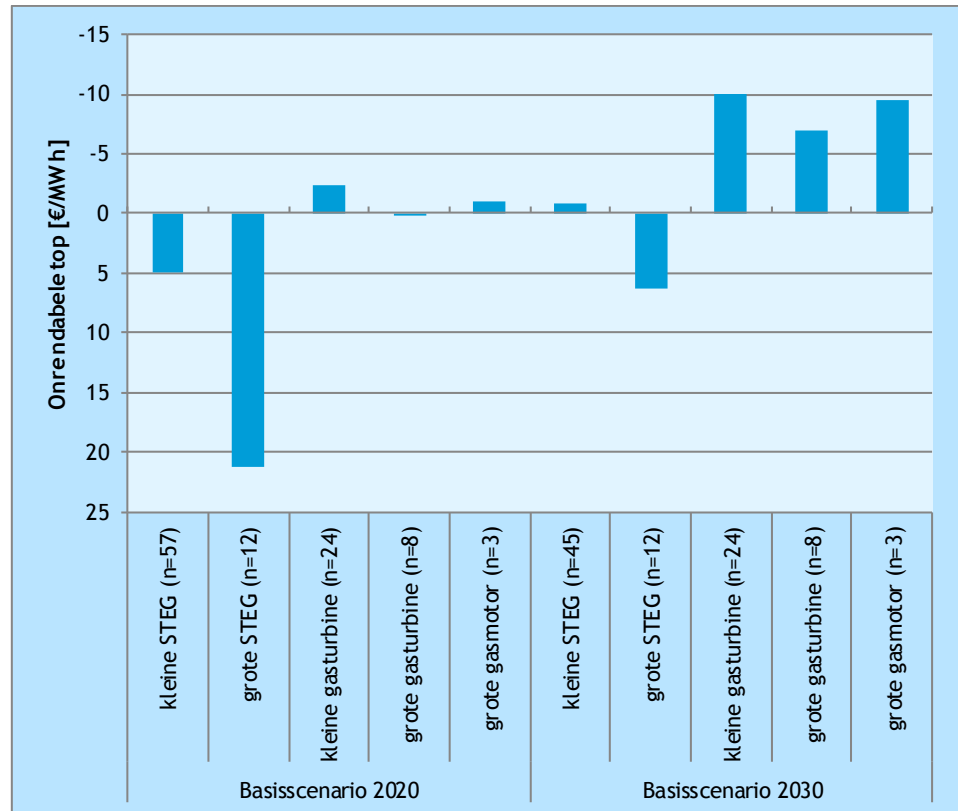
Als ook de WKK-installaties in de glastuinbouw afgeschakeld zouden worden, leidt dit tot een extra verlies van 3.000 MWe. Dit komt dan totaal op 7.600 MWe, of 87% van het WKK-park. Derving van elektriciteit ligt dan op 70,2 PJ warmte en 87,4 PJ elektriciteit.

### 3.5 Marktpositie WKK in 2030

Figuur 7 geeft de onrendabele top van WKK-installaties in 2030 ten opzichte van die in 2020. Uitgangspunt voor deze berekeningen is het WKK-park uit 2014, onder het basis-scenario (Paragraaf 3.1). Hierbij past de kanttekening dat mogelijk een fors deel van het WKK-park dan afgeschakeld zal zijn. Hieruit volgt dat de financiële positie van WKK-installaties in 2030 substantieel gunstiger is dan in 2020. Een uitzondering vormen de grote STEG's, die een onrendabele top houden.

In Hoofdstuk 5 wordt verder in gegaan op de positie van flexibele en must-run WKK-installaties in de verschillende scenario's.

Figuur 7 Onrendabele top WKK-installaties 2030 ten opzichte van 2020



Een belangrijke oorzaak voor deze ontwikkeling is de afname van import uit Duitsland door het uit bedrijf nemen van nucleaire en (bruin-)kolen centrales. Daarnaast is er tussen 2020 en 2030 slechts beperkte groei in hernieuwbare capaciteit aangenomen, die gecompenseerd wordt door de stijgende elektriciteitsvraag. Als gevolg hiervan stijgt het relatieve elektriciteitsprijsniveau (de absolute elektriciteitsprijs neemt toe in verband met hogere brandstof en CO<sub>2</sub>-prijzen). Overall geldt dat de elektriciteitsprijs tussen 2020 en 2030 sterker stijgt dan de aangenomen ontwikkeling in de gasprijs (uit Tabel 3).

Bijlage H geeft het resulterende profiel van de elektriciteitsmarkt in 2030, met daarbij de residuale aanbodcurve en de prijscurve. De elektriciteitsprijzen liggen aanzienlijk hoger dan in het scenario voor 2020), waardoor opbrengsten van WKK-installaties substantieel verbeteren.

### 3.6 Positie van WKK in 2030 bij andere scenario's

De toekomstige ontwikkeling van energiemarkt tot 2030 is omgeven met onzekerheden. Er is ook een andere ontwikkeling mogelijk dan aangenomen in het basisscenario. Belangrijke factoren zijn:

- brandstof- en CO<sub>2</sub>-prijzen (bepalend voor kosten/baten van WKK, en de concurrentiepositie ten opzichte van andere productie-eenheden);
- geïnstalleerd vermogen Hernieuwbare Energie bronnen (bepalend voor de behoefte aan flexibiliteit);
- de marges voor elektriciteitsprijzen, de 'mark-up'.

#### 'Mark-up'

De 'mark-up' is het verschil tussen de prijs die de markt bereid is te betalen en de (geschatte) marginale productiekosten van de laatst benodigde centrale in de merit-order om aan de vraag te voldoen. Deze is te verwachten wanneer in de markt vraag en aanbod redelijk in balans zijn, zoals in de periode 2000-2006. Mark-ups waren toen aan de orde bij elektriciteitsprijzen hoger dan 65 €/MWh. Op basis van APX-data van mark-ups in de periode 2000-2006 is gemodelleerd wat de marktpositie van WKK-installaties in 2030 zou zijn als deze mark-ups van toepassing zou zijn. In een analyse met het rentabiliteitsmodel is een gemiddelde mark-up op jaarbasis van 8 €/MWh meegenomen, overeenkomstig de situatie die zich voordeed in 2000-2006. Gesteld kan worden dat als de elektriciteitsmarkt meer in evenwicht komt elektriciteitsprijzen waarschijnlijk mogelijk opnieuw een mark-up zullen krijgen. Een onzekere factor is hierbij de invloed van interconnectie met het buitenland (die in 2030 groter zal zijn dan rond 2005). Afhankelijk van de hoogte en het aantal uren dat sprake is van een mark-up, kan dit leiden tot een aanzienlijke verbetering van de rentabiliteit.

Zie ook: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-07-522\\_nl.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-07-522_nl.htm) (EU (Rapid), 2007)

#### Scenario's

Daarom is ook onderzocht wat de positie van het WKK-productiepark is bij een viertal andere scenario's dan het basis-scenario:

- *'Hoge CO<sub>2</sub>-prijzen'*: een scenario met mondiaal klimaatbeleid en hoge CO<sub>2</sub>-prijzen. Dit is gebaseerd op het WEO 2013-scenario '450 ppm'. De hogere CO<sub>2</sub>-prijs zorgt ervoor dat elektriciteit van gas zelfs iets goedkoper kan zijn dan die van kolen.
- *'Lage CO<sub>2</sub>-prijzen'*: een scenario op basis van 'business as usual', zonder additioneel energie- en klimaatbeleid. Dit is gebaseerd op het WEO 2013-scenario: current policies.
- *'Hoog aandeel hernieuwbaar'*; dit is gebaseerd op een versnelde groei van productie van hernieuwbare energie. Basis hiervoor vormen aannames t.a.v. extra groei van wind en zon in Nederland en overige landen.
- *'Mark-up'*; dit scenario gaat uit van een elektriciteitsproductiemarkt die meer in evenwicht is, zoals in de periode 2000-2006. Daarin kan bij vragende partijen in de markt een bereidheid ontstaan om hogere prijzen te betalen dan puur de marginale productiekosten. Uitgangspunt is een marge van 8 €/MWh. Dit is een indicatief cijfer, alleen bedoeld om een mogelijk effect te illustreren.

Uitgangspunten bij de scenario's zijn in meer detail uitgewerkt in Bijlage E.



De belangrijkste parameters voor de vier scenario's zijn samengevat in Tabel 5.

Tabel 5 Uitgangspunten in scenario's 2030

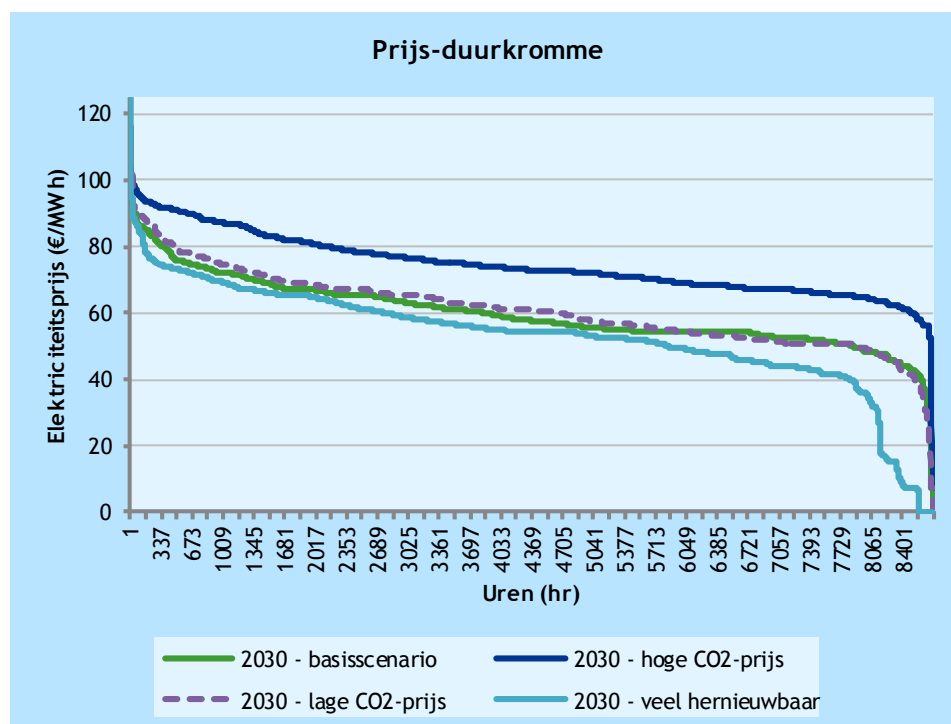
Scenario	Eenheid	Basis-scenario	Hoge CO <sub>2</sub> -prijzen	Lage CO <sub>2</sub> -prijzen	Hoog aandeel hernieuwbaar	'Mark-up'
CO <sub>2</sub> -prijs	€/ton CO <sub>2</sub>	25	<u>71</u>	<u>19</u>	25	25
Aandeel wind en zon in Nederland	GW geïnstalleerd vermogen	20	20	20	<u>30</u>	20
Aandeel wind en zon in omliggende landen	Idem	Cf. Entso-E, 'best estimate'	Cf. basis	Cf. basis	<u>+ 33% t.o.v. basis-scenario</u>	Cf. basis
'Mark-up'	€/MWh	-	-	-	-	<u>8</u>

De berekeningen zijn op een zelfde manier gemaakt als met het basis-scenario: eerst is de totale Noordwest-Europese markt gesimuleerd, met daarin de WKK-installaties. Daarna zijn de resultaten van de simulatie, tezamen met typerende investeringsbedragen ingevoerd in het rentabiliteitsmodel.

Figuur 8 geeft voor de verschillende scenario's de prijsprofielen. Duidelijk is te zien dat in het scenario met hoge CO<sub>2</sub>-prijzen (450 ppm), de elektriciteitsprijzen hoger liggen. In het scenario met veel hernieuwbaar zijn er ca. 600 uren met lage prijzen, < 20 €/MWh <sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Het aantal uren met 'overschot' van elektriciteit uit wind en zon wordt beperkt doordat in 2030 niet alleen het aandeel wind en zon zijn toegenomen maar ook de piekvraag. Bovendien speelt een rol dat de gelijktijdigheid tussen windproductie, zonproductie en de hoogte van de vraag in de analyse is meegenomen (bijv.: op een zonnige zomerdag valt de PV elektriciteitsproductie samen met de piekvraag van de dag en kan de windproductie relatief laag zijn).

Figuur 8 Prijs-duur curve per scenario



Bijlage H geeft voor de verschillende scenario's een verder uitwerking voor het elektriciteitspark (profiel van de elektriciteitsmarkt, residuale vraag-duurkromme en de elektriciteitsprijs).

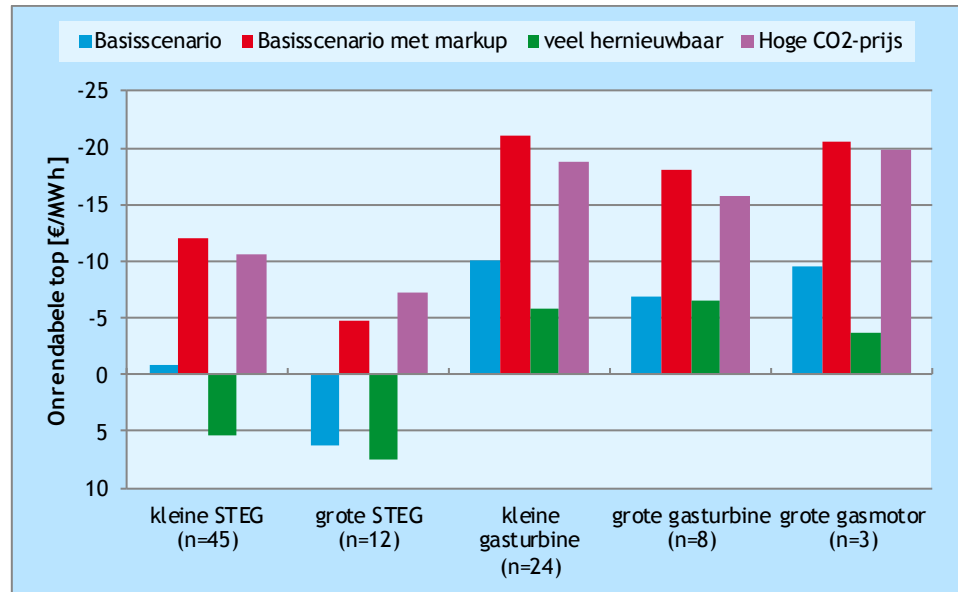
Bijlage I geeft op basis hiervan de variabele kosten/baten van WKK-installaties in de onderscheiden scenario's. Hieruit blijkt dat in het hoge CO<sub>2</sub>-prijsscenario WKK-installaties aanzienlijk beter presteren. Variabele baten zijn dan 13% hoger dan de variabele kosten. Een ander opvallend gegeven is dat in het 'veel hernieuwbaar'-scenario must-run WKK aanzienlijk minder presteert. Hier liggen de variabele kosten boven de variabele baten.

### Resultaten

Resultaten zijn samengevat in Figuur 9. Dit laat zien dat de positie van WKK-installaties duidelijk beter is onder de scenario met een hoge CO<sub>2</sub>-prijs en bij een 'mark-up'. De meeste WKK-installaties zijn dan rendabel. De scenario's hoog aandeel HE en lage CO<sub>2</sub>-prijzen geven weinig verschil met het basisscenario.

Bijlage J geeft een specificatie van de resultaten. Dit geeft per type WKK aan wat van de afzonderlijke WKK-installaties de onrendabele top is. Tevens geeft het de invloed van een hoger of lager % voor de investering bij renovatie.

Figuur 9 Rentabiliteit WKK-park onder verschillende scenario's 2030



### 3.6.1 Positie WKK bij Hoge CO<sub>2</sub>-prijzen

Bij hoge CO<sub>2</sub>-prijzen hebben de WKK-installaties een duidelijk positieve performance. Alle typen WKK-installaties hebben een negatieve onrendabele top, en draaien dus rendabel. De verklaring hiervoor is dat de hoge CO<sub>2</sub>-prijzen (€ 71 €/ton CO<sub>2</sub>) leiden tot substantieel hogere elektriciteitsprijzen. De off-peak prijs is bijna gelijk aan de peak-prijs doordat het prijsverschil tussen kolen- en gascentrales minimaal is. Daardoor halen de WKK-installaties meer opbrengsten uit de productie van elektriciteit. Een tweede factor is dat ook de door de WKK-installaties geproduceerde warmte een hogere marktwaarde krijgt, omdat warmte duurder wordt door de hogere kostprijs van CO<sub>2</sub>. Een tegengesteld effect van de hogere CO<sub>2</sub>-prijs is dat WKK-installaties hogere kosten hebben door de hogere CO<sub>2</sub>-kosten voor de geproduceerde CO<sub>2</sub>. Dit laatste effect is echter kleiner dan de groei in de baten<sup>17</sup>. Een en ander valt te verklaren vanuit de achtergrond dat de geïntegreerde opwekking van elektriciteit en warmte via WKK efficiënter en CO<sub>2</sub>-armer is dan gescheiden opwekking. Daardoor is netto de CO<sub>2</sub>-uitstoot lager dan concurrerende opties, en zorgt een hogere CO<sub>2</sub>-prijs voor een toenemend financieel voordeel.

### 3.6.2 Positie WKK bij Hoog aandeel Hernieuwbare Energie

Bij een hoog aandeel HE presteren WKK-installaties minder goed dan in het basis-scenario. De kleine en grote STEG's hebben een onrendabele top. De gasturbines en gasmotoren zijn wel rendabel. De verklaring is dat het hoge aandeel HE leidt tot lagere elektriciteitsprijzen. Gedurende het hele jaar liggen de prijzen enkele €/MWh lager dan in het basisscenario. Daarbovenop zijn er ca. 600 uren met een overschot aan productie, waarin de prijs beneden de € 20/MWh daalt. Dit leidt er toe dat WKK-installaties lagere opbrengsten halen uit de productie van elektriciteit. Het effect is het sterkst bij must-run WKK-installaties. Deze moeten ook draaien in de uren met zeer lage prijzen, en dan lopen de verliezen op. Ook andere fossiele productie-eenheden draaien door de lage prijzen ongunstig in dit scenario.

<sup>17</sup> Een ander effect is ook nog dat de gasprijzen in dit scenario liggen dan in het basisscenario. Dit heeft ook een positieve impact op de performance van WKK-installaties. Uit simulatie-berekeningen blijkt dat dit effect echter beperkt is.

### 3.6.3 Positie WKK bij herstel marktevenwicht en mark-up

De 'mark-up' heeft een stevige positieve invloed op de performance van WKK-installaties. Alle typen installaties hebben een negatieve onrendabele top.

# 4 Impact afschakelen WKK op energiegebruik en CO<sub>2</sub>-emissies

Uit de modelberekeningen volgt dat in 2020 53% de WKK-installaties een onrendabele top heeft. Als dit WKK-vermogen zou worden afgeschakeld, zal warmte en elektriciteit door andere installaties worden geproduceerd. Vanwege de omvang van het WKK-park, kan dit forse effecten hebben op energiegebruik en CO<sub>2</sub>-emissies. We richten ons daarbij op de volgende vragen:

- Welke typen productie-eenheden zullen naar verwachting bij het wegvallen van WKK, de productie overnemen van elektriciteit en warmte?
- Welke impact zal dat hebben op het energiegebruik?
- Wat is de te verwachten impact op emissies CO<sub>2</sub>?
- Wat is de te verwachten impact op uitstoot van andere vormen van luchtverontreiniging?

Berekeningen zijn uitgevoerd voor afschakeling van de WKK-eenheden die volgens de rentabiliteitsberekening in 2020 onrendabel zijn, 53% van het park.<sup>18</sup> Daarnaast ook berekeningen uitgevoerd voor de situatie dat ook de WKK-installaties in de glastuinbouw zouden wegvallen, 35% van het park.<sup>19</sup> Reden hiervoor is dat deze WKK-installaties een relatief volgens de berekeningen zeer marginaal rendabel zijn.

In de periode tot 01/01/2014 is reeds een substantieel deel van WKK-vermogen afgeschakeld. Deze afschakeling zal al een invloed hebben gehad ook CO<sub>2</sub>-emissies en primair energiegebruik. Deze is niet in de berekeningen verdisconteerd.

## 4.1 Welke installaties zullen bij wegvallen van WKK de productie van warmte en elektriciteit overnemen?

De impact die het afschakelen van WKK-installaties heeft, zal afhangen van welke installaties de gederfde productie van elektriciteit en warmte over zullen nemen.

### Vervangende productie van warmte

Voor warmte is het meest voor de hand liggende scenario dat WKK-warmte overgenomen wordt door gasgestookte ketels. Deze ontwikkeling nu ook in de markt te zien. Er zijn echter alternatieven voor warmteproductie uit gasgestookte ketels, zoals uitgewerkt in Hoofdstuk 6. Voor de alternatieven geldt echter wel dat er beperkingen zijn aan de inzet: voor sommige opties is het potentieel beperkt (bijv. productie van stoom uit afval, of stoomlevering uit AVI), en voor andere opties liggen de kosten hoger (biomassa, geothermie).

<sup>18</sup> Derving van warmteproductie: 40,3 PJ in 2020, 48,8 PJ in 2030; derving van elektriciteitsproductie: 56,9 PJ in 2020 en 69 PJ in 2030.

<sup>19</sup> Derving van warmteproductie: 70,2 PJ in 2020, 80,7 PJ in 2030; derving aan elektriciteitsproductie: 87,4 PJ in 2020 en 102 PJ in 2030.

## Vervangende productie van elektriciteit

Voor de productie van elektriciteit is minder duidelijk welke bron productie zal vervangen. Dit wordt bepaald door de marktsituatie ten tijde van afschakelen WKK. Verder geldt dat productie ook opgevangen kan worden door import.

We brengen de impact van vervangende elektriciteitsproductie in kaart voor drie varianten:

1. Vervanging door het referentie-park (exclusief hernieuwbare energie).
2. Vervanging door kolengestookte centrales.
3. Vervanging door gasgestookte centrales.

De eerste benadering is dat productievermogen wordt overgenomen door het gemiddelde van het productie-park voor elektriciteit, het zgn. 'referentie-park'. In beginsel bestaat dit zowel uit hernieuwbare als fossiele energiebronnen. Voor vervanging van elektriciteitsproductie uit WKK-installaties past het om te kijken naar vervanging door *het fossiele elektriciteitsproductie-park*<sup>20</sup>, dus exclusief hernieuwbare bronnen<sup>21</sup>. Verder gaat het daarbij om andere fossiele eenheden dan WKK-installaties. Dit fossiele referentiepark bestaat in hoofdzaak uit kolen- en gascentrales. Het rendement is daarbij de verhouding tussen van hoeveelheid geproduceerde elektriciteit en energie-inhoud van de brandstof. Voor 2020 ligt dit op 45%. Dit is relatief laag vanwege het aandeel oudere gas- en kolencentrales, en ligt op eenzelfde niveau als dat van nieuwe kolencentrales. Voor 2020 ligt het rendement van het referentiepark hoger, op 51%. Reden hiervan is dat oudere kolen- en gascentrales dan zijn afgeschakeld.

De 2de en 3de benadering gaan ervanuit dat de elektriciteitsproductie overgenomen kunnen worden door recent gebouwde gascentrales en recent gebouwde kolencentrales. Hiervoor gelden rendementen van resp. 58% (in 2020 en 60% in 2030) en 45%<sup>22</sup>. Voor het boilerrendement is uitgegaan van 90%.

De simulatie laat zien dat gascentrales een ongunstige positie hebben in de merit-order. Vervanging van WKK-electriciteit door kolencentrales uit het buitenland lijkt daarom meer waarschijnlijk. Een kritieke factor is hierbij wel of hiervoor voldoende transportcapaciteit is.

De ongunstige positie van WKK-installaties wordt mede veroorzaakt door de groei van het aandeel hernieuwbare energie in de elektriciteitsproductie. Deze groei draagt op zich wel bij aan een forse afname van het primaire energiegebruik van het totale productiesysteem voor elektriciteit: 143 PJp in 2020 en 251 PJp in 2030 (basisscenario).

---

<sup>20</sup> In de benadering wordt het aandeel hernieuwbare energie in het productiepark niet meegenomen. Reden hiervoor is dat hernieuwbare energie uit zon en wind als eerste in de markt wordt gezet, vanwege de zeer lage marginale kosten. Bij afschakeling van WKK zal daarom niet méér energie uit wind en zon worden geproduceerd. Deze benadering sluit aan bij het protocol Monitoring Energiebesparing (ECN, 2001)<sup>20</sup> en meer recent de Handreiking Uniforme Maatlat (SQ, 2012)<sup>20</sup>, en bij de resultaten van de in dit onderzoek uitgevoerde simulaties van de Noordwest-Europese energiemarkt. Die laten zien dat van hernieuwbare energie steeds op volle capaciteit wordt ingezet.

<sup>21</sup> In het basisscenario groeit de productie van hernieuwbare elektriciteit met 23,7 TWh in 2020 ten opzichte van 2012. Uitgaande van het fossiele referentiepark, resulteert dit in een vermeden primair energiegebruik van 143 PJp. In het basis-scenario voor 2030 groeit de HE-productie met 35,5 TWh, leidend tot een 251 PJp besparing op het primaire (fossiele) energiegebruik.

<sup>22</sup> Overige uitgangspunten: boilerrendement: 90%.

## 4.2 Impact op primair energiegebruik

### 2020

Bij afschakeling van 53% van het productiepark en vervanging door het fossiele referentiepark volgt een groei van het primair brandstofgebruik met 40 PJp. Bij afschakeling van 87% van park neemt de groei verder toe tot 68 PJp<sup>23</sup>. Bij vervangende elektriciteitsproductie door nieuwe gascentrales ligt de groei aanzienlijk lager dan bij vervanging door nieuwe kolencentrales. Resultaten zijn samengevat in Tabel 6<sup>24</sup>.

De achterliggende reden voor de groei is dat met het wegvallen van WKK, warmte en elektriciteit gescheiden en minder efficiënt worden opgewekt. Het effect is het grootst voor kolencentrales, omdat deze elektriciteit met een relatief laag rendement produceren.

De berekening is uitgevoerd op basis van het berekende aantal draaiuren van WKK-installaties in 2020. Dit aantal is lager dan het aantal draaiuren in 2012. Als uitgegaan wordt van het aantal draaiuren voor 2012 is de impact op primair energiegebruik hoger<sup>25</sup>.

### 2030

Uitgaande van vervanging door het fossiele referentiepark volgt een groei van primair energiegebruik met 30 PJp bij afschakelen van 53% en 51 PJp bij afschakelen van 87% van het productiepark. De groei in 2030 is lager dan in 2020 omdat het fossiele park dan een hogere efficiëntie heeft.

De impact van vervanging door kolencentrales is wat hoger dan in 2020. Reden hiervan is dat in de WKK-installaties in de simulatiemodellering in 2030 meer draaiuren maken door gunstiger marktomstandigheden. Daarmee valt er dan meer WKK-productie weg.

Tabel 6 Impact afschakelen WKK-installaties op primair energiegebruik (PJp)

Vervangende elektriciteit geproduceerd door:	Afschakeling 53% (excl. WKK-installaties glastuinbouw)		Afschakeling 87% (incl. WKK-installaties glastuinbouw)	
	2020	2030	2020	2030
Fossiel referentiepark (excl. HE)	40	30	68	51
Gascentrales	11	10	24	22
Kolencentrales	40	48	68	78

De uitgangspunten en resultaten van de berekeningen zijn uitgewerkt in Bijlage K.

<sup>23</sup> Ter vergelijking totale primaire energiegebruik van het WKK-productiepark in 2020 ligt op 263 PJp.

<sup>24</sup> Een berekening van vervanging door het referentiepark incl. HE komt uit op 11 PJp groei in 2020 en een afname met 11 PJp in 2030. Dit is een gevolg van de groei van het hernieuwbare productievermogen.

<sup>25</sup> Uitgaande van vervanging door het fossiele referentiepark: in 2020 53 PJp bij 53% afschakeling en 86 PJp bij 87% afschakeling van WKK-vermogen. Voor 2030 liggen de cijfers dan op resp. 34 en 56 PJp.

### 4.3 Impact op finaal energiegebruik

Het finale energiegebruik is het gebruik door de eindgebruikers van elektriciteit en warmte. Nederland heeft in het kader van de Energy Efficiency Directive haar energiebesparingsdoelstelling geformuleerd in deze termen. Afschakelen van WKK-vermogen zal hier geen invloed op hebben omdat het eindgebruik door afnemers niet veranderd door de opwekkingsmethode van warmte en elektriciteit.

### 4.4 Impact op emissies CO<sub>2</sub>

#### 2020

Ook de impact op CO<sub>2</sub>-emissies is sterk afhankelijk van het type installaties dat de WKK-productie van elektriciteit vervangt. Bij vervanging door nieuwe gascentrales ligt dit op 0,6 Mton, bij vervanging door kolen nemen de emissies toe met 7,6 Mton. Voor de situatie dat ook de installaties in de glastuinbouw afgeschakeld worden, liggen de cijfers evenredig hoger. De achterliggende reden is dat bij vervangende elektriciteitsproductie door kolen de CO<sub>2</sub>-emissies hoger vanwege de hogere CO<sub>2</sub>-emissiefactor van kolen ten opzichte van gas. Daarboven op geldt dat bij vervangende productie van warmte en elektriciteit minder efficiënt is dan met toepassing van WKK. Indien ook uit gegaan wordt van het wegvallen van WKK-installaties in de glastuinbouw (uitfasering van 87%), liggen cijfers hoger, op 11,6 Mton.<sup>26</sup>

Ook hier geldt dat de berekening is uitgevoerd op basis van het berekende aantal draaiuren in 2020. Uitgaande van het hogere aantal draaiuren in 2012 is de groei van CO<sub>2</sub>-emissies hoger<sup>27</sup>.

#### 2030

Als uitgegaan wordt van vervanging door gas is de groei van CO<sub>2</sub>-emissies vergelijkbaar met die in 2020. Ook hier geldt dat bij vervanging door kolen de emissies aanzienlijk sterker toenemen, met 9,2 Mton. Net als in 2020 liggen cijfers evenredig hoger wanneer ook uitgegaan wordt van het wegvallen van WKK-installaties in de glastuinbouw. Deze komen uit op 13,4 Mton.

Resultaten zijn samengevat in Tabel 7.

Tabel 7 Impact afschakelen WKK-installaties op emissies CO<sub>2</sub>

Vervangende elektriciteit geproduceerd door:	Afschakeling 53% (excl. WKK-installaties glastuinbouw)		Afschakeling 87% (incl. WKK-installaties glastuinbouw)	
	2020	2030	2020	2030
Gascentrales	0,6	0,5	0,9	0,7
Kolencentrales	7,6	9,2	11,6	13,4

<sup>26</sup> Bij berekening met referentiepark incl. HE is de groei van CO<sub>2</sub>-emissies in 2020 2,4 Mton en 1,5 Mton in 2030. De afname van 2030 ten opzichte van 2020 is het gevolg van de groei van het aandeel HE-productievermogen.

<sup>27</sup> Uitgaande van het aantal draaiuren in 2012 volgt dat CO<sub>2</sub>-emissies in 2020 bij vervanging door gas toenemen met 0,9 Mton (53%-scenario) en 1,2 Mton (87%-scenario). Bij vervanging door kolen ligt dit op resp. 10,2 en 14,6 Mton. Voor 2030 liggen de cijfers op 0,6 en 0,8 Mton voor gas, en 10,4 en 14,7 voor vervanging door kolen.



## EU ETS

Een groot deel van de WKK-installaties valt onder het Europese Emissie-handelsstelsel voor broeikasgassen, het EU ETS.

Het criterium hiervoor is dat de inrichting waar de installaties staan in totaal een thermisch ingangsvermogen hebben van meer dan 20 MW. Het meeste industriële vermogen valt hieronder. Kleinere installaties in industrie en gebouwde omgeving kunnen buiten het EU ETS vallen.

Voor de glastuinbouw geldt dat de meeste installaties niet direct onder het EU ETS vallen, in het kader van het CO<sub>2</sub>-sectorsysteem voor de glastuinbouw vallen onder een plafond voor 2020. Overschrijding van het plafond wordt in de vorm van EU ETS-rechten aangekocht. In die zin is er dus ook voor de glastuinbouw een koppeling tussen de CO<sub>2</sub>-emissies en het EU ETS.

Vervangende emissies (elektriciteit en warmte) zullen meestal plaatsvinden uit installaties die binnen het EU ETS vallen. Een uitzondering zijn boilers bij kleinere industriële bedrijven. Ook afschakeling van WKK-installaties in de gebouwde omgeving kan leiden tot groei van CO<sub>2</sub>-emissies buiten het EU ETS. In deze zin zal groei van EU ETS-emissies plaatsvinden onder het plafond van het EU ETS. Uitgaande van een functionerend EU ETS-systeem zou dit dan voor Europa als geheel niet leiden tot een toename van emissies.

## 4.5 Impact op andere emissies

Afschakelen van WKK-installaties zal ook impact hebben op andere emissies naar de lucht. We kijken hier naar de emissies van NO<sub>x</sub>, fijnstof en SO<sub>2</sub>. De impact is afhankelijk van het type installatie dat WKK-productie van warmte en elektriciteit vervangt. Verder gaan we uit van de wettelijk vastgelegde emissie-eisen uit het Activiteitenbesluit. Stookinstallaties (WKK-installaties en anderen) moeten vanaf 2016/2017 aan deze eisen voldoen. Deze zijn samengevat in Bijlage D. Het effect wordt vooral bepaald door de omvang van emissies uit vervangende installaties. Een tweede factor is dat gescheiden opwekking veelal minder efficiënt zal zijn, leidend tot een grotere inzet aan brandstoffen en daarmee een hogere emissie. De te verwachten impact op emissies brengen we kwalitatief in kaart.

### Fijnstof en SO<sub>2</sub>

Voor fijnstof en SO<sub>2</sub> zal er sprake zijn van een toename als WKK-elektriciteitsproductie overgenomen wordt door kolencentrales<sup>28</sup>. Achtergrond hiervan is dat kolencentrales meer uitstoot hebben van fijnstof en SO<sub>2</sub> dan gasgestookte centrales. Bij gasgestookte WKK-eenheden is fijnstof en SO<sub>2</sub>-emissie verwaarloosbaar, en zal er geen netto toename zijn van emissies.

### NO<sub>x</sub>

Voor NO<sub>x</sub> is moeilijker vast te stellen wat het netto effect zal zijn. Voor de vervangende warmte productie geldt dat deze overall waarschijnlijk gepaard zal gaan met lagere NO<sub>x</sub>-emissies. Reden hiervoor is dat voor gasgestookte stoomketels een scherpere NO<sub>x</sub>-emissie-eis geldt (70 mg/m<sup>3</sup>) dan voor WKK-installaties (bij gasmotoren 100-340 mg/m<sup>3</sup>, bij gasturbines 50-140 mg/m<sup>3</sup>). Voor de elektriciteitskant geldt dat er nauwelijks sprake zal zijn van een afname van emissies als de productie overgenomen wordt door gascentrales, omdat grote gascentrales aan vrijwel gelijke NO<sub>x</sub>-emissies moeten voldoen als kleinere WKK-installaties (vanaf 1 januari 2017).

---

<sup>28</sup> Het betreft dan waarschijnlijk een toename van emissies van kolencentrales in het buitenland.

Voor het vaststellen van de impact van vervanging door kolengestookte-eenheden is gedetailleerder analyse is nodig om vast te stellen wat netto-effect is, mede rekening houdend met het lagere opwekkingsrendement.

# 5 Positie flexibele WKK in energiemarkt 2030

In de energiemarkt 2020/2030 zal het opgestelde vermogen aan hernieuwbare elektriciteitsproductie aanzienlijk hoger zijn. Daarbij zal het aantal uren toenemen met een overvloed aan elektriciteitsproductie (gekenmerkt door lage elektriciteitsprijzen) en schaarste (gekenmerkt door hoge elektriciteitsprijzen).

In dit hoofdstuk kijken we naar de toekomstige marktpositie van flexibele en must-run WKK-installaties in industrie en glastuinbouw, technische mogelijkheden om must-run WKK-installaties om te bouwen, en een indicatieve vergelijking van de economische positie van WKK met alternatieve flexibiliteitsopties. In de analyse maken we gebruik van de simulatie-modellering, die aan geeft hoe vaak er sprake in de scenario's sprake is van overschotten en schaarste. In hoofdstuk 3 is beschreven hoe in de modellering flexibele en must-run WKK-installaties zijn gedefinieerd.

Specifieke vragen bij flexibilisering zijn:

- Hoé verhoudt de rentabiliteit van flexibele WKK-installaties zich tot die van 'must-run' WKK-installaties?
- Wat zijn mogelijkheden en kosten om must-run WKK-installaties om te bouwen naar flexibele eenheden?
- Wat is de positie van flexibele WKK om schaarste in elektriciteitsproductie op te vangen?
- Wat is de positie van flexibele WKK met power to heat om overschotten in elektriciteitsproductie op te vangen?
- Op welke manieren wordt in markt en regulering flexibiliteit van WKK-installaties beloond, en wat zijn belemmeringen?

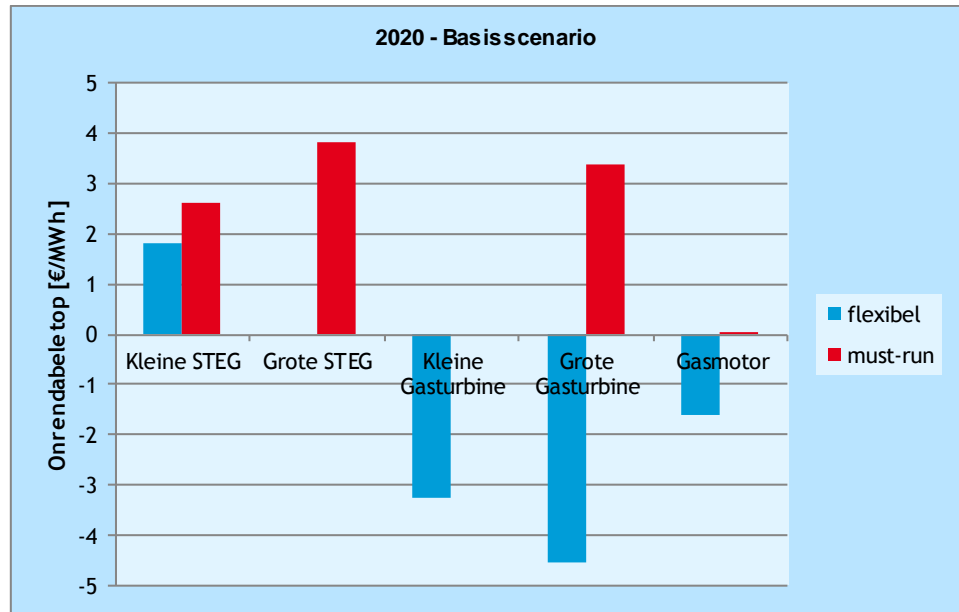
## 5.1 Rentabiliteit flexibele vs. must-run WKK-installaties

De resultaten laten zien dat flexibele eenheden over het algemeen beter presteren dan 'must-run'-eenheden. Ter illustratie geeft Figuur 10 de onrendabele top van WKK-installaties in de industrie en glastuinbouw<sup>29</sup>. e figuur is gebaseerd op het basisscenario voor 2020. De figuur laat zien dat flexibele WKK-installaties doorgaans een betere rentabiliteit hebben dan must-run eenheden. Dit sluit aan bij de resultaten van de simulatie-modellering waarin flexibele eenheden ook systematisch beter presteren.

<sup>29</sup> Aantallen WKK-eenheden per categorie:

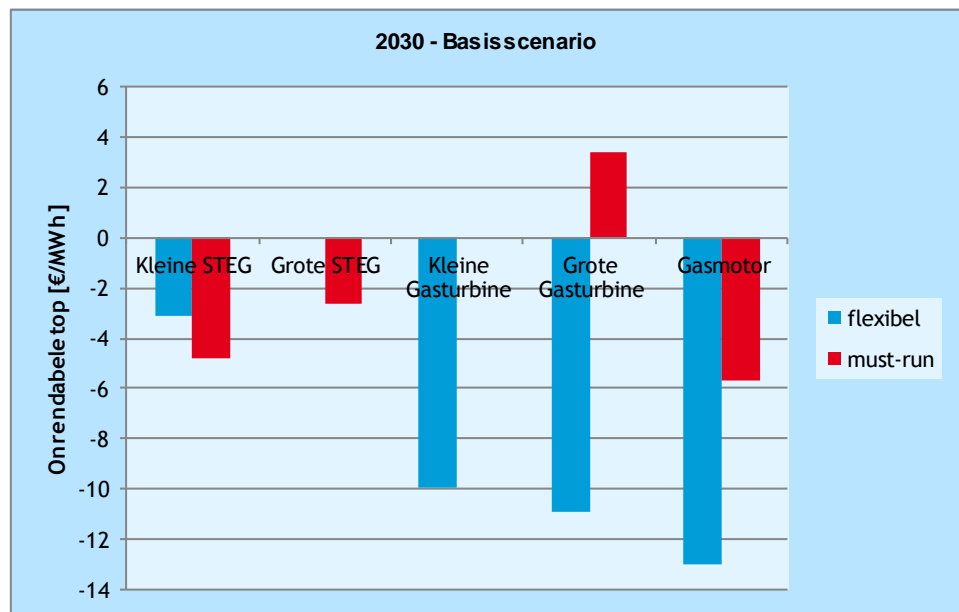
	Kleine STEG	Grote STEG	Kleine Gasturbine	Grote Gasturbine	Gasmotor
Flexibel	39	0	25	5	3.000
Must-run	9	6	0	3	19

Figuur 10 Onrendabele top van WKK-installaties in de industrie en glastuinbouw in 2020



Figuur 11 geeft een beeld van de rentabiliteit van flexibele en must-run WKK-installaties in 2030 onder het basisscenario.

Figuur 11 Positie must-run en flexibele WKK-installaties in 2030 onder het basisscenario



De figuur laat zien dat in 2030 voor alle typen de economische positie is verbeterd, met voor de flexibele WKK-installaties een betere economische positie dan voor de must-run installaties. Een uitzondering wordt gevormd door de kleine STEG. Dit valt waarschijnlijk te verklaren uit het hogere aandeel elektriciteitsproductie bij STEG's.

Bijlage J.6 geeft de figuren voor de scenario's met een hoog aandeel HE, een mark-up en een hoge CO<sub>2</sub>-prijs. Hieruit is te zien dat onder een scenario met een hoog aandeel HE het verschil tussen flexibele en must-run WKK-installaties groter wordt. Bij de scenario's mark-up en hoge CO<sub>2</sub>-prijs is de positie van de must-run installaties wat beter dan in het basis-scenario.

## 5.2 Ombouw van must-run naar flexibele WKK

Technische mogelijkheden om WKK-installaties te flexibiliseren staan beschreven in Tabel 2 in Hoofdstuk 2. De belangrijkste opties voor het aanpassen van de WKK-installatie zelf zijn het bijplaatsen van een aparte ketel en het aanpassen van de afgasketel (door aanbrengen van een bijstookbrander en verbrandingsluchtventilator). Een andere route is het bijplaatsen van een warmtebuffer. Hiermee ontstaat de mogelijkheid om warmteproductie en afname te ontkoppelen. Dit is alleen mogelijk voor laag temperatuur-toepassingen.

In totaal staat er in de industrie 1.560 MWe 'must-run' vermogen. Bij ombouw van afgassenketels liggen kosten typerend op 30-40 €/kW. Hierbij geldt dat deze ombouw technisch niet altijd mogelijk is. Uitgaande van bijplaatsing van boilers komen de totale kosten uit op ca. 100-150 €/kW. Voor het hele must-run park komt dit neer op ca. 75-150 M€. In dit geval zijn er ook operationele kosten om de boiler warm te houden. Totale kosten hiervan komen uit op ca. M€ 5/jaar.

Het flexibiliseren van een WKK-installatie leidt tot een zekere toename van primair energiegebruik ten opzichte van de must-run situatie<sup>30</sup>.

## 5.3 Positie WKK bij opvangen schaarste-situaties

In de simulatie-modellering is gekeken naar drie alternatieve opties om tijdelijke schaarste (periodes waarin hernieuwbare elektriciteitsproductie vrijwel ontbreekt) in de elektriciteitsmarkt op te vangen: pompaccumulatie (opslag in bergmeren in Noorwegen, via interconnectie), Demand Side Management en pieklast gasturbines (zonder warmtebenutting). Hiervoor zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- demand side management: het afschakelen van (industriële) verbruik tegen een gemiddelde vergoeding van 125 €/MWh<sup>31</sup>;
- een pieklast gasturbine: deze kan snel opgestart worden om elektriciteit te leveren;
- pumped storage/interconnectie: het benutten van pumped storage capaciteit in Noorwegen door aanleg van een extra kabel tussen Nederland en Noorwegen.

De simulatie-modellering laat zien dat situaties met krapte zich relatief weinig voordoen. Het aantal uren met prijzen > 100 €/MWh is verwaarloosbaar, ook in het scenario 'veel hernieuwbaar' (Bijlage F). Als gevolg hiervan worden in de simulatie de flexibiliteitsopties pieklast gasturbines en demand side management niet ingezet, met uitzondering van een beperkt aantal uren in het 'veel hernieuwbaar'-scenario. Pumped storage via interconnectie wordt wel ingezet. Dit gebeurt als de prijzen voldoende hoger zijn in Nederland dan

<sup>30</sup> Een 'back of the envelope berekening': in de modellering maken flexibele WKK-installaties in 2020 gemiddeld ca. 5.500 draaiuren. Dit betekent ca. 30% gescheiden opwekking, en een overeenkomstige groei van primair energiegebruik en emissies.

<sup>31</sup> Afgeleid uit: ENTSO-E, 2007, en: CE Delft, 2012, MKBA Intelligente netten.

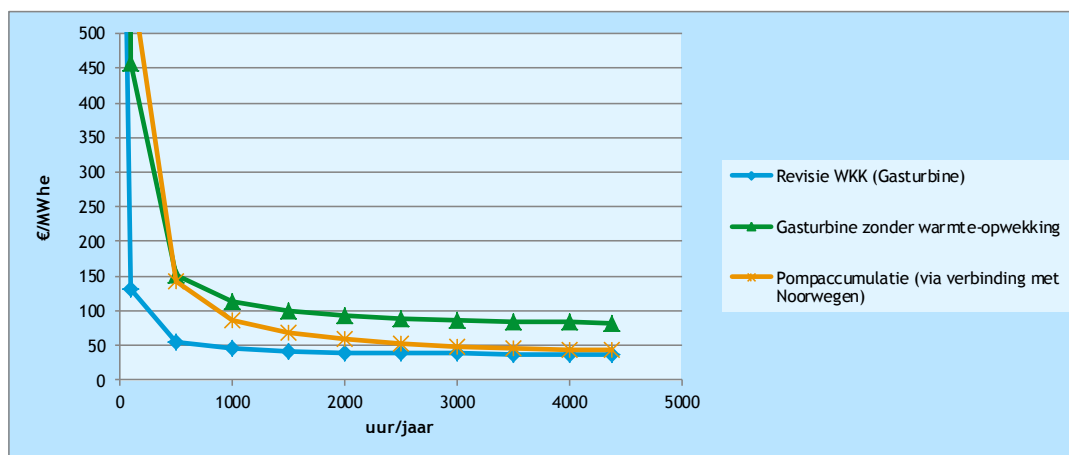
in Noorwegen. Het gaat daarbij om 0,08 TWh in het basis-scenario en 0,4 TWh in het veel hernieuwbaar scenario. Flexibele WKK wordt wel grootschalig ingezet, en blijkt dus op basis van variabele kosten/baten goedkoper dan deze alternatieve opties.

De simulatie laat verder zien dat flexibele WKK eerder wordt ingezet dan gascentrales. Als gevolg hiervan ligt het aantal draaiuren van flexibele WKK-installaties ligt aanzienlijk hoger dan dat van gascentrales: in het basisscenario 2020 ligt het aantal draaiuren van flex-WKK op 5.500, in het basisscenario 2030 op 6.500. Ter vergelijking: het aantal draaiuren van gascentrales ligt in deze twee jaren op respectievelijk 150 en 1.900.

### Totale kosten over levensduur

Ook wanneer de investeringskosten worden meegenomen, geldt dat flexibele WKK een goedkopere optie is dan pieklast gasturbines (zonder warmte-terugwinning). Pumped storage (via interconnectie met Noorwegen) is wel een concurrerende optie. Ter illustratie geeft Figuur 12 de 'levelised costs' (totaal van investeringen en operationele kosten, uitgedrukt in €/MWh) van deze drie opties<sup>32</sup>. De figuur geeft aan welke elektriciteitsprijzen nodig zijn om de optie rendabel te kunnen opereren. Voor pumped storage zijn hierbij alleen de opbrengsten meegenomen uit het opvangen van schaarste (niet opbrengsten uit het leveren in tijden van overschot)<sup>33</sup>.

Figuur 12 'Levelised' kosten voor opties om schaarste op te vangen, afhankelijk van het aantal uren dat de optie wordt ingezet



<sup>32</sup> Voor de WKK is hierbij uitgegaan van een gasturbine van 60-100 MW, met een elektrisch rendement van 42-46%. Er is uitgegaan van de investeringen die nodig zijn voor renovatie en het voldoen aan de-NO<sub>x</sub>-eisen. Voor de gasturbine voor de investeringen in een nieuwe installatie. Voor pompaccumulatie is uitgegaan van de investeringskosten van een tweede interconnectie-verbinding (600 MW) met Noorwegen. Overige uitgangspunten: gasprijs 9 €/GJ, prijs CO<sub>2</sub>: 0 €/MWh, investeringen: M€ 600/nieuwe kabel, € 260/KW voor pieklast gasturbine, en € 260 voor revisie WKK-gasturbine.

<sup>33</sup> Een aandachtspunt is de zekerheid van pumped storage, in hoeverre is levering mogelijk in tijden van droogte.

## 5.4 Positie flexibele WKK bij opvangen overschotsituaties

Flexibele WKK kan op twee manieren inspelen op situaties met overschot:

1. Afschakelen van elektriciteitsproductie.
2. Omzetten van overschotten in warmte via Power-to-Heat.

### Power to Heat

Bij Power to heat wordt elektriciteit via omgezet in warmte in elektrische boilers. Hierbij zijn hoge temperaturen haalbaar, zodat zowel warm water als stoom geproduceerd kan worden. De boiler kan in 3-10 minuten van vrijwel geen productie naar vol vermogen opschakelen. De efficiency is 99%. Power to heat is bewezen technologie en typerende investeringen zijn laag. Power to heat kan worden geïntegreerd met WKK, maar het is ook mogelijk de techniek 'stand alone' toe te passen voor productie van warmte.

Power to heat biedt kansen voor levering van warmte aan de industrie, als in gebouwde omgeving en glastuinbouw en is commercieel in operatie in Denemarken en Duitsland. Daarbij is het gekoppeld aan warmtekrachtkoppeling en stadsverwarming

Power to heat is bewezen techniek en de investeringen zijn relatief beperkt. Uit modellering volgt dat bij prijzen van < ca. 40 €/MWh PtH rendabel is: het is dan goedkoper om warmte te produceren uit elektriciteit dan uit een gasgestookte boiler. De economische haalbaarheid van power to heat wordt daarmee bepaald door het aantal uren dat elektriciteitsprijzen beneden deze grens liggen.

Elektrische stoomketel op transport (bron: VAPEC)

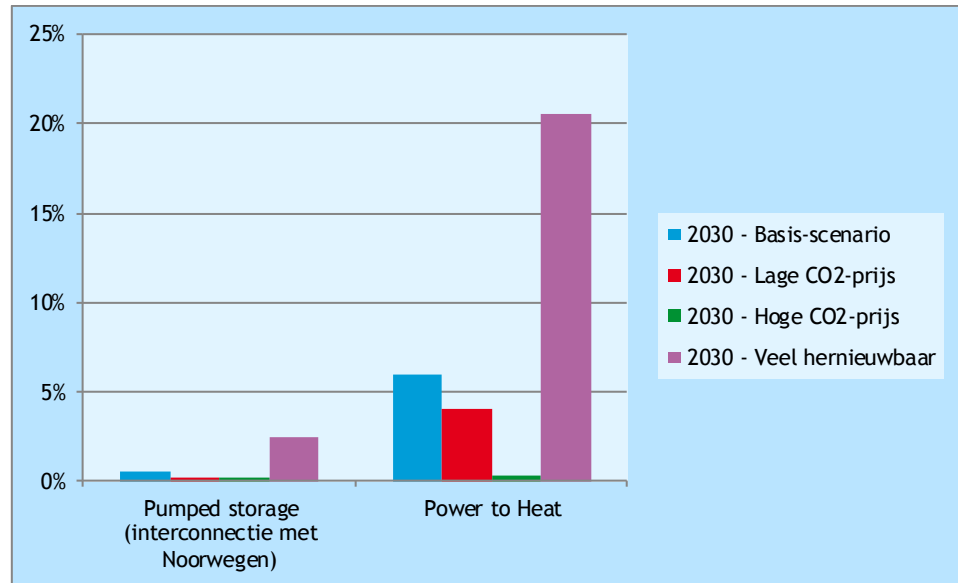


### Resultaten simulatiemodel

De simulatie laat zien dat Power to heat wordt ingezet bij prijzen < 42 €/MWh (afhankelijk van de gas- en CO<sub>2</sub>-prijs). In het basis-scenario gaat het om 500 uren. In het veel hernieuwbaar scenario liggen de prijzen lager en wordt power to heat vaker ingezet, gedurende ca. 1.600 uren.

De simulatie laat verder zien dat 'pumped storage' beperkt wordt ingezet. Reden hiervan is dat als stroomprijzen in Nederland laag zijn, deze ook vaak elders laag zijn. De goedkope stroom uit Nederland concurreert dan met goedkope stroom uit andere landen. Figuur 13 geeft de resultaten.

Figuur 13 Inzet van flexibiliteitsopties voor overschotten in simulatiemodellering



## 5.5 Huidige beloning van flexibiliteit

Flexibiliteit kan op verschillende markten worden beloond:

- termijn markt;
- de Day-ahead markt (DAM), ook wel spotmarkt genoemd;
- de intra-day markt (IDM);
- de onbalansmarkt (BM).

De markten hebben verschillende tijdschalen: tot op de dag voor levering wordt elektriciteit verhandeld op de termijnmarkt, daarna op de day ahead markt. Na sluiting van de DAM biedt de intra-day markt (IDM) nog mogelijkheid om elektriciteit te verhandelen. Op deze markten kunnen WKK-installaties een belangrijke rol spelen. In de laatste fase voor levering, tot een uur voor levering kan er productie- en afnamevermogen worden aangeboden op de onbalansmarkt. Dit is een eenzijdige markt waarin TSO TenneT optreedt als enkelvoudige inkoper. TenneT werkt met minimum blokken van 5 MWe, die het hele jaar beschikbaar moeten zijn. TenneT geeft aan dat er vrijwel geen WKK-installaties gecontracteerd regelvermogen leveren.

De beperkte voorspelbaarheid van wind- en zonne-energie zal naar verwachting leiden tot oplopende prijzen en sterkere fluctuaties op de onbalansmarkt. Ook zullen naast opbrengsten voor opregel reserve, opbrengsten voor afregelreserve belangrijk worden. Waarschijnlijk zal de DAM-markt het dominante mechanisme voor opbrengsten van flexibel vermogen vormen. Maar snelle en flexibele eenheden zullen in staat zijn nog hogere marges te genereren op de Interday Market en de Balansmarkt voor een deel van het vermogen.

Voor WKK zal de mogelijkheid van het vermarkten van flexibel vermogen verbeteren als de inkoop daarvan per kwartaal op maand wordt georganiseerd.



## 5.6 Extra kosten voor flexibiliteit

Het verhogen van flexibiliteit kan echter ook tot extra kosten leiden voor de bedrijver van de WKK-installatie. Het gaat hierbij vooral om de energiebelasting en om vergoedingen aan de netbeheerder. Bedrijven geven aan dat deze additionele kosten de rentabiliteit van flexibele WKK-installaties sterk kunnen ondergraven<sup>34</sup>.

### *Energiebelasting*

Een WKK-installatie komt op grond van de Wet Belastingen Milieugrondslag (WBM) (Rijksoverheid, 2014 in aanmerking voor een vrijstelling op de energiebelasting op het ingezette gas, *mits* de installatie een elektrisch rendement haalt van meer dan 30%<sup>35</sup>. WKK-installaties die verder flexibiliseren kunnen onder deze grens komen. Dit geldt met name voor gasturbines, STEG's hebben doorgaans een rendement dat ruim boven de 30% ligt (zie de figuur in Bijlage C). Als een WKK-installatie onder het 30%-criterium komt, komt deze in een aanzienlijk hoger belasting tarief. De bepaling dient ter voorkoming van dubbele energiebelasting op (bij de inzet van gas en de afname van elektriciteit) installaties die substantiële hoeveelheden stroom produceren. Daarnaast geldt specifiek dat stadsverwarmingsinstallaties op grond van de WBM alleen in aanmerking komen voor een verlaagde tarieven op de gasbelasting als tenminste 50% van geleverde warmte afkomstig is van WKK ('restwarmte') of duurzame bronnen (art. 59). Als ze beneden deze grens komen worden ze aangemerkt als 'blokverwarming' en geldt voor de geleverde warmte de eerste, hoogste schijf van belasting.

### *Vergoeding aan netbeheerder*

Een bedrijf met een flexibel opererende WKK-installatie, zal op tijden van overschot/lage prijzen elektriciteit afnemen van het net. Hiervoor moet een transport-vergoeding betaald worden aan de netbeheerder<sup>36</sup>. Dit leidt tot extra kosten voor de bedrijver van de WKK-installatie.

---

<sup>34</sup> Zie onder andere: AkzoNobel, 2014, Gas fired CHP: efficiency, flexibility or mothballing, <http://www.industriewarmte.nl/Portals/3/Sikke%20Klein%20-%20efficiency%20flexibilisering.pdf>.

<sup>35</sup> Art. 64: Vrijstelling van de belasting wordt verleend ter zake van de levering van aardgas en elektriciteit die worden gebruikt voor het opwekken van elektriciteit in een installatie met een elektrisch rendement van minimaal 30 percent dan wel in een installatie met behulp waarvan elektriciteit wordt opgewekt uitsluitend door middel van hernieuwbare energiebronnen en elektriciteit.

<sup>36</sup> Een dergelijke vergoeding geldt niet voor het leveren van elektriciteit vanuit de WKK-installatie.



# 6 Opties voor efficiënte en/of duurzame invulling warmtevraag industrie

Dit hoofdstuk gaat in op de vraag welke alternatieven er zijn om de warmtevraag in industrie en glastuinbouw op een duurzame wijze in te vullen. Om dit in beeld te krijgen zijn vijf bedrijven bezocht die alternatieve technieken (gaan) toepassen. Daarnaast is bij partijen die bezig zijn met ontwikkeling van duurzame alternatieven, zoals het ISPT en RVO, na gegaan wat er aan nieuwe ontwikkelingen loopt.

Dit geeft daarmee inzicht in de volgende specifieke vragen:

- Welke alternatieven passen bedrijven toe om hun warmtevraag in te vullen?; welke ervaringen hebben ze daarmee?
- Welk potentieel bieden deze alternatieven voor de Nederlandse industrie en glastuinbouw-sector als totaal?
- Wat zijn typerende kosten van deze alternatieven; hoe verhouden die zich tot warmte-opwekking met WKK?
- Wat is het potentieel van andere alternatieven, welk potentieel bieden innovatieve ontwikkelingen?

Vijf bedrijven zijn bezocht: AkzoNobel, Ammerlaan, AVEBE, Eska Graphic Board en Parenco.

De resultaten zijn besproken met de klankbordgroep (Bijlage A). Uit de gesprekken en de bespreking met de klankbordgroep volgden ook beleidssuggesties om toepassing van alternatieven te bevorderen. Deze zijn opgenomen in Bijlage L.

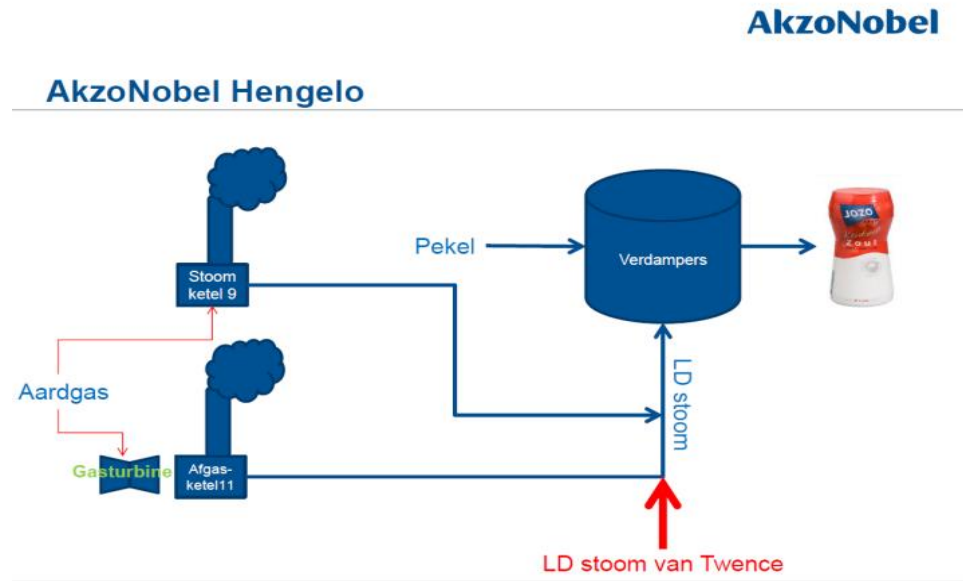
## 6.1 Toegepaste alternatieven voor verduurzaming opwekking warmte

De vijf bezochte bedrijven werken aan verduurzaming van hun warmtevraag via vijf alternatieven. Dit betreft: benutten van stoom van AVI's, stoomproductie uit biomassa, stoomproductie uit reststromen en geothermie. Een vijfde route is optimalisatie van WKK-installaties door integratie van energiestromen uit het proces met de WKK-installatie.

### 6.1.1 Benutten van stoom van AVI's

De zoutfabriek van Akzo Nobel in Hengelo gebruikt stoom van de afvalverbrandingsinstallatie Twence. Ook in andere industriële clusters leveren AVI's stoom, zoals het stoomnetwerk Delfzijl, HVC Dordrecht - Dupont en AVR Rozenburg - Tronox. De ervaringen bij Akzo Nobel zijn positief, het blijkt technisch en economisch goed haalbaar. Bij diverse AVI's in Nederland lijkt er nog potentieel voor uitbouw van stoomlevering. Een kritieke factor is hierbij of er nabij de AVI een afnemer is met een stoomvraag die aansluit op de beschikbare stoom.

Figuur 14 Stoomlevering vanuit Twence aan de zoutfabriek van AkzoNobel in Hengelo



### 6.1.2 Inzet van industriële reststromen voor stoomproductie

Parencó en ESKA Graphic Board zetten reststromen uit bewerkt oud papier in als brandstof voor stoomopwekking. Bij Parencó gaat het om een kleine fractie die met biomassa en gas wordt ingezet in een wervelbedoven. De ervaringen hiermee zijn positief. De techniek is bewezen en functioneert goed, met een rendement van meer dan ca. 85%. ESKA Graphic Board is voornemens reststromen in te gaan zetten in een vergasser, en langs die weg stoom op te wekken. Dit is een innovatieve technologie, waarvoor vanuit het Rijk een investeringssubsidie beschikbaar is gesteld.

Het lijkt hiermee ook een interessante route voor andere bedrijven met reststromen die als brandstof ingezet kan worden. Inzet als brandstof in bedrijven concurreert echter met andere verwerkingsroutes, zoals verwerking in AVI's. Het potentieel wordt daarom als beperkt ingeschat.

### 6.1.3 Inzet van biomassa voor stoomproductie

Een derde route is inzet van biomassa als brandstof voor productie van warmte. Dit is technisch haalbaar. Akzo Nobel heeft dit in operatie bij haar zoutfabriek in Mariagar in Denemarken, en Parencó bij de fabriek in Renkum. Inzet kan plaats vinden in een bio-WKK of in een stoomketel. Ervaringen zijn dat de economie kritisch is, want afhankelijk van de ontwikkeling van marktprijzen van biomassa. De investering is hoog.

Een kritiek punt is echter de beschikbaarheid en kostenontwikkeling van biomassa. Biomassavoorraden in Nederland zijn beperkt, en deze concurreren met andere toepassingen, en ook voor importen geldt dat er sprake kan zijn van concurrentie tussen verschillende toepassingen.

Figuur 15 Zoutfabriek Akzo Nobel in Mariager, Denemarken. De fabriek is geïntegreerd met stoomopwekking uit biomassa



#### **Biomassa-WKK**

##### ***Bestaande toepassingen***

In de papierindustrie worden grootschalig biomassa boilers toegepast, voor levering van warmte. Doorgaans gaat hierbij om wervelbedovens. Hierin wordt verkleinde biomassa in een wervelend zandbed verbrand, met een vermogen van tientallen tot honderden MW<sub>brandstof</sub>. De wervelbedovens zijn vaak ontworpen als WKK-installaties met een hoge druk/hoge temperatuur stoomcyclus met tegendruk stoomturbine.

##### ***Toegepaste typen biomassa:***

- vershout (chips) afkomstig uit bossen, landschappen en plantsoenen;
- Afvalhout, met name A-hout en B-hout;
- geïmporteerde pellets.

De referentieprijs voor vershout is 48 €/ton of 5,3 €/GJ. Vooral door interacties aan de grens met Duitsland en België zal niet overal in Nederland snoei- en dunningshout voor deze prijs verkregen kunnen worden. Pellets zijn met een prijs van €140/ton of €8,5/GJ aanzienlijk duurder.

##### ***Processpecificaties en opwekkingsrendementen***

Het ketelrendement van een goed ontworpen boiler bedraagt voor lage temperatuur retourcondensaten (50-70 °C) tot ruim 90% op onderwaarde. Door toepassen van een rookgascondensator kan dit eventueel tot 105% worden opgevoerd.

Stoomparameters zijn vooral gelimiteerd door schaalgrootte (economische overwegingen) en biomassaspecificaties (vooral chloorgehalte). Bij grootschalige installaties van 100-200 MW<sub>brandstof</sub> wordt stoom geproduceerd van 100-120 bar en 500-540°C. Stoomcycli met herverhitting worden toegepast vanaf schaalgroottes vanaf ongeveer 75 MW<sub>brandstof</sub>. Het maximale elektrische rendement bedraagt voor een schaalgrootte van 20 - 50 MWe en zonder stoomherverhitting ongeveer 30% (netto). Kracht/warmte verhouding bij maximale warmtelevering bedraagt - afhankelijk van de parameters voor verse stoom en temperatuurniveau van geleverde warmte 0,3 ÷ 1 tot 0,5 ÷ 1.

##### ***Milieumaatregelen en emissies***

Een typische grootschalige biomassa WKK-installatie zal voor emissiereductie worden uitgerust met DeNOx SNCR, doekenfilter met droge rookgasontzwaveling, natte wasser en nat elektrofilter. Typische rookgasconcentraties voor verbranden van A-hout en B-hout bij een dergelijke rookgasreiniging zijn (waarden voor 11 vol% O<sub>2</sub> in droog rookgas): Fijnstof < 1 mg/Nm<sup>3</sup>; SO<sub>2</sub> 5 - 10 mg/Nm<sup>3</sup> en NO<sub>x</sub> 65 mg/Nm<sup>3</sup>

#### **Investerings en operationele kosten**

In de SDE+ regeling (SDE+ 2014) worden de volgende kostenparameters aangehouden:

Bio WKK: investeringskosten: 1.500-2.000 €/kWth\_input, vaste O&M kosten: 80-110 €/kWth\_input. Ter vergelijking

Bio boiler: investeringskosten: 400 €/kWth\_input, vaste O&M kosten: 60 €/kWth\_input.

### **6.1.4 Lage temperatuur geothermie**

Geothermie is een bewezen technologie voor laag-temperatuurtoepassingen, en wordt inmiddels bij tien glastuinbouwbedrijven toegepast, waaronder Ammerlaan in Pijnacker. Ervaringen zijn dat het technisch en economisch interessant is. Maar de technologie is nog niet uitontwikkeld, waardoor zich onverwachte ontwikkelingen voordoen, die leiden tot extra kosten. RVO schat het potentieel in op 17 PJ in 2020. Het technisch potentieel is aanzienlijk groter.

Figuur 16 Geothermie installatie bij Ammerlaan in Pijnacker



### **6.1.5 Diepe geothermie (> 5 km diepte)**

Diepe geothermie is een optie om stoom op temperatuur-niveaus hoger dan 200 °C te produceren. Het technisch potentieel is fors, maar de toepassing is nog niet volledig in de praktijk bewezen. Een samenwerkingsverband van Parenco, Ballast Nedam en Alliander onderzoekt de haalbaarheid van diepe geothermie voor de stoomvoorziening bij Parenco. Het concept voorziet in boring op 6,5 km diepte, dit zou 60 MWth opleveren op een temperatuurniveau van 240°C. Vanuit de bron zou tevens restwarmte aan de omgeving geleverd worden. De techniek vergt een hoge investering (ca. M€ 110), maar de operationele kosten zijn laag. Naast Parenco wordt ook elders onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van diepe geothermie.

### 6.1.6 Verhogen van het rendement van een WKK-installatie, door procesintegratie

Een andere route is het verhogen van het rendement van WKK-installaties. Bij AVEBE worden warmtestromen vanuit de WKK geïntegreerd met processtromen in het bedrijf, leidend tot rendementen > 90%. Deze hoge efficiency draagt bij aan versterking van de marktpositie van de WKK.

## 6.2 Andere alternatieven

De alternatieven waarmee de vijf bezochte bedrijven bezig zijn, geven niet een uitputtend beeld van de mogelijkheden om de warmtevraag duurzaam in te vullen. Uit de gesprekken met de bedrijven, klankbordgroep en andere stakeholders komen ook andere opties naar voren. Een deel hiervan is nog in ontwikkeling.

### 1. Warmtelevering

Vanuit de industrie zijn er substantiële stromen aan restwarmte. Een deel hiervan ligt op hogere temperatuur, en biedt kansen om benut te worden voor laag-temperatuurtoepassingen, zoals de glastuinbouw. Op dit moment loopt verkennend onderzoek naar benutting van restwarmte uit het Rotterdamse havengebied naar glastuinbouw in het Westland.<sup>37</sup>

### 2. Warmtepompen

Warmtepompen bieden perspectief op conversie van laagwaardige naar hoogwaardige warmtestromen, en kunnen daarmee bijdragen aan vermindering van de warmtevraag. In de TKI-ISPT wordt onderzoek gedaan naar technieken warmtestromen omzetten naar hogere temperaturen. Een pilot loopt bij Smurfit Kappa in Roermond. De insteek is om te komen tot terugverdiertijden van 2-3 jaar. Het ISPT ziet hiervoor een totaal besparingspotentieel van 60 PJ<sup>38</sup>. Het gaat hierbij vooral om toepassingen met een warmtevraag kleiner dan ca. 200°C.

Een andere optie, ook gebaseerd op warmtepomp-technologie, is de *HIDiC*. Hiermee kunnen destillatieprocessen energie-efficiënter opereren, en richt zich daarmee op toepassingen op hogere temperatuurniveau's. De techniek wordt nog niet op demo-schaal toegepast. Het ISPT voorziet hiervoor een besparingspotentieel van 11-20 PJ.

### 3. Power to pressure

Power to pressure is een techniek waarmee lage druk stoom omgezet wordt naar hoge druk stoom. Dit gebeurt via een pomp met elektrisch vermogen, en lijkt rendabel bij lage elektriciteitsprijzen. Dit is ook onderdeel van onderzoek door de TKI-ISPT.

### 4. HR-stoomketel

Bij deze geoptimaliseerde stoomketel komt een relatief bescheiden hoeveelheid elektriciteit vrij die 'binnen de fabriekspoort' is te gebruiken. Mogelijk biedt dit perspectief op een positief verdienmodel. Het concept is in Nederland ontwikkeld, en staat klaar voor een eerste praktijktoepassing.

<sup>37</sup> <http://www.duurzaambedrijfsleven.nl/63890/grontmij-studeert-op-restwarmte-rotterdam/>

<sup>38</sup> (TKI-ISPT, 2013).



### 6.3 Besparingspotentiën, kosten en bijdrage aan doelstellingen voor hernieuwbare energie

Tabel 8 geeft een overzicht van de technieken en de potentiën. De potentiën zijn gebaseerd op het de input van RVO voor de warmtevisie EZ, scenario 'intensivering'. Bij afschakeling van 53% van het WKK-park moet 40,3 PJ warmte op een andere manier ingevuld worden. De potentiën van alternatieven zijn in vergelijking hiermee beperkt.

Tabel 8 Technieken en potentiën

	Toegepast/ in ontwikkeling bij:	Technisch haalbaar	Potentieel 2020 PJ (gerealiseerd in 2012)
Stoom uit AVI	Akzo Nobel	✓	13 (7)
Stoom uit reststromen	Parenco, Eska Graphic Board	✓	N.B.
Stoom uit biomassa	Akzo Nobel	✓	17 (3)
Geothermie lage temperatuur	Ammerlaan - TGI	✓	13 (0.5)
Geothermie hoge temperatuur	Parenco		0
Optimalisatie WKK/energetische integratie	AVEBE	✓	N.B.

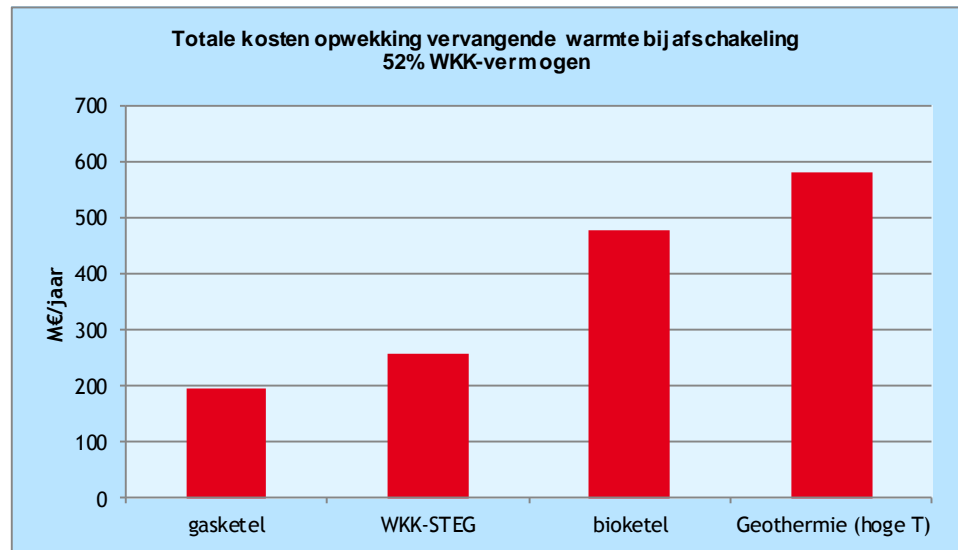
De kosten van de opties geothermie en biomassa liggen hoger dan bij warmteproductie uit een WKK of gasboiler.

Ter illustratie geeft Figuur 17 de kosten voor productie van 40,3 PJ industriële warmte via een gasketel, WKK-STEG, bioketel en HG Geothermie. Voor de WKK is hierbij uitgegaan van een industriële STEG, waarbij de onrendabele top 2020 is toegerekend aan de warmteproductie. Voor de boiler is uitgegaan van een gasprijs van € 0,18/m<sup>3</sup>, het correctiebedrag uit de SDE+ regeling 2014. Voor biomassa en geothermie is uitgegaan van het basisbedrag uit de SDE+2014, esp. 11,8 €/GJ (ketel vaste biomassa > 5 MWth) en 14,4 €/GJ (geothermie warmte > 3.300 m diep)<sup>39</sup>. Dit leidt tot M€ 480/jaar voor productie van warmte via een bioketel, en M€ 580/jaar voor inzet van hoge temperatuur geothermie.

<sup>39</sup> RVO, 2014, SDE+ 2014, <http://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/02/Digitale%20brochure%20SDE%2B%202014.pdf>



Figuur 17 Typerende kosten voor opwekking van 40,3 PJ warmte uit gasboiler, WKK-STEG, biomassa-ketel en diepe geothermie



Productie van hernieuwbare warmte in de industrie of glastuinbouw levert een bijdrage aan realisatie van de doelstellingen voor hernieuwbare energie in 2020. In vergelijking tot productie van hernieuwbare elektriciteit is dit relatief goedkoop. Ter illustratie: voor elektriciteitsproductie uit biomassa (installaties > 10 MW) ligt het basisbedrag op 31-43 €/GJ geproduceerde elektrische energie, voor productie van wind op zee op 38 €/GJ. Dit ligt substantieel hoger dan de waarden van 11,8 €/GJ voor ondiepe geothermie, 11,8 €/GJ voor warmte uit biomassa, en 14,4 €/GJ voor diepe geothermie<sup>40</sup>. De hogere kosten voor hernieuwbare elektriciteit zijn te verklaren uit het lagere omzettingsrendement.

<sup>40</sup> Bron: Voorlopige correctiebedragen stimulering duurzame energieproductie 2014 ten behoeve van voorschotverlening 2014, RVO, mei 2014.



# 7 Conclusies

## WKK-park

Het totale WKK-park bestaat per 1 januari 2014 uit 8,9 GWe productie-vermogen: 2,8 GWe in de industrie, 3,1 GWe in de glastuinbouw en 3,6 GWe in de gebouwde omgeving. Deze WKK-installaties leverden in 2012 42% van de Nederlandse elektriciteitsproductie.

Een deel van het WKK-park is meer of minder flexibel regelbaar. Deze installaties zijn in staat om de productie van elektriciteit te verlagen als prijzen ongunstig zijn, en te verhogen bij betere prijzen. Het vermogen in de glastuinbouw is flexibel. In de industrie kan ongeveer de helft als flexibel worden aangemerkt, de andere helft als 'must-run'.

Door ongunstige marktomstandigheden neemt het opgestelde productie-vermogen af. In de industrie is in de afgelopen vier jaren 1,0 GWe buiten gebruik gesteld. Bedrijven geven aan dat in de komende jaren meer vermogen zal worden afgeschakeld, waaronder tenminste 0,9 GWe in de industrie.

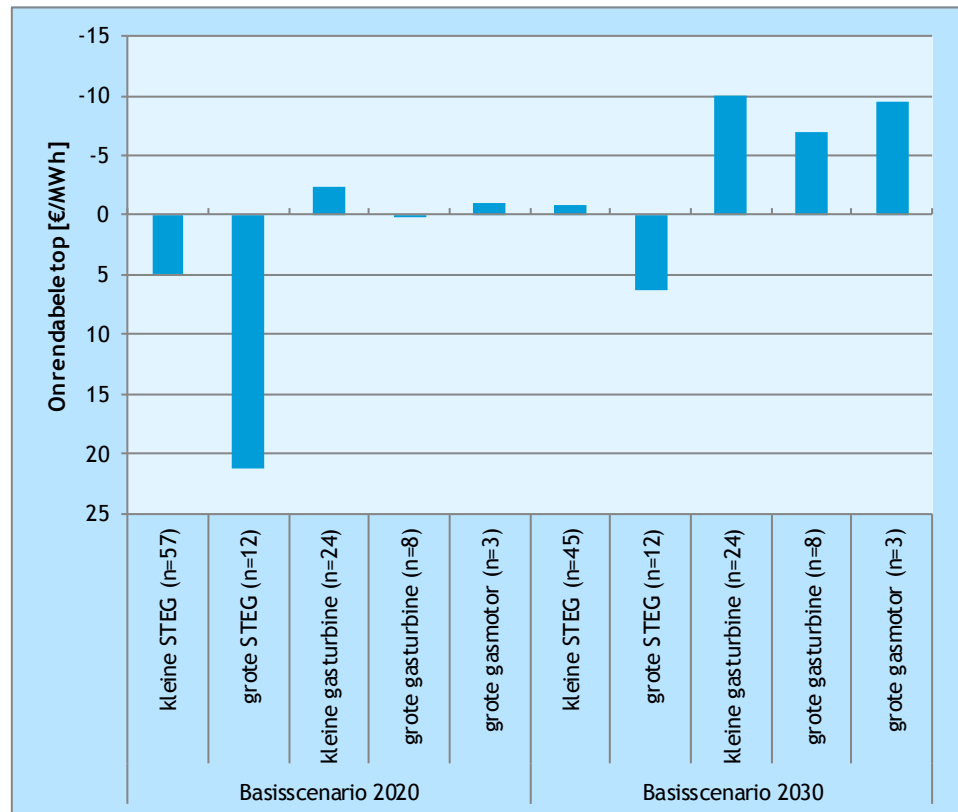
## Positie WKK in energiemarkt 2020/2030

Op basis van gedetailleerde analyse volgt dat de marktpositie van WKK-installaties ook in 2020 ongunstig is. 53% van het opgestelde park heeft een onrendabele top. Dit betreft 67% van de installaties in de industrie en gebouwde omgeving. De installaties in de glastuinbouw draaien marginaal rendabel.

De ongunstige marktpositie van WKK komt voort uit een complex van tegelijk optredende factoren (beperkte groei vraag, veel hernieuwbare energie uit Duitsland, groei productievermogen fossiele centrales, lage CO<sub>2</sub>-prijzen, lage prijzen kolen, relatief hoge gasprijzen). Simulatie-modellering laat zien dat in 2020 gasgestookte elektriciteitscentrales nog sterker dan WKK-installaties kampen met moeilijke marktomstandigheden, en vrijwel geen draaiuren maken.

In 2030 zijn de marktomstandigheden gunstiger door afschakeling van fossiel vermogen en een stijgende vraag. Hierdoor verbetert de positie van WKK-installaties. Uitgangspunt voor deze modellering is het WKK-park van 2014. Het is echter mogelijk dat een fors deel hiervan in 2030 al zal zijn afgeschakeld. Figuur 18 geeft de onrendabele toppen van WKK-installaties in 2030 en 2030:

Figuur 18 Onrendabele toppen van WKK-installaties in 2020 en 2030. Een onrendabele top betekent dat de installatie niet rendabel draait



In een gevoeligheidsanalyse is gekeken wat de positie is van WKK bij andere scenario's voor ontwikkeling van CO<sub>2</sub>-prijzen en hernieuwbare productiecapaciteit. Tevens is gekeken naar de positie van WKK-installaties als er weer sprake zou zijn van een 'mark-up'. Een 'mark-up' is de bereidheid in de markt om meer te betalen dan de marginale kostprijs voor stroom, in een situatie dat er evenwicht is tussen vraag en aanbod. Uit de analyse volgt dat:

- bij een hogere CO<sub>2</sub>-prijs (71€/ton CO<sub>2</sub>, overeenkomstig het WEO 450 ppm scenario) verbetert de rentabiliteit van WKK-installaties sterk. Een belangrijke oorzaak zijn de hogere elektriciteitsprijzen. Alle typen WKK-installaties worden dan rendabel.
- Ook als er in de markt weer sprake zou zijn van een 'mark-up' op de elektriciteitsproductie verbetert de rentabiliteit sterk. In het rekenvoorbeeld van 8,1 €/MWh worden alle types WKK-installaties weer rendabel.
- Bij een hoog aandeel hernieuwbaar verslechtert de absolute positie van WKK. Reden hiervan is dat de elektriciteitsprijzen dan lager liggen. Andere fossiele eenheden kampen hier ook mee. De relatieve positie van flexibele eenheden (waaronder flexibele WKK) verbetert bij veel HE wel ten opzichte van must-run eenheden.

### Impact afschakelen WKK-installaties op energiegebruik en CO<sub>2</sub>-emissies

Als het deel van de WKK-installaties dat niet rendabel is, wordt afgeschakeld, zal dit leiden tot vervangende productie van warmte en elektriciteit. Afhankelijk van het type installaties dat dit overneemt, resulteert dit in groei van primair energiegebruik en CO<sub>2</sub>-emissies. Het finale energiegebruik verandert niet. Drie varianten zijn onderzocht: vervanging door het referentie-

park (zonder hernieuwbare energie), vervanging door gasgestookte centrales en vervanging door kolengestookte centrales. Bij gascentrales gaat het om Nederlandse centrales, bij kolencentrales hoofdzakelijk om centrales in het buitenland.

De simulatie geeft een indicatie dat vervanging door gascentrales minder waarschijnlijk is, vanwege de ongunstige positie van gascentrales in de merit-order. Vervanging door (buitenlandse) kolencentrales lijkt aannemelijk, mits er voldoende transportcapaciteit is. Nadere analyse hiervan is gewenst.

De impact op primair energiegebruik in 2020 is weergegeven in Tabel 9. De tabel geeft aan hoeveel het primaire energiegebruik groeit bij afschakeling van resp. 53% van het WKK-park (het deel dat volgens de analyse in 2020 niet rendabel is) en 87% (dat deel, plus de WKK-installaties in de glastuinbouw). De emissies zijn berekend op basis van het aantal draaiuren van installaties in 2020 en 2030. Uitgaande van het aantal draaiuren in 2012 liggen de cijfers hoger.

Tabel 9 Ontwikkeling primair energiegebruik bij afschakeling van WKK-vermogen

Vervangende elektriciteit geproduceerd door:	Afschakeling 53% PJP	Afschakeling 87% (incl. WKK-installaties glastuinbouw) PJP
Referentiepark	40	68
Gascentrales	11	24
Kolencentrales	40	68

De emissies van CO<sub>2</sub> in 2020 nemen bij vervangende elektriciteitsproductie door gascentrales toe met resp. 0,6 en 0,9 Mton. Als kolencentrales deze overnemen ligt deze aanzienlijk hoger, resp. 7,6 en 11,6 Mton.

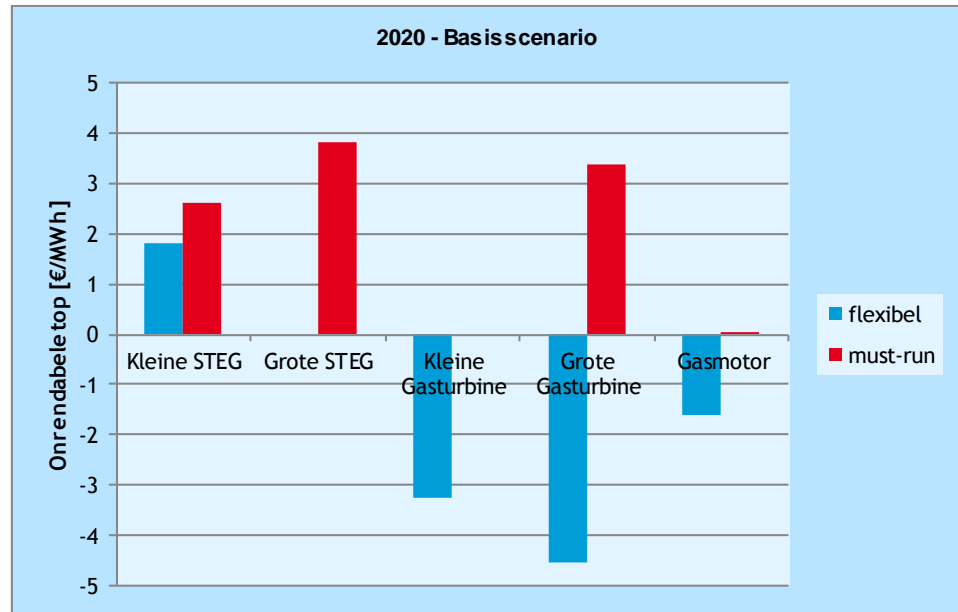
Een factor die bijdraagt aan de ongunstige economische positie van WKK is de groei van het aandeel hernieuwbare elektriciteit. Dit draagt voor het elektriciteitsproductiesysteem als geheel wel substantieel bij aan verlaging van het primaire energiegebruik: 143 PJP in 2020 en 251 PJP in 2030<sup>41</sup>.

### Positie flexibele WKK-installaties in energiemarkt 2030

Uit de analyse blijkt dat in industrie en glastuinbouw flexibele WKK-installaties doorgaans rendabeler opereren dan must-run installaties. Dit geldt zowel op basis van variabele kosten en baten, als wanneer de investeringen worden meegenomen. Het patroon is met name te zien bij gasturbines en gasmotoren, bij STEG-installaties is het onderscheid minder duidelijk. Figuur 19 geeft de positie van de diverse typen installaties in 2020.

<sup>41</sup> Berekend voor het basisscenario.

Figuur 19 Rendabiliteit van flexibele en must-run WKK-installaties in 2020



Er zijn technische mogelijkheden om must-run WKK-installaties om te bouwen naar flexibele installaties. De belangrijkste opties zijn het aanpassen van een afgassenketel, het bijplaatsen van een ketel, en het plaatsen van een warmtebuffer. Hiermee kan 100% flexibiliteit bereikt worden, met schakel-snelheden < 1 uur. De totale kosten voor het flexibel maken van de industriële must-run WKK-installaties (1,62 GWe) liggen op ca. M€ 75-150.

Flexibele WKK-installaties kunnen een rol spelen in situaties van schaarste door extra elektriciteit te produceren. In de simulatie is gekeken in hoeverre andere flexibele opties dat ook doen. Hieruit blijkt dat pieklast gasturbines en vraagsturing niet worden ingezet, en pumped storage (via interconnectie) wel.

Flexibele WKK-installaties kunnen ook een rol spelen in het opvangen van overschotten. Enerzijds door tijdelijk productie af te schakelen, en anderzijds door met power to heat overschotten om te zetten in warmte. In de simulatie blijkt het vooral ingezet te worden in een scenario met veel hernieuwbare energie. Power to heat kan in WKK-installaties worden geïntegreerd, maar kan ook gekoppeld worden aan andere ketelinstallaties.

In de markt wordt het leveren van productie in tijden van schaarste beloond met hogere prijzen. Dit gebeurt op verschillende markten, zoals de day ahead markt, intra-day markt en de onbalansmarkt.

Flexibilisering leidt op grond van markcondities en energiebelasting ook tot extra kosten. Het betreft:

- Energiebelasting: WKK-installaties komen alleen in aanmerking voor vrijstelling van energiebelasting als ze tenminste een elektrisch rendement halen van 30%.
- Energiebelasting: stadsverwarmingsinstallaties komen alleen in aanmerking voor een verlaagd energietarief als ze tenminste 50% van hun warmte leveren uit de WKK.
- Bij afname van stroom van het net gelden transportvergoedingen voor de netbeheerder.

Bedrijven met WKK-installaties geven aan dat dit belangrijke obstakels zijn om verder te flexibiliseren.

### **Alternatieve opties voor invullen warmtevraag industrie**

Er zijn diverse alternatieve opties om de warmtevraag in de industrie duurzaam en/of efficiënt in te vullen:

- Benutten van stoom van AVI's wordt al door diverse clusters van bedrijven toegepast. Het blijkt technisch en economisch haalbaar. Potentieel voor verdere uitbouw is beperkt.
- Inzet van biomassa voor stoomproductie is technisch haalbaar. Kritiek punt is de beschikbaarheid en kostenontwikkeling van biomassa. Biomassavoorraden in Nederland zijn beperkt, en concurreren met andere toepassingen.
- Inzet van industriële reststromen voor stoomproductie is technisch ook haalbaar. Beschikbare afvalstromen zijn echter gelimiteerd.
- Voor geothermie is er in beginsel een groot technisch potentieel. Het is een bewezen technologie voor laag-temperatuurtoepassingen, en wordt inmiddels bij tien glastuinbouwbedrijven toegepast. Wel kunnen zich bij toepassing van de technologie onverwachte ontwikkelingen voordoen, die leiden tot extra kosten. Diepe geothermie (> 5 km diepte) is een optie om stoom op temperaturniveaus hoger dan 200 °C te produceren. Technisch potentieel is fors, maar de techniek is nog niet volledig bewezen.
- Het rendement van een WKK-installatie kan soms verhoogd worden door stromen van de WKK te integreren met de processen in het bedrijf. Bij AVEBE zijn langs deze weg rendementen > 90% voor de WKK gerealiseerd, wat bijdraagt aan versterking van de marktpositie van de WKK.

Samenvattend geldt dat het potentieel voor het benutten van restwarmte van afval en/of restwarmte uit AVI-installaties beperkt is. Voor biomassa en geothermie zijn potentiële groter, maar geldt dat de productiekosten van warmte substantieel hoger liggen dan bij productie van warmte uit boilers of WKK-installaties. Het vervangen van de productie van warmte van 40,3 PJ (de gedeelde warmteproductie bij afschakeling van 4.600 MWe, 53% van het park), vergt subsidie in de orde van 480-580 M€/jaar. Warmteproductie uit hernieuwbare bronnen levert wel een bijdrage aan het realiseren van de doelstelling voor hernieuwbare energie. In vergelijking tot productie van hernieuwbare elektriciteit liggen de kosten relatief laag.





# Bibliografie

AkzoNobel, 2014. Gas fired CHP: efficiency, flexibility or mothballing, presentation. [Online]

Available at: <http://www.industriewarmte.nl/Portals/3/Sikke%20Klein%20-%20efficiency%20flexibilisering.pdf>  
[Accessed 2014].

CBS Statline, 2014. Elektriciteit en warmte; productie en inzet naar energiedrager. [Online]

Available at: ,  
<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=80030NED&D1=1&D2=a&D3=0,2-6,11&D4=14&HDR=T,G1&STB=G3,G2&VW=T>  
[Accessed 18 juli 2014].

CBS Statline, 2014. Elektriciteit; productie en productiemiddelen. [Online]

Available at:  
<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=37823wkk&D1=6-7,9,14-17&D2=1,3-9,l&D3=1&D4=1-4&D5=a&HDR=G4&STB=T,G1,G2,G3&VW=T>  
[Accessed 2 april 2014].

CE Delft, 2012. Maatschappelijk kosten en baten van intelligente netten, Delft: CE Delft.

Cogen Nederland, 2013. Bijdrage voor SER energieakkoord (“Benodigde vergoeding voor WKK, gebaseerd op de huidige en verwachte marktomstandigheden, op basis van CBS, ECN, VNCI, VNPI, KVNP en publieke bronnen”). Niet openbaar, s.l.: Cogen.

Davidse Consultancy, 2012. Wamte-energie, de motor van de industrie, Bennekom: Davidse Consultancy.

ECN ; RIVM ; Novem ; CPB, 2001. Protocol Monitoring Energiebesparing, Petten: ECN.

ECN, 2012. Berekening referentierendement voor de opwekking van elektriciteit. [Online]

Available at: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2011/n11016.pdf>  
[Accessed 2014].

ECN, 2012. Effecten van de afschaffing van NOx-emissiehandel, Petten: ECN.

Energy Matters (A.Schlatmann), 2014. Overzicht WKK park in Nederland, notitie 9 juli 2014, s.l.: s.n.

Energy Matters, 2012. Slechte marktomstandigheden dwingen industriële WKK tot optimalisatie. [Online]

Available at:  
<http://www.energymatters.nl/Actueel/Columns/tabid/121/articleType/ArticleView/articleId/79/Slechte-marktomstandigheden-dwingen-industriële-WKK-tot-optimalisatie.aspx>  
[Accessed 2014].

Energy Matters, 2014. Flexibilisering van must run WKK, notitie 21 mei (niet openbaar gepubliceerd, s.l.: Energy Matters.

ENTSO-E, 2007. Demand response as a resource for the adequacy and operational reliability of the power systems, Explanatory Note. [Online] Available at: [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/etso/security\\_of\\_supply/Demand%20Side%20Response%20Explanatory%20Note.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/etso/security_of_supply/Demand%20Side%20Response%20Explanatory%20Note.pdf) [Accessed 2014].

ENTSO-E, 2014. Scenario Outlook and Adequacy forecast 2014-2030, Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E).

EU (Rapid), 2007. Concurrentie: studie elektriciteitsmarkten bevestigt uitkomsten sectoraal onderzoek Commissie. [Online] Available at: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-07-522\\_nl.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-07-522_nl.htm) [Accessed 2014].

IEA, 2013. World Energy Outlook 2013, Paris: International Energy Agency (IEA).

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

Kenniscentrum InfoMil, 2014. Stookinstallaties : hulpmiddel regelgeving en emissie-eisen. [Online] Available at: <http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/stookinstallaties/hulpmiddel/> [Accessed 2014].

PBL en ECN, 2012. Referentieraming energie en emissies : actualisatie 2012, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Rijksoverheid, 2014. Wet belastingen milieugrondslag, Wet van 23 december 1994, houdende vaststelling van de Wet belastingen op milieugrondslag,. [Online] Available at: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0007168/geldigheidsdatum\\_26-09-2014](http://wetten.overheid.nl/BWBR0007168/geldigheidsdatum_26-09-2014) [Accessed 2014].

RVO, 2014. Input ten behoeve van warmtevisie EZ, conceptversie 23 april 2014, scenario 'intensivering 2020' (niet openbaar), Den Haag: RVO.

RVO, 2014. SDE+ 2014 : Zo vraagt u subsidie aan voor de productie van duurzame energie. [Online] Available at: <http://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/02/Digitale%20brochure%20SDE%20B%202014.pdf> [Accessed 2014].

SER, 2013. Energieakkoord voor duurzame groei, Den Haag: Sociaal Economische Raad (SER).

SQ, 2012. Uniforme maatlat voor de industrie, Een instrument voor het beoordelen van de effecten van energiebesparing, inzet van hernieuwbare energiebronnen en CO2 emissiereductiemaatregelen op de energie- en milieuprestaties van de energievoorziening van industrië. [Online] Available at: <http://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/12/Rapport%20Uniforme%20Maatlat%20Industrie.pdf>

[Accessed 2014].

Tennet, 2013. Kwaliteits-en capaciteitsdocument 2013, Arnhem: Tennet.

TKI-ISPT, 2013. Uw business case voor energiebesparing. [Online]

Available at:

[https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/corp/img/3\\_Tjeerd\\_Jongsma\\_Overzicht\\_subsidies.pdf](https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/corp/img/3_Tjeerd_Jongsma_Overzicht_subsidies.pdf)

[Accessed 2014].



# Bijlage A Stuurgroep en klankbordgroep

## **Stuurgroep**

Dhr. E.J. de Vries, Ministerie EZ, voorzitter 1<sup>e</sup> twee bijeenkomsten  
Mw. M. Wagenaar, Ministerie EZ, voorzitter laatste twee bijeenkomsten  
Dhr. K. den Blanken, Cogen Nederland  
Dhr. M. Blanson Henkemans, Ministerie EZ  
Dhr. R. Gerrits, VNCI  
Dhr. E.H. Kloppenborg, Ministerie EZ  
Dhr. C. Lambregts, VNP  
Dhr. R.P.M. van Mossevelde, RVO  
Dhr. W. Ruijgrok, Walter, Energie Nederland  
Dhr. R. van der Valk, LTO Glaskracht

## **Klankbordgroep**

Dhr. M. Blanson Henkemans, Ministerie EZ  
Dhr. R.P.M. van Mossevelde, RVO  
Dhr. C. Lambregts, VNP  
Dhr. R. Gerrits, VNCI  
Dhr. S. Schlatmann, Energy Matters



# Bijlage B WKK-productiepark per 01-01-2014

## Huidig park

Tabel 10 geeft een overzicht van het WKK-park in de verschillende sectoren. Daarbij is een onderscheid gemaakt naar flexibele, deels flexibele (zgn. partial spark-spread) en 'must-run' WKK-installaties. Deze zijn in onderstaande tabel resp. aangeduid met flex, PSP en MR.

Tabel 10 Opbouw WKK-productiepark (bron: Energy Matters)

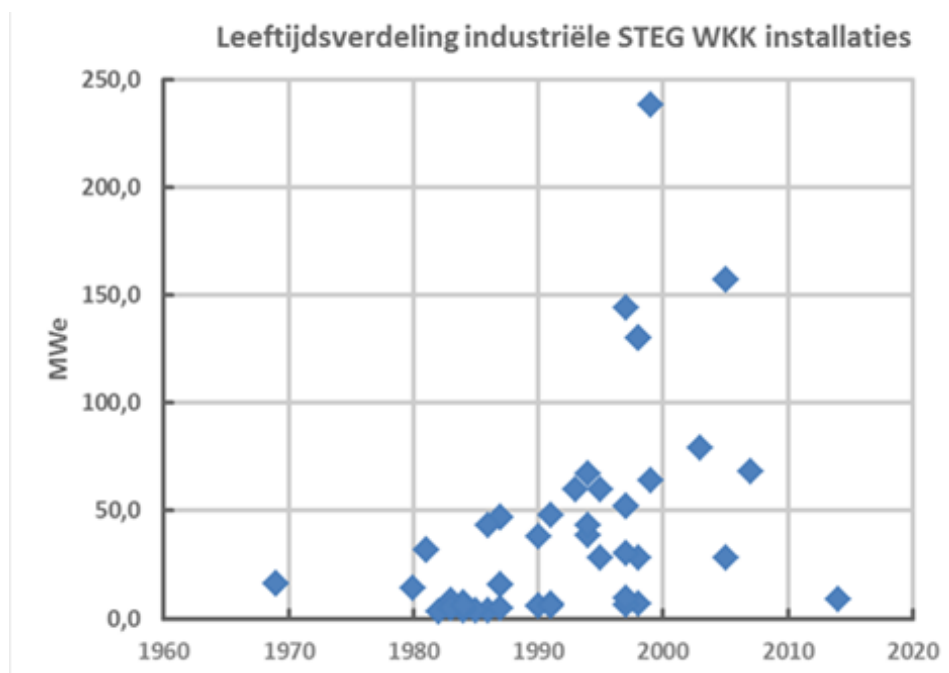
	Gasmotor		STEG			Gasturbine			Stoomturbine			Totaal
	Flex	MR	Flex	PSP	MR	Flex	PSP	MR	Flex	PSP	MR	
Raffinaderijen			305	314	48	21			24			712
Voedingsindustrie			85	45,5	16,5	117			44		18	326
Chemische industrie			238	628	140	58	40,4	54,6	28	22	24	1233
Papierindustrie			122		85	4			6			217
Overige industrie			106		182	72	4,8	1,2	8			374
<b>Totaal industrie</b>		19	856	988	472	272	45	55,8	110	22	42	2862
<b>Glastuinbouw</b>	3060											3060
<b>Geb. omgeving</b>	580		2055								321	2956
<b>Totaal</b>			2911	1975	472	272	90	56	110	44	363	8879

## Leeftijdsopbouw WKK-installaties

De meeste WKK-installaties dateren uit de periode 1980-2005. Ter illustratie geeft Figuur 20 de leeftijdsopbouw van STEG's en de gasturbines.

De WKK-installaties in de glastuinbouw zijn wat later geplaatst, in de periode 2000-2010.

Figuur 20 Leeftijdsopbouw industriële STEG WKK-installaties



Bron: Energy Matters.

Figuur 21 Geplaatst vermogen in de glastuinbouw



Bron: Energy Matters.

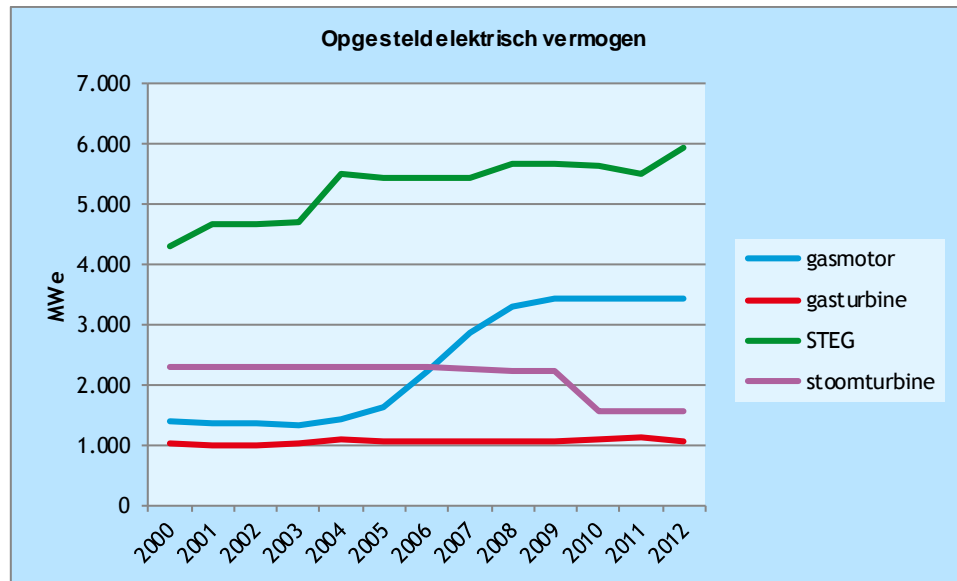
### Ontwikkeling in productiecapaciteit en geleverde elektriciteit en warmte

In de jaren tot 2008-2012 was volgens CBS-cijfers nog geen sprake van een grote daling in opgesteld vermogen, zoals te zien in Figuur 22: er is een daling in het opgesteld vermogen van stoomturbines, maar ook nog een groei in productievermogen van STEG's. Kijkend naar de elektriciteitsproductie van WKK-installaties geldt echter dat vanaf 2010 een daling in gang is gezet, met name bij de STEG's. Dit duidt erop dat meer installaties in deellast zijn gaan



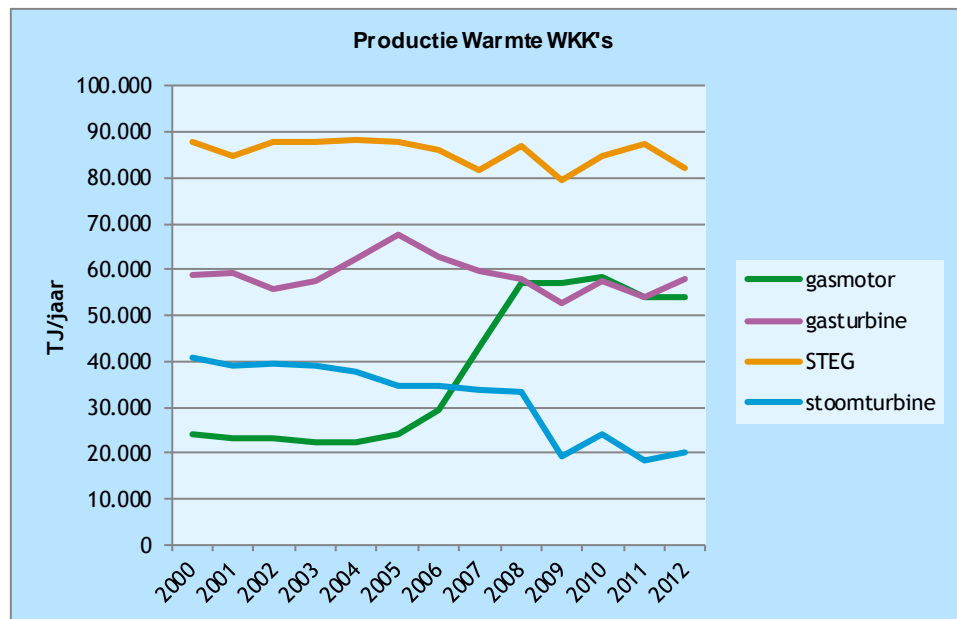
draaien (Figuur 22). In deze jaren is de warmteproductie van WKK-installaties wel stabiel gebleven.

Figuur 22 Ontwikkeling opgesteld vermogen WKK-installaties 2000-2012

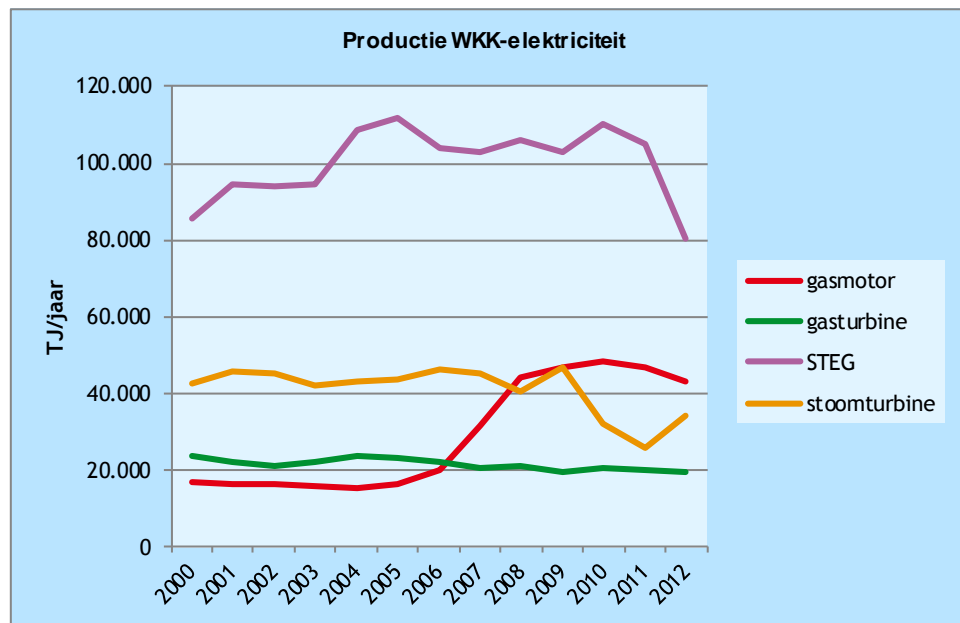


Bron: CBS.

Figuur 23 Productie van warmte en elektriciteit door WKK-installaties 2000-2012



Bron: CBS.



Bron: CBS.

# Bijlage C Flexibiliseren WKK-installaties

Bron: EnergyMatters

## Technische maatregelen om WKK's flexibeler te laten draaien

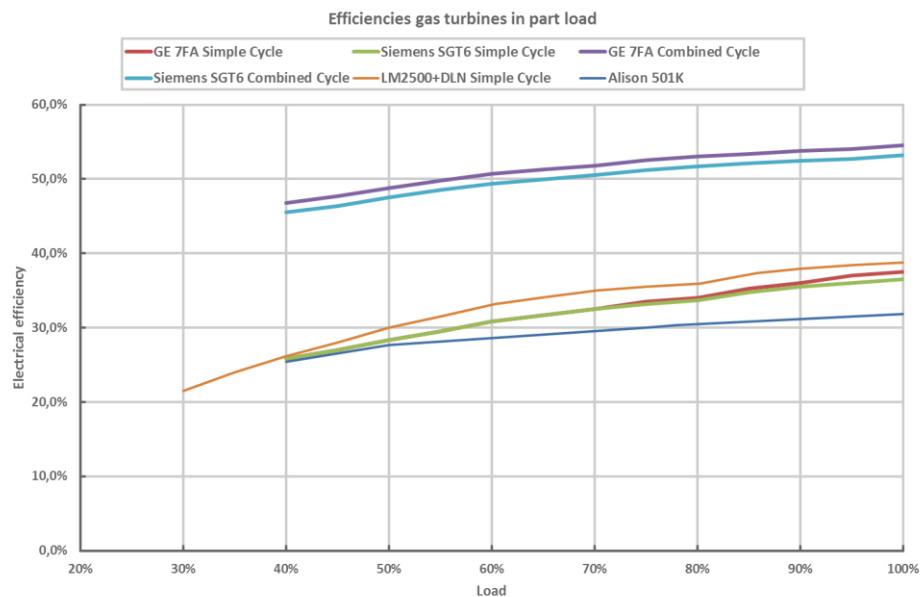
De volgende mogelijkheden zijn gevraagd c.q. bekend voor flexibilisering van WKC's:

- a Aparte ketel, in combinatie met start/stopbedrijf.
  - b Aanbrengen van branders in de afgassenketel met additionele verbrandingsluchtventilator.
  - c Aparte verbrandingskamer naast gasturbine waarvan de rookgassen door de afgassenketel worden geleid.
  - d Warmtebuffer (t.b.v. stadsverwarming).
  - e Installeren van variabele inlaatschoepen.
  - f Draaien in deellast voor eigen gebruik.
  - g Aanpassen van verbrandingskamers.
  - h Installeren van regelapparatuur voor het aansturen van het verbrandingsproces in de gasturbine.
- a *Aparte ketel, in combinatie met start/stopbedrijf*  
Een aparte ketel voor heetwater of stoom is uiteraard technisch gezien te plaatsen en aan te sluiten, mits er voldoende fysieke ruimte op een bestaande locatie beschikbaar is. Start/stopbedrijf, bijvoorbeeld alleen op werkdagen bij een voldoende hoge marktprijs draaien zou een optie kunnen zijn. Op dit moment is dat bij de huidige spark-spread tijdens piekuren (werkdagen van 8.00 tot 20.00u) zelfs niet rendabel maar bij marktherstel zal dit snel in beeld komen. Een gecontroleerde start-stop cyclus kost afhankelijk van gasturbinetype wel equivalente draaiuren en daarmee hogere variabele onderhoudskosten. De onderhoudskosten in het geval van cyclisch opereren (250 starts per jaar) liggen 50 tot 100% hoger dan normaal. Voorzieningen om de gasturbine en de ketel tijdens stilstand warm te houden verlagen de onderhoudskosten. Denk bijvoorbeeld aan een rookgasklep op de schoorsteen om natuurlijke trek door de ketel en gasturbine te vermijden. Daarnaast moet men rekening houden met een opstarttijd van warme toestand (maximaal 8 tot 12 uur uit bedrijf) tot vollast van 30 tot 60 minuten voor een grote STEG (200-350 MWe) terwijl voor een kleinere gasturbine de opstarttijd 10 (aeroderivative) tot 20 minuten (stationaire turbine) bedraagt (20 tot 50 MWe).
- b *Aanbrengen van branders in de afgassenketel met additionele verbrandingsluchtventilator*  
Het aanbrengen van branders in de afgassen ketel in combinatie met verbrandingsluchtventilator (koudluchtbedrijf of fresh air mode) is technisch een complexe aanpassing. Om de wettelijke NO<sub>x</sub>-emissie-eis te halen en om het ketelrendement te verbeteren is veelal rookgas-recirculatie benodigd. Dit vereist een aftakking van de schoorsteen met een tweede rookgascirculatie ventilator. Er is niet altijd ruimte in het rookgaskanaal tussen de gasturbine en de ketel om een kanaalbrander in op te nemen, maar soms is er rekening mee gehouden. Om 'vliegend' over te gaan van gasturbine bedrijf naar koudlucht bedrijf is ook een by-pass schoorsteen nodig. Voordeel van deze aanpassing is de vermeden investering in een separate ketel.  
Ketels met een bijstookbrander maar zonder voorzieningen voor koudluchtbedrijf kunnen soms worden aangepast voor koudluchtbedrijf.

Ook dan moet er voldoende ruimte zijn om kleppen in het rookgaskanaal aan te brengen, een verbrandingsluchtventiator, een by-pass schoorsteen en kanalen voor rookgasrecirculatie buiten de ketel te plaatsen. Het vermogen dat kan worden bijgestookt is beperkt door de constructie. Standaard zijn de wanden van de ketel niet gekoeld maar slechts inwendig geïsoleerd en met beplating afgeschermd. De maximaal toelaatbare temperatuur van de rookgassen is dan rond de 850°C. Bij hogere temperaturen moet er bemetseling worden aangebracht met eventueel koeling. Dit brengt in een bestaande situatie zoveel kosten met zich mee dat dat niet realistisch is.

- c Aparte verbrandingskamer naast gasturbine waarvan de rookgassen door de afgassenketel worden geleid*  
Deze optie lijkt op de vorige optie maar er is bij Energy Matters geen voorbeeld bekend van deze situatie. Technisch is dit complex omdat dan de kleppen in het rookgaskanaal geschikt moeten zijn voor de bijstooktemperatuur (tot ca. 800°C). Bovendien geldt ook hier dat rookgasrecirculatie waarschijnlijk nodig is om voldoende lage NO<sub>x</sub>-emissie te kunnen realiseren.
- d Warmtebuffer (t.b.v. stadsverwarming)*  
Omdat stoom niet in voldoende mate gebufferd kan worden is deze optie alleen van toepassing op stadsverwarming. Op sommige plaatsen wordt de buffering van heet water in grote tanks toegepast. De nieuwe stadsverwarmingscentrale in Diemen heeft bijvoorbeeld een warmtebuffer van 50 meter hoog en een diameter van 26 m. De maximale capaciteit is 22.000 m<sup>3</sup> met een maximale opslagcapaciteit van 1.800 MWh. Dit lijkt veel maar is circa 5 vollasturen warmteopslag uit de centrale. Voor 90/70°C systemen achter bijvoorbeeld een gasmotor voor kas-, gebouw- of wijkverwarming is dit een zeer kosteneffectieve maatregel. De warmtebuffer bij de centrale in Diemen is ontworpen voor 140°C en 7 barg.
- e Installeren van variabele inlaatschoepen*  
Variabele inlaatschoepen (VIGV) van de compressor zorgen voor een regelbare hoeveelheid aangezogen lucht. Aeroderivative gasturbines hebben sowieso VIGV vanuit de aard van het ontwerp. Stationaire turbines (bijv de Siemens of GE Frame turbines) hebben niet per definitie VIGV. Gasturbines die constant op volle belasting draaien hebben geen VIGV's nodig. Het deellast rendement neemt echter snel af zonder VIGV's. Voor zover echter bekend bij Energy Matters zijn de meeste gasturbines in de industrie geïnstalleerd met VIGV's.
- f Draaien in deellast voor eigen gebruik*  
Veel industriële WKK's zijn uitgelegd op de stoomvraag en leveren een overschot van elektriciteit terug aan het net. Een mogelijkheid om de opbrengst te optimaliseren is om primair elektriciteit voor het eigen bedrijf te produceren (achter de meter) en alleen aan het net te leveren als de momentane marktprijs (APX of PV) hoog genoeg is. Dit kan tot op zekere hoogte door de gasturbine in deellast te bedrijven. Het rendement neemt echter in deellast wel af, zelfs met VIGV's. De meeste gasturbines hebben een rendementscurve die tot 70 á 60% belasting een beperkt rendementsverlies van 5 tot 7%-punt (elektrisch). Daarnaast geldt dat vereiste deNO<sub>x</sub>-emissie daaronder veelal niet gehaald wordt. In de praktijk betekend dat dat een gasturbine niet lager in deellast dan 60 á 70% wordt bedreven. Een tekort aan stoom zal dan door de bijstookbrander danwel een separate ketel geleverd moeten worden. Tenslotte is een nadeel dat

de variabele onderhoudskosten gekoppeld zijn aan draaiuren. Hoewel er enigszins een relatie is tussen belasting en degradatie zijn veel onderhoudscontracten gebaseerd op draaiuren. Bij een continu belasting op 70% zullen de onderhoudskosten per kWh daarom met een factor 1,4 stijgen. Ook de overheadkosten drukken op minder productie en zullen dus per kWh hoger liggen. Voordeel is wel dat de gasturbine en de ketel op temperatuur zijn en redelijk snel opgeregeld kunnen worden. Vooral de kleinere gasturbines (<60 MWe) kunnen met een snelheid van wel 20%/min opgeregeld worden. Voor grotere STEG-centrales beperkt deze snelheid zich tot 3 á 5 %/min. Wellicht dat dit een extra verdienmodel kan opleveren.



#### g *Aanpassen van verbrandingskamers*

Aanpassingen van verbrandingskamers worden niet gedaan om een gasturbine flexibeler te maken. De verbrandingskamers zijn of worden aangepast om aan emissie-eisen te voldoen. Is dit een Dry-Low-NO<sub>x</sub> (DLN) type dan wordt de flexibiliteit minder omdat de sturing van lucht over de verschillende brandertrappen veel subtieler wordt dan een conventionele 1-traps brander. Een brander kan ook aangepast worden aan stoom- of waterinjectie (STIG).

Dit laatste is weinig zinvol in de huidige economische situatie omdat er dan relatief meer elektriciteit wordt gemaakt en minder (netto) stoomproductie. Bovendien gaat er extra warmte en condensaat verloren door de schoorsteen. Met stoom- of waterinjectie kan ook aan de huidige strenge NO<sub>x</sub>-emissie-eisen worden voldaan.

Theoretisch gezien is een alternatief om de NO<sub>x</sub>-emissie-eis in deellast te kunnen halen het plaatsen van SCR. In de praktijk is dit lastig en economisch vrijwel geen optie. SCR (selectieve catalytische reductie van NO<sub>x</sub>) moet plaatsvinden in het temperatuur gebied tussen 350 en 450°C. Direct achter de gasturbine of bijstookbrander is te heet. Er zal ergens in het rookgaskanaal tussen de pijpenbundels een plek moeten worden gevonden om de SCR-blokken te plaatsen. De blokken zijn zeer volumineus en dit is in een bestaande ketel daarom vrijwel onmogelijk.

*h Installeren van regelapparatuur voor het aansturen van het verbrandingsproces in de gasturbine*

Deze maatregel is niet relevant. De aansturing van verbrandingskamers is nu al een complexe situatie. Moderne DLN verbrandingskamers hebben veelal 4- tot 5-traps verbranding. De verbrandingslucht wordt zodanig toegevoerd dat de feitelijke brander, de premixbrander, een constante brandstof/lucht-verhouding heeft. De beperking in deellast en het lage deellastrendement onder de 60% wordt niet zozeer door de regelbaarheid van de brander als wel door het thermodynamisch gedrag van de gasturbine. Verbetering van de regelapparatuur is wel nodig om gasturbines geschikt te maken voor een bredere bandbreedte van de aardgaskwaliteit. Hierin speelt mee dat leveranciers ervaring moeten opdoen met de dynamische veranderingen als gevolg van wisselende aardgaskwaliteiten. Een onderwerp waarmee in de praktijk nog weinig ervaring is opgedaan.

**Investerings voor aanpassing van WKK's bij revisie/retrofit**

Een totale investering bestaat uit componenten en de bijkomende kosten benodigd voor de installatie en complete montage inclusief aansluitingen (gas/E/water/rookgas, etc.) en civiele kosten (gebouw/fundaties). Met name de bijkomende kosten zijn situatieafhankelijk. De componentkosten zijn vooral afhankelijk van de schaalgrote. Hieronder worden voor de diverse aanpassingen indicatieve bedragen genoemd en geschikt voor globale berekeningen. Voor individuele situaties dient men de lokale situatie meer in detail uit te werken.

*a Aparte ketel, in combinatie met start/stopbedrijf*

Voor ketels kan onderscheid gemaakt worden tussen warmwaterketels ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ ) en heetwaterketels dan wel stoomketels ( $T > 100^{\circ}\text{C}$ ).

Voor heetwaterketels kan worden aangehouden: 75 €/kW voor ketels tot 500 kW en 60 €/kW voor ketels van 500 kW tot 2.000 kW en daarboven 40 €/kW. Dit betreft de kale aanschafprijs van de ketel. Voor een compleet geïnstalleerd ketelhuis moet men op 100 tot 200% extra kosten aanhouden (dus kosten factor 2 tot 3 hoger).

Voor een heetwaterketels en stoomketel voor processtoom kan aangehouden worden: 150 €/kW voor ketels van 30 t/h (oververhit, ca. 22 MW) en 120 €/kW voor ketels van 100 t/h (ca. 72 MW), compleet geïnstalleerd inclusief ketelhuis.

*b Aanbrengen van branders in de afgassenketel met additionele verbrandingsluchtventilator*

Voor het aanbrengen van een additionele verbrandingsluchtventilator met kleppen en kanalen voor rookgasrecirculatie, een bijstookbrander en een by-pass schoorsteen kan worden uitgegaan van ca. 40 €/kW voor een ketel van 30 t/h en ca. 30 €/kW voor een ketel van 100 t/h. Er is hierbij wel van uitgegaan dat de deze aanpassing technisch redelijkerwijs uitvoerbaar is.

*c Warmtebuffer (t.b.v. stadsverwarming)*

Voor een warmtebuffer van bijv. 200 m<sup>3</sup> bij gasmotoren kan als richtbedrag worden uitgegaan van 250 €/m<sup>3</sup>, compleet geïnstalleerd. Een heet waterbuffer van 22.000 m<sup>3</sup> onder een druk van 7 barg wordt ruwweg geschat op 5 mln €.

# Bijlage D NO<sub>x</sub>-emissies WKK-installaties

## NO<sub>x</sub>-emissie-eisen Activiteitenbesluit

Tabel 11 geeft emissie-eisen voor NO<sub>x</sub> waar WKK-installaties aan moeten gaan voldoen. Ter vergelijking zijn ook de eisen voor stoomketels opgenomen<sup>42</sup>.

Tabel 11 Emissie-eisen Activiteitenbesluit Stookinstallaties (vanaf 1 jan 2016/1 jan 2017)

		NO <sub>x</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	
Gasturbine installatie	< 50 MWth	140 (bij 3% O <sub>2</sub> )	1 jan 2017
	> 50 MWth	75 (bij 15% O <sub>2</sub> )	1 jan 2016
	> 50 MWth, als totaalrendement < 75%, of elektr. rendement < 55%	50 (bij 15% O <sub>2</sub> )	Idem
Gasmotor	< 2,5 MWth	340 (bij 3% O <sub>2</sub> )	1 jan 2017
	> 2,5 MWth	100 (bij 3% O <sub>2</sub> )	1 jan 2017
Stoomketel	gasgestookt	70 (bij 3% O <sub>2</sub> )	1 jan 2016
Stoomketel	kolengestookt	100 (bij 3% O <sub>2</sub> )	1 jan 2016

## Mogelijke maatregelen

Mogelijke maatregelen om hieraan te voldoen zijn:

### Dry low NO<sub>x</sub> burners

Voor veel gasturbines zijn er lage NO<sub>x</sub>-verbrandingskamers, dry low NO<sub>x</sub> burners (DLN), ontwikkeld waarmee emissies van 25 ppm of lager gehaald kunnen worden. De meerkosten voor een DLN turbine varieert sterk en is afhankelijk van type gasturbine en fabrikant. Retrofit van dry low NO<sub>x</sub> burners is mogelijk indien deze verbrandingskamer voor de betreffende gasturbine is ontwikkeld en aan de emissie-eis voldoet. Voor retrofit zijn drie keer zo hoge investeringskosten verondersteld en 50% hogere variabele kosten als voor een nieuwe brander.

MWe	Investering €/kWe	Variabel €/MWe/uur
0,4	288	6,6
0,9	167	3,8
1,5	117	2,7
2,0	96	2,2
2,1	93	2,1
3,3	62	1,4
4,5	61	1,4

Bij implementatie van een dry-low-NO<sub>x</sub> (DLN) type neemt de flexibiliteit van de bedrijfsvoering van de gasturbine af vanwege de complexiteit van de verbranding, vaak 4-5 trapsverbranding.

<sup>42</sup> Kenniscentrum Infomil, 2014, emissie-eisen stookinstallaties, <http://www.infomil.nl/onderwerpen/klimaat-lucht/stookinstallaties/hulpmiddel/>

### *Stoom- of waterinjectie*

Een brander kan ook worden aangepast aan de BEMS-norm door stoom- of waterinjectie (STIG). Dit laatste is weinig zinvol in de huidige economische situatie omdat er dan relatief meer elektriciteit wordt gemaakt en minder stoom. Bovendien gaat er extra warmte en condensaat verloren via de schoorsteen.

### *SCR*

In het Activiteitenbesluit/BEMS is voor de grotere gasmotoren (2,5 MWin en groter) een emissie-eis opgenomen van 100 mg/Nm<sup>3</sup> (circa 28 g/GJ). Om deze norm te kunnen halen moet SCR (selectieve katalytische reductie) worden toegepast. De aan implementatie van een DeNO<sub>x</sub>-SCR voor een gasmotor gerelateerde investeringskosten en variabele operationele kosten zijn gegeven in onderstaand overzicht:

MWe	Investering €/kWe	Variabel €/MWe/uur
0,4	288	6,6
0,9	167	3,8
1,5	117	2,7
2,0	96	2,2
2,1	93	2,1
3,3	62	1,4
4,5	61	1,4



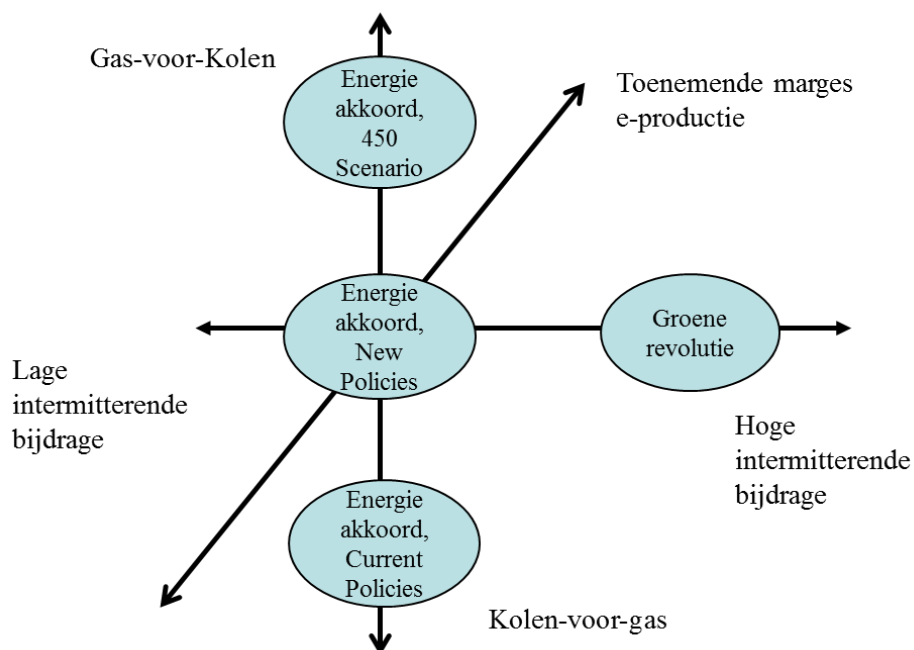
# Bijlage E Uitgangspunten scenario's

Figuur 24 de drie assen waarlangs scenario's zijn opgesteld om de toekomstige positie van WKK in de energiemarkt te beoordelen.

De drie assen zijn:

- de CO<sub>2</sub>- en brandstofprijzen;
- het aandeel productie van hernieuwbare energie;
- de mark-up.

Figuur 24 Scenario's voor toekomstige ontwikkeling energiemarkt



## Brandstof- en CO<sub>2</sub>-prijzen

Basis hiervoor zijn WEO-scenario's (world energy outlook) 2013 van de IEA (2013). Dit betreft drie scenario's: 'Current Policies', 'New Policies' en '450 Scenario'. 'New policies' is het centrale scenario. Dit is gevolgd in het basis-scenario. Daarnaast zijn twee additionele scenario's onderzocht:

- In het lage CO<sub>2</sub>-prijzen scenario is 'Current policies' aangehouden. Dit gaat uit van minder internationaal klimaatbeleid en lagere CO<sub>2</sub>-prijzen.
- Het hoge CO<sub>2</sub>-prijzen scenario. Dit is gebaseerd op het '450 scenario'. Dit gaat er van uit dat er internationaal klimaatbeleid komt, resulterend in hoge CO<sub>2</sub>-prijzen.

Tabel 12 geeft voor de drie prijs-scenario's de prijzen van gas, kolen en CO<sub>2</sub>:

Tabel 12 Prijzen voor brandstoffen en CO<sub>2</sub>

Project-scenario	WEO-2013 scenario	Prijs Gas (€ <sub>2012</sub> /GJ)		Prijs Kolen (€ <sub>2012</sub> /GJ)		Prijs CO <sub>2</sub> (€ <sub>2012</sub> /ton)	
		2020	2030	2020	2030	2020	2030
Basis:	New policies	8,7	9,0	2,8	2,9	15,0	24,8
Lage CO <sub>2</sub> -prijzen	Current policies	9,0	9,8	2,9	3,1	11,3	18,8
Hoge CO <sub>2</sub> -prijzen	450 ppm	8,4	7,4	2,3	2,3	26,3	71,4

### Groei van aandeel intermitterende Hernieuwbare Energie

Basis hiervoor zijn ramingen van capaciteitsontwikkeling in Nederland en andere landen in Noordwest-Europa. Nederlandse capaciteitsontwikkeling is gebaseerd op het SER Energieakkoord, akkoord, aangevuld met de prognoses uit het TenneT 'Kwaliteits- en Capaciteitsdocument 2013'<sup>43</sup> KCD2013.

Buitenlandse capaciteitsontwikkeling is gebaseerd op ENTSO-E in 'Scenario Outlook and Adequacy Forecast 2014-2030'<sup>44</sup> (ENTSO-E, 2014).

Naast het basis-scenario is hiervoor een scenario onderzocht, met een extra hoog aandeel van hernieuwbare energieproductie, 'veel hernieuwbaar'. Uitgangspunt hierbij is realisatie van het SER Energieakkoord aangevuld met een onverwacht sterke groei van solar-PV in Nederland, en een sterke groei van hernieuwbaar in het buitenland.

- Nederlandse capaciteitsontwikkeling: conform basis-scenario met sterkere groei voor wind op land (+33%) en wind op zee/zon-PV (+50%),
- buitenlandse capaciteitsontwikkeling: conform basis-scenario +33% wind/zon-PV.

Tabel 13 toont het opgesteld vermogen voor Nederland voor zon en wind-energie in het 'veel hernieuwbaar' scenario', vs. de waarden in het basis-scenario.

Tabel 13 Vermogens hernieuwbare energie in de verschillende scenario's

(MW)	2012 - Baseline	2020 - Baseline	2030 - Baseline	2030 - Hoog HE
Zon	365	4.000	8.000	12.000
Wind	2391	8.050	12.000	17.000

<sup>43</sup> In dit document wordt een scenario-analyse van de toekomstige ontwikkelingen in de Nederlandse elektriciteitsmarkt gepresenteerd voor de periode 2013-2023, met als doel potentiële knelpunten in het netwerk van TenneT te identificeren.

<sup>44</sup> In dit document wordt een scenario-analyse van de toekomstige ontwikkelingen in de ENTSO-E markten gepresenteerd voor de periode 2013-2030, met als doel potentiële knelpunten de elektriciteitsvoorziening in de ENTSO-E regio te identificeren.

### **'Mark-up'**

Dit scenario hanteert de marges op elektriciteitsproductie zoals die in de jaren 2000-2006 in de Nederlandse markt bestonden. In de huidige markt, met overcapaciteit zijn deze niet meer aanwezig. Dit scenario reflecteert een herstel van het marktevenwicht. Aangehouden is een opslag van 8 €/MWh op alle geproduceerde elektriciteit.



# Bijlage F Simulatiemodel Noordwest-Europese markt: beschrijving model en uitgangspunten

## F.1 Beschrijvingsmodel

In deze studie worden de inzet van de Nederlandse WKK-centrales en de elektriciteitsprijzen bepaald met het Noordwest-Europese marktmodel van DNV GL. Het model simuleert de elektriciteitsmarkt vanuit een *Day-Ahead* perspectief<sup>45</sup>: de eenheden bieden hun elektriciteit aan op basis van hun marginale kosten aan om de nationale elektriciteitsvraag te voldoen. De landen (/elektriciteitsmarkten) zijn onderling aan elkaar gekoppeld door interconnectoren waarbij de uitwisseling beperkt wordt door de beschikbare transmissie capaciteit. De optimalisatie wordt in PLEXOS uitgevoerd (zie kader *PLEXOS*).

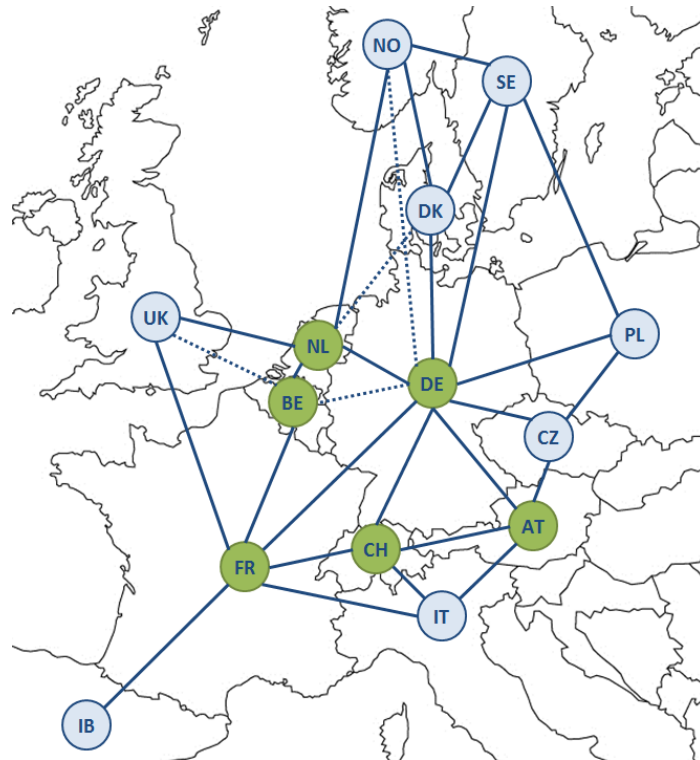
Figuur 25 toont de topologie van het model.

Belangrijke inputs voor het model zijn: het productiepark (thermisch en hernieuwbaar), brandstofprijzen, elektriciteitsvraagprofielen, transmissie capaciteit.

---

<sup>45</sup> Intra-day handel wordt niet meegenomen, met als gevolg dat er niet gekeken is naar de mogelijke inkomsten van (flexibele) WKK-centrale op de intra-day handel.

Figuur 25 Overzicht van het topologie van het simulatie model. De groene landen zijn de kernlanden. De lichtblauwe landen zijn satelliet landen; deze zijn met minder detail gemodelleerd



## F.2 Productiepark Nederland

Dit marktmodel bevat het productiepark voor elektriciteit van de Noordwest-Europese landen (zie Figuur 25), zowel het thermische vermogen als het duurzame vermogen. De thermische centrales in de kernlanden (Nederland, Duitsland, België, Frankrijk, Zwitserland en Oostenrijk) zijn individueel in het model gesimuleerd. Het productiepark in de omliggende landen is per technologie geaggregeerd.

(MW)	2012 - Baseline	2020 - Baseline	2030 - Baseline	2030 - Hoog HE
Niet-WKK-eenheden				
Zon	365	4.000	8.000	12.000
Wind	2.391	8.050	12.000	17.000
Nucleair	474	474	0	0
Kolen	4.050	4.402	4.402	4.402
Gas - STEG	6.913	7.030	11.034 <sup>46</sup>	6.034
Gas - Overig	1.825	964	145	145
Overig (o.a. biomassa en afval)	1.401	1.600	2.695	2.695
WKK-eenheden				
Gas turbine	372	372	372	312
STEG	4.361	4.370	4.370	3.606
Gasmotor	3.575	3.575	3.575	7.150
Stoom	496	496	496	496
Totaal	26.223	35.333	47.089	53.840

### F.3 Interconnectie capaciteit

De Nederlandse elektriciteitsmarkt is gekoppeld aan de buurlanden. De komende jaren zal deze koppeling toenemen door de interconnectie capaciteit tussen de landen te vergroten en meer capaciteit beschikbaar te stellen voor de markt. Tabel 14 geeft een overzicht van de beschikbare transmissie capaciteit voor de groothandelsmarkt.

Tabel 14 Transmissie capaciteit.

(MW)	2012 - Baseline	2020 - Baseline	2030 - Baseline	2030 - Veel hernieuwbaar
Nederland - Duitsland	2.450	3.950	3.950	3.950
Nederland - België	1.400 <sup>47</sup>	1.400	1.400	1.400
Nederland - Noorwegen	700	700	1.400	1.400
Nederland - Engeland	1.000	1.000	1.000	1.000
Nederland - Denemarken	0	700	700	700
Totaal	5.550	7.750	8.450	8.450

Bron: ENTSO-E, 2012.

<sup>46</sup> Deze groei is verondersteld op basis van het uitgangspunt dat nationale productiecapaciteit de aan de groei in vraag moet kunnen voldoen. In de huidige marktomstandigheden staan gasgestookte centrales echter stil, en zullen mogelijk uit bedrijf worden genomen. De aanname is daarmee mogelijk een overschatting. Analoog geldt dat in de analyse is aangehouden dat het bestaande WKK-park blijft functioneren, terwijl in realiteit afschakeling van WKK-installaties valt te voorzien.

<sup>47</sup> Gebaseerd op de net transfer capaciteit, zoals gepubliceerd door ELIA (de Belgische netbeheerder).

Tabel 15 Vraagontwikkeling van Nederland

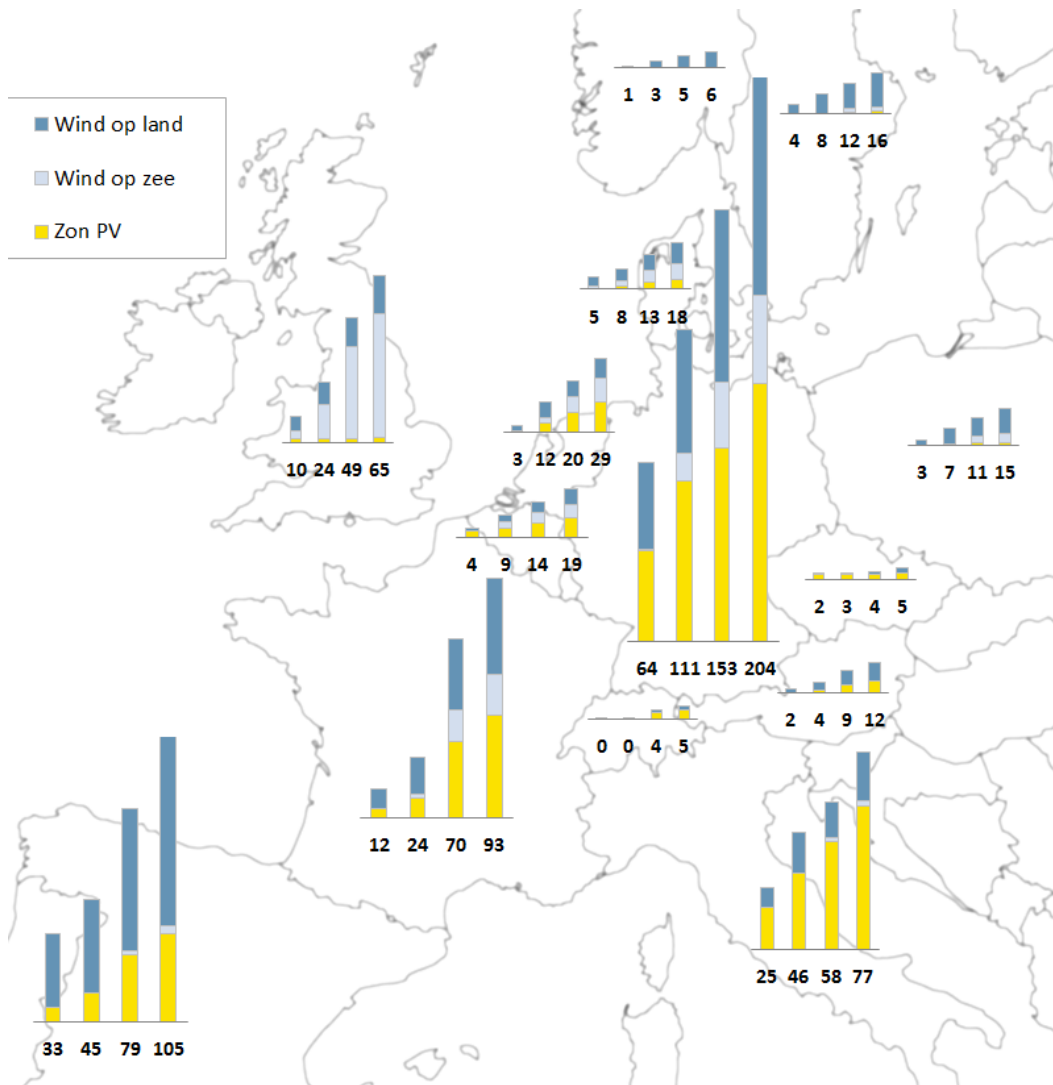
	Elektriciteitsvraag	Jaarlijkse groei (gemiddeld)
2012	115 TWh	
2020	131 TWh	1.6%
2030	156 TWh	2.2%

Bron: TenneT (2013), ENTSO-E, 2013.

#### F.4 Productiepark in omliggende landen

In het simulatiemodel zijn ook de productieparken in omliggende landen verwerkt. Voor hernieuwbare energie zijn daarbij de volgende data gehanteerd (Figuur 26). De data zijn overeenkomstig de ENTSO-E prognoses.

Figuur 26 “Geïnstalleerd wind en zon vermogen in de verschillende Noordwest-Europese landen. De vier kolommen corresponderen met de vier verschillende scenario’s: 2012-baseline, 2020-baseline, 2030-baseline en 2030-Veel hernieuwbaar. De getallen onder kolommen is het totaal aan wind en zon-PV vermogen in gigawatt.”





## F.5 WKK-park Nederland

De WKK-eenheden in Nederland zijn op individueel niveau gemodelleerd, met uitzondering van de gasmotor eenheden welke zijn geaggregeerd in verband met uniformiteit en rekencomplexiteit. De WKK-eenheden zijn ingedeeld naar sector (chemie, raffinage, voedsel- en genotsmiddelen, papier, tuinders, overige industrie, en gebouwde omgeving) en technologie (stoomturbine, STEG, gasturbine, gasmotor).

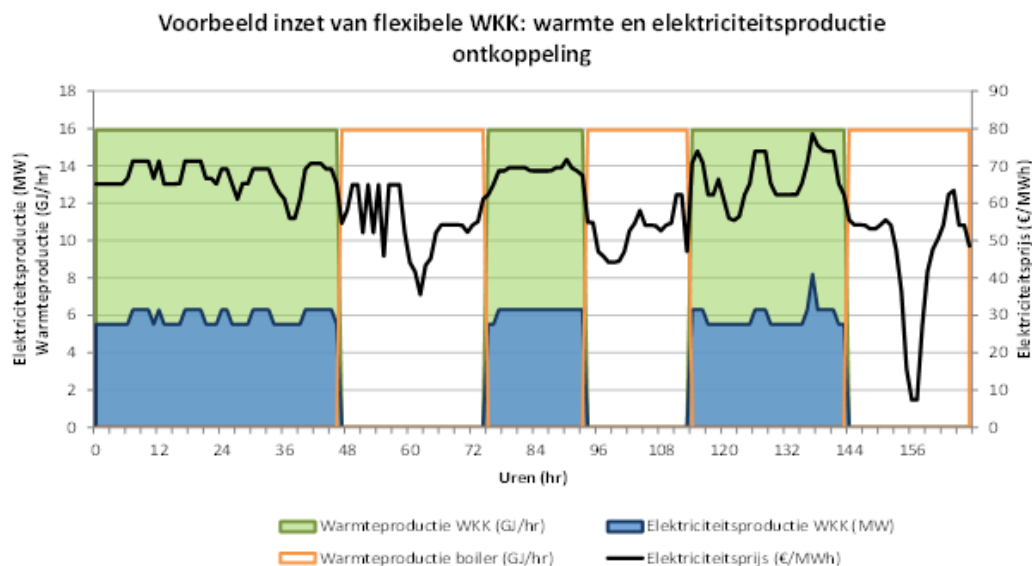
Op basis van informatie van Energy Matters (2014) is er onderscheid gemaakt tussen drie types van WKK-flexibiliteit:

1. *must-run*: hebben een uurlijks vast profiel voor warmte- en elektriciteitsproductie;
2. *partial spark-spread*: hebben een uurlijks vast profiel voor de warmteproductie en een daarbij behorende minimale elektriciteitsproductie, in uren met een hoge elektriciteitsprijs kunnen ze extra elektriciteit produceren;
3. *spark-spread*: hebben een vaste uurlijkse warmtevraag maar geen elektriciteitsproductie beperkingen, ze maken de afweging om in WKK-modus de gevraagde warmte te produceren of via pure stoommodus dan wel een gasboiler te gebruiken. Hierdoor is de warmteproductie en elektriciteitsproductie ontkoppeld (zie Figuur 27).

Daarnaast zijn de tuinder-gasmotoren met een extra graad flexibiliteit gemodelleerd ten opzichte van de ‘spark-spread’ eenheden: door de aanwezigheid van warmtenetwerken en warmtebuffers hebben ze een dagelijkse warmtevraag in plaats van een uurlijkse warmtevraag.

In de rapportage verwijzen we naar de spark-spread eenheden (inclusief glas- en tuinbouw) als flexibele WKK. De must-run en partial spark-spread eenheden noemen we must-run eenheden: ze hebben een vaste warmte productie patroon.

Figuur 27 Voorbeeld van inzet van flexibele (spark-spread) WKK: bij lage elektriciteitsprijs wordt de boiler gebruikt voor de warmte productie



De belangrijkste warmtekrachtkoppeling-parameters van de WKK-eenheden zijn in Tabel 16 weergegeven. De eenheden zijn hierin gegroepeerd in

bepaalde WKK-categorieën, voor bijvoorbeeld de STEG-eenheden zijn die categorieën afhankelijk van het geïnstalleerd elektrisch vermogen.

Tabel 16 WKK-parameters

	Elektrisch vermogen categorie	Elektrisch rendement bij vollast (geen warmtelevering)	Thermisch rendement	Warmtekracht verhouding
STEG	Vanaf 325 MW <sub>e</sub>	56%	30%	0.6 : 1
STEG	Tussen 155 en 325 MW <sub>e</sub>	50%	27%	0.6 : 1
STEG	Tot 155 MW <sub>e</sub>	48%	34%	0.8 : 1
Gasturbine	Vanaf 35 MW <sub>e</sub>	35%	50%	1.4 : 1
Gasturbine	Tussen 16.5 en 35 MW <sub>e</sub>	32%	51%	1.6 : 1
Gasturbine	Tot 16.6 MW <sub>e</sub>	32%	51%	1.6 : 1
Stoomturbine	(alles)	28%	62%	2.2 : 1
Gasmotor	(alles)	42%	45%	1.0 : 1

Bron: Jacobs (2008), DNV GL.

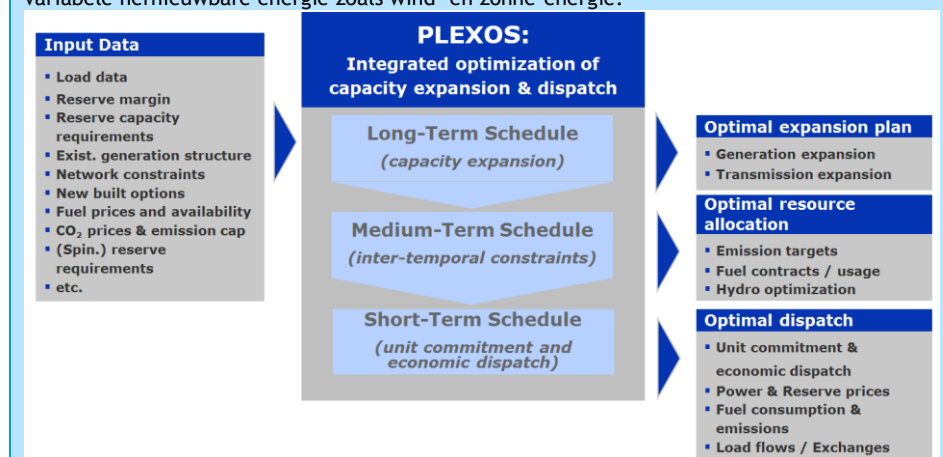
### PLEXOS

PLEXOS<sup>®</sup> is een modellering- en simulatiesoftwarepakket dat een robuust analytisch kader voor energiesysteem modelbouwers biedt op basis van geavanceerde mathematische programmering en stochastische optimalisatietechnieken. Een paar belangrijke aspecten van dit model zijn:

- gedetailleerde weergave van de diverse technologieën productie (incl. WKK en hernieuwbare energie);
- modellering van grensoverschrijdend netwerk met beperkingen;
- co-optimalisatie van de energie en reservebehoefte.

DNV GL ontwikkelde in het afgelopen decennium een marktmodel voor de hele Europese markt en gebruikte het voor vele studies en marktsimulaties. Voor deze studie zal het NW-Europese deel van het model worden gebruikt om de inzet van WKK-eenheden te simuleren onder verschillende marktomstandigheden. In taak 2 wordt het model mede gebruikt om de kosten en baten van de verschillende flexibiliteitsopties te evalueren.

Het vermogen van co-optimalisatie van de energie- en reservebehoefte in PLEXOS is zeer belangrijk om de elektriciteitsprijzen op de groothandelsmarkt en de waarde van de reservevoorziening te voorspellen. De waarde van reservecapaciteit wordt belangrijker naarmate de behoefte aan flexibiliteit toeneemt als gevolg van een groeiend aandeel van variabele hernieuwbare energie zoals wind- en zonne-energie.



# Bijlage G Rentabiliteitsmodel

Het rentabiliteitsmodel heeft als doel de vraagstelling te beantwoorden of WKK-installaties nog zullen blijven draaien gegeven de verwachte variabele en vaste onderhoudskosten, inclusief de herinvesteringskosten die voor veel WKK-installaties noodzakelijk zijn. De herinvesteringskosten bestaan uit de kosten voor low-NO<sub>x</sub> bedrijfsvoering, alsmede kosten voor een grootschalige retrofit.

Als rentabiliteitsmodel hanteren we de onrendabele-top modellen die door het ECN zijn opgesteld in de jaren 2006-2008 ten behoeve van de berekeningen van de MEP-subsidies. Deze modellen zijn gedegen en peer-reviewed, de modellen en de parameters worden ondersteund door de sector.

Tabel 17 geeft de in de modelbenadering gebruikte parameters weer, met de bronnen. De tabel laat zien dat voor de belangrijkste parameters, over elektriciteitsproductie, warmteproductie, CO<sub>2</sub>-kosten e.d., steeds de PLEXOS-simulatieresultaten gebruikt zijn.

Tabel 17 Parameters in de rentabiliteitsanalyse

Parameter	Eenheid	Bron gegevens
Techniek		WKK-lijst (STEG, GT, ST, GM)
Fuel		WKK-lijst
Sector		WKK-lijst
Operating Mode		WKK-lijst (SPR, MR, PSP)
Elektrische efficiëntie	%	WKK-lijst
Maximum Capacity E	MW <sub>e</sub>	WKK-lijst
Maximum Heat Capacity	MW <sub>th</sub>	WKK-lijst
Power to Heat Ratio		WKK-lijst
Elektriciteitsproductie	Load factor %	PLEXOS-simulatie
	Vollasturen E	PLEXOS-simulatie
	Productie E/j	PLEXOS-simulatie
	Max MWe/uur	PLEXOS-simulatie
Warmteproductie	Load factor %	PLEXOS-simulatie
	Vollasturen W	PLEXOS-simulatie
	Productie W GJ/j	PLEXOS-simulatie
	Max GJ/uur	PLEXOS-simulatie
Brandstofkosten	Som/jaar	PLEXOS-simulatie
CO <sub>2</sub> kosten	Som/jaar	PLEXOS-simulatie
Variabele O&B kosten	Som/jaar	PLEXOS-simulatie
Startkosten	Som/jaar	PLEXOS-simulatie
Investeringskosten	€/kWe	Investeringskosten t.b.v. retrofit-revamp
Retrofitkosten de-NO <sub>x</sub>	€/kWe	Retrofitkosten t.b.v. de-NO <sub>x</sub> (module)
Variabele O&B kosten	€/kWh	Variabele O&M kosten
Variabele O&B kosten, de-NO <sub>x</sub> installatie	€/kWh	Variabele O&M kosten de-NO <sub>x</sub>

Parameter	Eenheid	Bron gegevens
Warmtekorting	0%	Dashboard rentabiliteitsmodel
CO <sub>2</sub> -kosten warmte		Dashboard rentabiliteitsmodel, berekening o.b.v. CO <sub>2</sub> -prijsscenario
Gasprijs		Dashboard rentabiliteitsmodel, o.b.v. gasprijsscenario
Marktwaaarde elektriciteit		Berekening: somproduct over alle uurwaarden
WKK volume equivalente warmtewaarde		Berekening
Economische levensduur	12 jaar	Vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
Energie-inhoud te vervangen brandstof (gas)		Vaste waarde, OT-modellen (alle technieken: aardgas)
Back-up kosten elektriciteit		Vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
EIA parameters (diverse)		Vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
Rente op vreemd vermogen	6%	vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
Rente op eigen vermogen (Return on equity)	15%	Vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
Aandeel vreemd vermogen	80%	Vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
Aandeel eigen vermogen	20%	Vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
Termijn lening	12 jaar	Vaste waarde per techniegroep, OT-modellen
Vennootschapsbelasting	25%	Vaste waarde, alle technieken

Daarnaast bevatten de onrendabele topmodellen per techniegroep een modellering van de netkosten voor elektriciteit en gasaansluitingen, die per WKK-techniegroep iets anders gekwantificeerd is.

Tabel 17 ziet men in feite drie groepen parameters: kostenparameters betreffende de investeringskosten, operationele parameters betreffende de opbrengsten van de E en W, onderhoudskosten, en overige parameters inclusief de business case parameters (financieel: inclusief verhouding eigen vermogen/vreemd vermogen en vereiste return to equity).

Voor de module investeringskosten voor de periodieke refit/overhaul zijn de investeringskostenniveaus uit Jacobs (2008) als basis genomen. Hieruit volgt een waarde van typerend 25%. Daarnaast zijn de retrofitkosten voor low-NO<sub>x</sub>-bedrijf verzameld door CE Delft. Alle kosten zijn verzameld voor meerdere groottypen installaties en worden geschaald naar de grootte van de gesimuleerde eenheid.

De uitgangspunten betreffende de rentevoet en de aandelen van eigen en vreemd zijn overeenkomstig de waarden die tot 2008 zijn toegepast voor SDE-berekeningen<sup>48</sup>. Uitgangspunt is hierbij dat bij ondernemingsfinanciering een rendement op eigen vermogen van 15% als criterium gesteld wordt om een project positief te beoordelen. Hierbij moet er rekening mee gehouden worden dat in de industrie aan investeringen in secundaire activiteiten (zoals WKK-installaties) hogere eisen gesteld worden.

<sup>48</sup> Zie: (ECN, 2008).

De operationele aspecten zijn in de PLEXOS-modelleeromgeving gesimuleerd. Uit de simulatie van de WKK-installatie in het PLEXOS-model volgt voor ieder uur van het gesimuleerde jaar de spotmarkt elektriciteitsprijs. Daarnaast levert PLEXOS, voor ieder van de 131 gesimuleerde WKK-installaties, per eenheid en per uur:

- elektriciteitsopbrengst;
- warmteopbrengst;
- variabele onderhouds- en bedrijfsvoeringkosten;
- CO<sub>2</sub>-kosten.

Al deze data worden na een PLEXOS-simulatie run uit het PLEXOS-model geëxporteerd, voor iedere simulatie, en in het rentabiliteitsmodel ingeladen. Hierna kan per gesimuleerde eenheid met het rentabiliteitsmodel de onrendabele top van die eenheid berekend worden.

Figuur 28 geeft het 'Dashboard' van het rentabiliteitsmodel. Hier zijn de belangrijkste parameters, die verschillen tussen simulatie runs, te kiezen.

Figuur 28 Dashboard rentabiliteitsmodel CE Delft

**Dashboard Rentabiliteitsmodel WKK CE Delft**  
v7 met CO<sub>2</sub> waardering referentiebrandstof warmte  
Maarten Afman

**Dataset:**  
450 ppm scenario  
zichtjaar 2030  
run d.d. 27-6-2014, Pieter van der Wijk, DNV GL

**Key simulatie settings:**

Percentage nieuwinvestering naast de retrofit kosten: 25%

Inflatie p.j.: 2%

Kosten en prijzen PLEXOS run, over tijdvak 2014-2030: 0%

Kosten nieuwinvesteringen, over tijdvak 2020-> 2030: 0%

Retrofitkosten voor DeNoX, over tijdvak 2020-> 2030: 0%

Jaar voor doorrekening (2020 of 2030): 2030

**Prijzen**

Markup op PLEXOS energieprijzen, jaargemiddeld: 2014 €

Markup op scarcity prices, circa 600 uur per jaar, totaal: 2030 €

Gasprijs in WEO scenario €/NM3: 0,358 2030 €

CO<sub>2</sub> prijs WEO scenario €/ton: 102 2030 €

**Warmtekorting**

Chemie	che	0%
Voedings-/levensmiddelen industrie	voe	0%
Raffinaderijen	raf	0%
Papierindustrie	che	0%
Overige toepassingen	ove	0%
Stadsverwarming	Stadsve	0%
Tuinbouw	Tuinbou	0%

**Markup E-Prijzen voor scarcity prijzen**  
Op basis van 2000-2006

€/MWh	prijzen in 2014 euro
alles boven GT: 6,6	8,1
alles boven ineff: 13,0	15,8

**Methode totale markup alloceren aan flex**  
Op basis van 2000-2006

58.142	€2004/MWe/jaar
70.875	€2014/MWe/jaar
97.296	€2030/MWe/jaar

1 euro = 1,33 USD

Het model is gekoppeld aan techniek-specifieke rentabiliteitsmodellen. Open de bestanden met onderstaande knoppen.

Open ORT modellen | Voer berekeningen uit | Sluit ORT modellen

Automatisch alle scenario's doorrekenen

Doorrekenen alle inv.kost

Het rentabiliteitsmodel is gekoppeld aan aangepaste onrendabele top modellen van het ECN.

Per gesimuleerde WKK-eenheid wordt een rentabiliteitsberekening uitgevoerd. Door de verschillen tussen de levensduur, rendement, techniek en configuratie van de gesimuleerde eenheden, kennen verschillende eenheden, ook eenheden binnen dezelfde grotere techniekgroep, een verschillende rendabiliteit.

Daarom is t.a.v. de visualisatie van de resultaten gekozen voor het histogram. We groeperen de WKK-eenheden per techniegroep naar hun rendabiliteit, maken zo een aantal bereiken van rendabiliteit, en tellen vervolgens het aantal eenheden binnen dat bereik. De aantallen per rendabiliteitsbereik (frequentie) kunnen in een grafiek gezet worden.

Bijlage J bevat alle resultaten, voor alle techniegroepen, voor alle zichtjaren/scenario's.

# Bijlage H Elektriciteitsmarkt in de scenario's

Uit de simulatiemodellering voor de NW-Europese markt volgt hoeveel de verschillende productie-eenheden aan elektriciteit produceren en hoeveel import/export er is. Dit is in beeld gebracht voor 2012, voor het basisscenario in 2020, en voor vier scenario's in 2030.

Deze bijlage beschrijft de resultaten van het simulatiemodel. Deze worden op drie manieren weergegeven:

1. Opbouw van de productiemarkt. We geven aan wat de omvang van het productiepark is, onderverdeeld naar de belangrijkste types, de totale vraag, import en export en het gemiddelde aantal draaiuren per type installatie.
2. Residuale vraag-duur kromme curve. Deze curve geeft aan welke markt-vraag aan elektriciteit resteert na aftrek van het aanbod aan hernieuwbare energie. Dit geeft daarmee de omvang van de vraag die met residuale energie moet worden ingevuld. Deze is weergegeven in een curve over het jaar, met de omvang van de residuale vraag per uur.
3. De Elektriciteitsprijs. Ook deze is weergegeven in een curve over het jaar.

## Conclusies per scenario:

### 2012:

In 2012 zijn de aandelen hernieuwbare energie, wind en zon, beperkt. Gascentrales staan vrijwel stil, kolencentrales draaien op vol vermogen. Substantiële importen. Over het hele jaar door is er een residuale vraag, groter dan 7 GWe.

### 2020:

Het aandeel wind en zon is gegroeid ten opzichte van 2012. Ook in 2020 staan gascentrales vrijwel stil, en draaien kolencentrales op vol vermogen. Importen zijn gegroeid. Flexibele WKK-centrales hebben gemiddeld 5.500 draaiuren.

### 2030 - basisscenario:

In 2030 zijn de aandelen wind en zon verder gegroeid. Door toenemende vraag en afschakeling van residuaal vermogen zijn prijzen gestegen. Gascentrales draaien nu wel, gemiddeld met 1.900 draaiuren. Flexibele WKK-centrales hebben gemiddeld 6.500 draaiuren.

### 2030 - hoge CO<sub>2</sub>-prijs:

In dit scenario zijn de productievermogens gelijk gebleven ten opzichte van het basisscenario. Er is een shift van kolen- naar gascentrales: gascentrales maken veel draaiuren, kolencentrales wat minder. De elektriciteitsprijzen liggen op een aanzienlijk hoger niveau, rond de 75 €/MWh.

### 2030 - lage CO<sub>2</sub>-prijs:

De resultaten van dit scenario lijken sterk op die van het basisscenario. Achtergrond is dat brandstof en CO<sub>2</sub>-prijzen weinig verschillen.

### 2030 - Veel hernieuwbaar:

In dit scenario zijn de aandelen hernieuwbaar fors gegroeid. De residuale vraag-duurkromme laat zien dat de residuale vraag lager ligt, en er zijn met perioden met overschot waarin er geen vraag is naar residuaal vermogen. De prijzen liggen gemiddeld lager dan in het basisscenario, en gedurende ca. 600 uren ligt deze beneden de € 20/MWh. De positie van flexibele WKK is iets verslechterd ten opzichte van het basisscenario: gemiddeld bijna 5.200 draaiuren. Normale gascentrales draaien minder dan 250 uren.

Opvallend in alle scenario's is dat er in alle jaren sprake is van netto import. In 2012 en 2020 ligt deze op ongeveer 24-25 TWh, in 2030 is de import gedaald tot 10 TWh.

Gascentrales hebben in de meeste scenario's een klein aantal draaiuren. Alleen in het hoge CO<sub>2</sub>-prijzen scenario hebben ze meer draaiuren dan kolencentrales. Dit laat zien dat gascentrales een moeilijke positie hebben in de elektriciteitsmarkt.

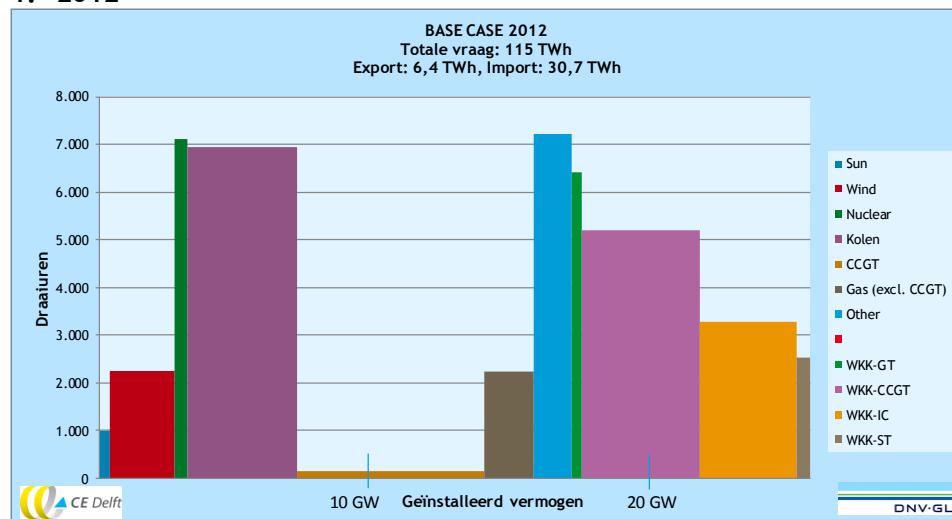
## Aanbod en vraag van elektriciteit

### Toelichting:

De figuren geven horizontaal het geïnstalleerde productievermogen, en vertikaal het aantal draaiuren. Links staan de hernieuwbare opties (zon en wind) en rechts de WKK-installaties. In het midden staan de overige fossiele productie-eenheden. De afkortingen in de legenda hebben de volgende betekenis:

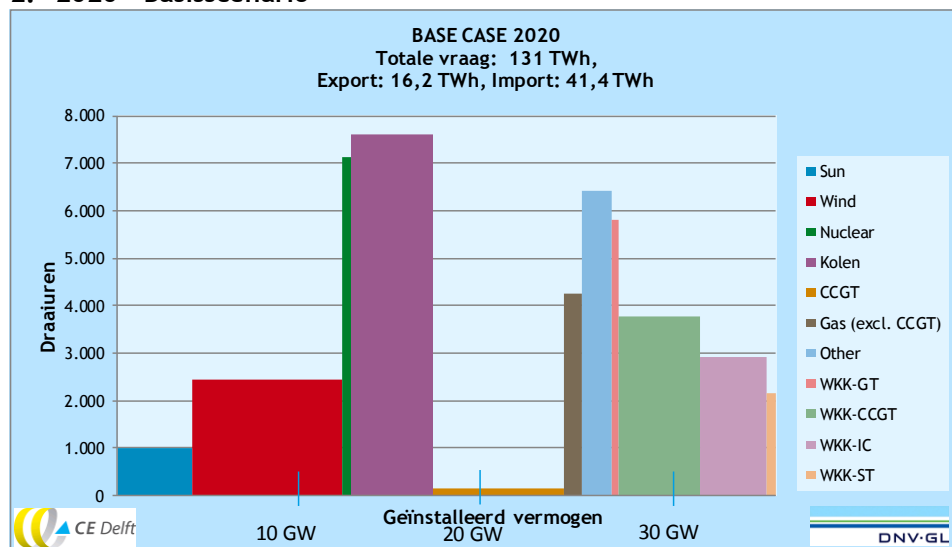
- CCGT = gascentrale
- WKK-GT = WKK gasturbine
- WKK - CCGT = STEG
- WKK - IC = Gasmotor
- WKK - ST = Stoomturbine

### 1. 2012

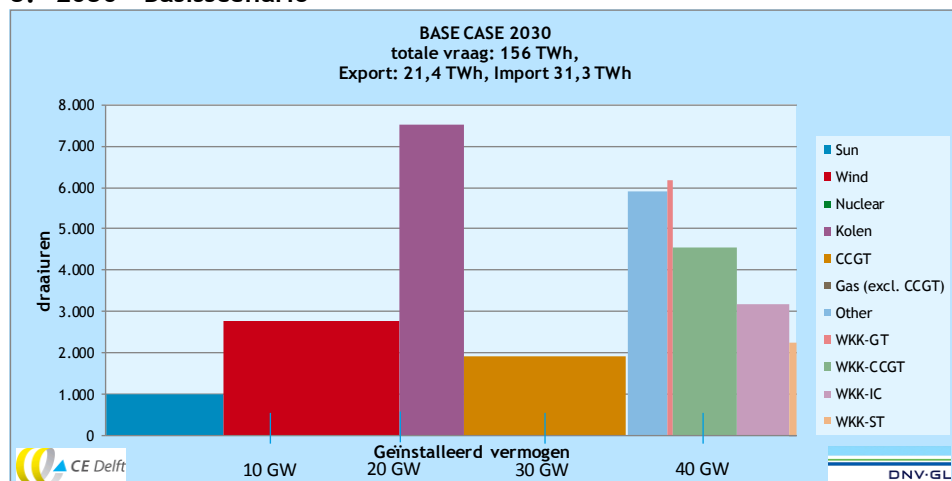




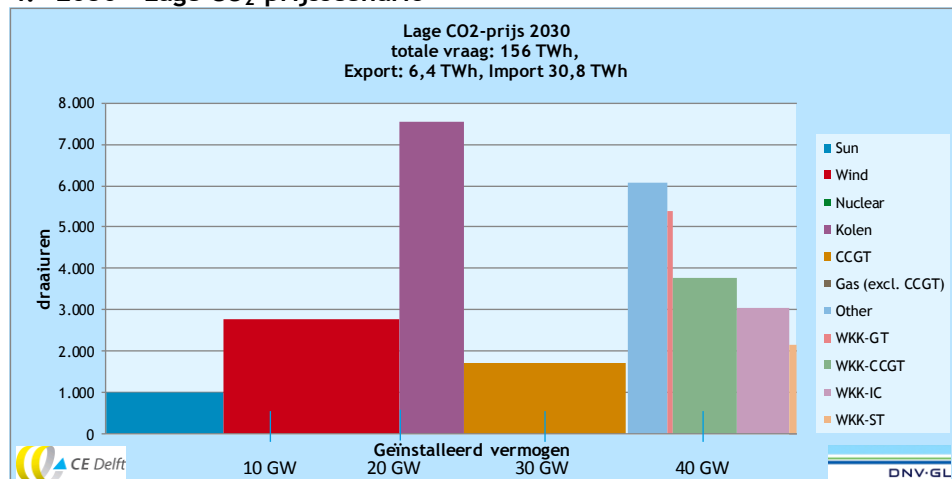
## 2. 2020 - Basisscenario



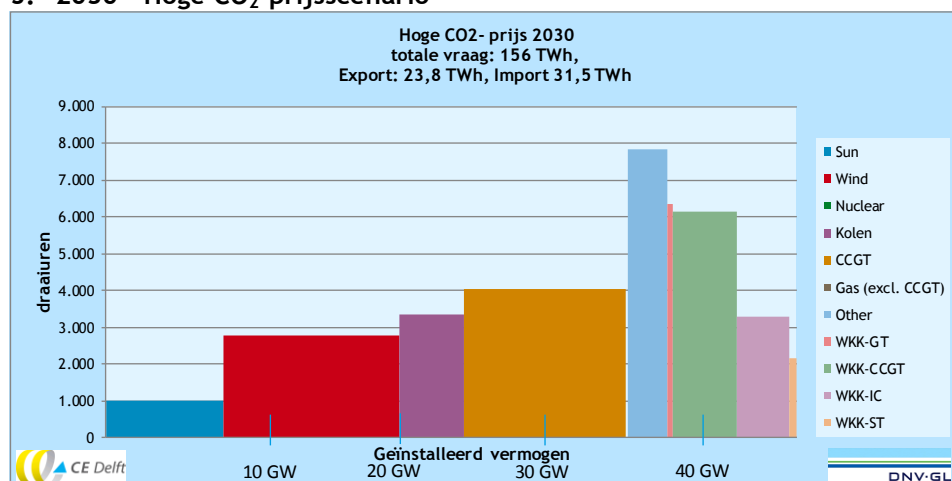
## 3. 2030 - Basisscenario



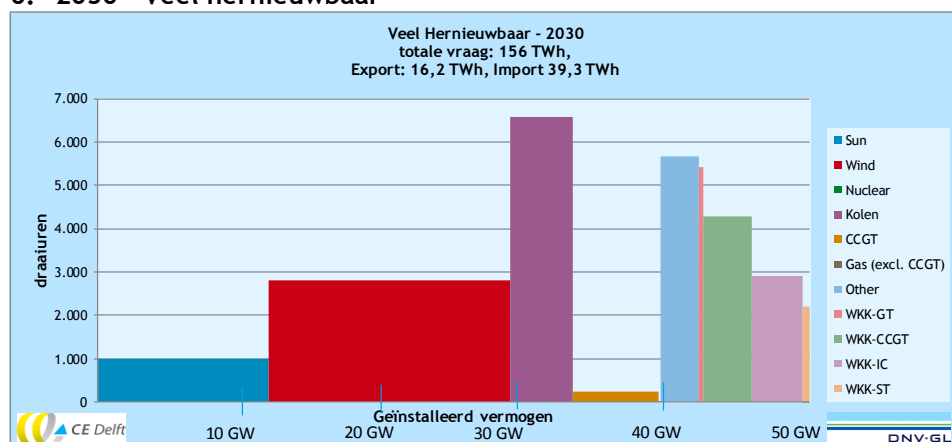
## 4. 2030 - Lage CO<sub>2</sub>-prijsscenario



## 5. 2030 - Hoge CO<sub>2</sub>-prijsscenario



## 6. 2030 - Veel hernieuwbaar



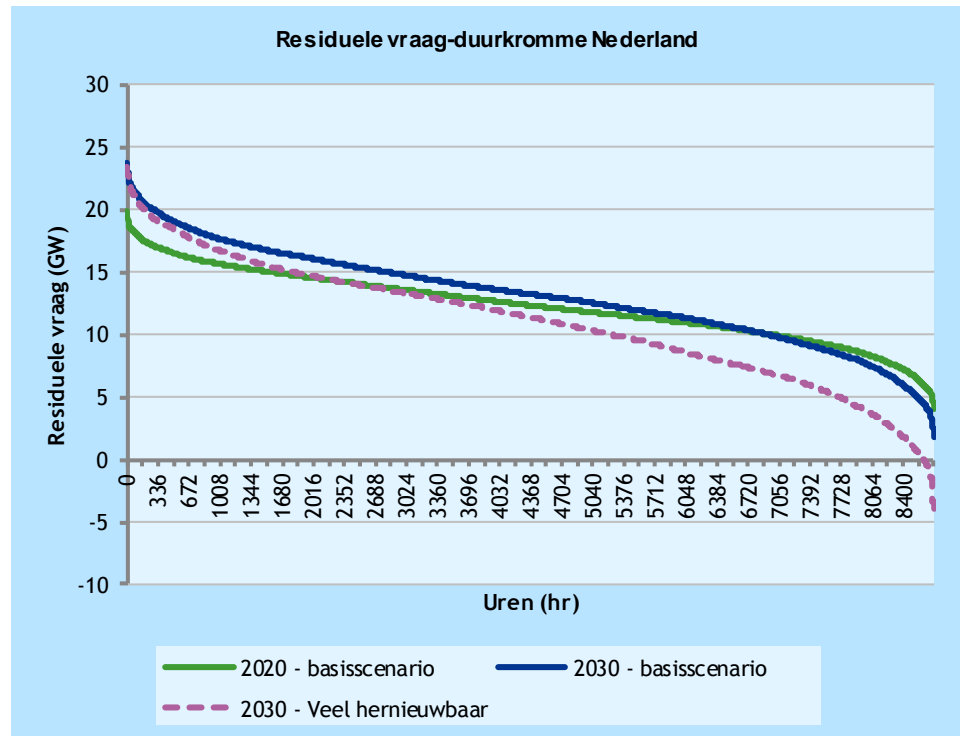
### Residuele elektriciteitsvraag

Het resulterende profiel van fossiele opwekking kan worden weergegeven in een curve met de 'residuele elektriciteitsvraag'. Deze geeft de elektriciteitsvraag die door conventioneel vermogen wordt ingevuld: de uurlijkse vraag minus het aanbod van wind en zonne-energie.

Figuur 29 geeft de residuele vraag voor de verschillende scenario's weer. Uit Figuur 29 blijkt dat in 2030 de residuele vraag is toegenomen ten opzichte van 2020: de elektriciteitsvraag is sneller gegroeid dan het aanbod hernieuwbare energie. Dit heeft tot gevolg dat het mogelijke marktaandeel voor WKK-eenheden in 2030 groter is dan in 2020. De residuele vraag geeft de marktgrootte weer die overblijft na het aftrekken van de duurzame productie van de vraag. Deze residuele vraag wordt door de markt ingevuld: de binnenlandse productie en buitenlandse productie via import-export verschillen.

In het veel hernieuwbaar scenario neemt het aandeel hernieuwbaar zo sterk toe, dat het marktaandeel voor conventionele opwekking afneemt ten opzichte van de 2020 en 2030 - baselinescenario's. Er zijn zelfs uren waarin het aanbod hernieuwbare energie de elektriciteitsvraag overstijgt.

Figuur 29 Residuele vraag-duurkromme voor de verschillende scenario's: 2012-Baseline, 2020-Baseline, 2030-Baseline (& hoge CO<sub>2</sub>-prijs & lage CO<sub>2</sub>-prijs), en 2030 - Veel hernieuwbaar



## Elektriciteitsprijzen

De elektriciteitsprijzen worden beïnvloed door onder andere het marktaandeel van conventionele opwek en door de brandstofprijzen.

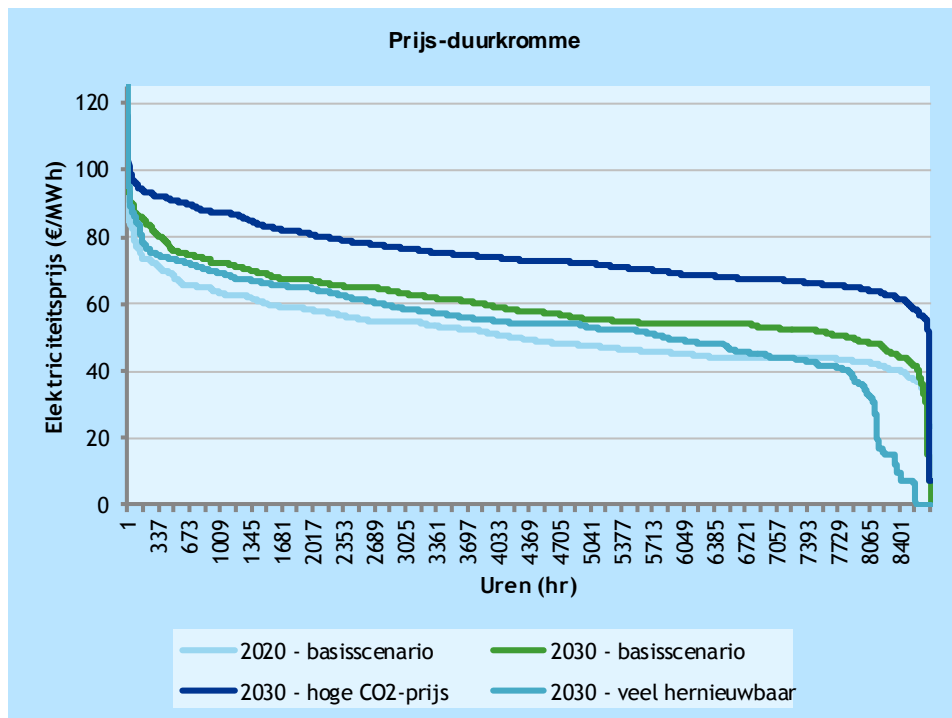
Figuur 30 laat de prijs-duurkrommen van de verschillende scenario's voor 2030 zien<sup>49</sup>. In het 'veel hernieuwbaar'-scenario zijn de prijzen lager dan die in het basis-scenario door de toename van hernieuwbare energie en het daaruit volgende kleinere marktaandeel voor conventionele opwek (brandstofprijzen zijn in beide gevallen gebaseerd op het IEA New Policies scenario). Het gevolg is dat inkomsten uit de elektriciteitsmarkt voor de WKK-centrales ook lager liggen. Tegelijk blijft in dit scenario de gasprijs hetzelfde als in het basisscenario, waardoor de spark-spread van de WKK-installaties (de verhouding tussen de elektriciteits- en gasprijs) verslechtert.

In het hoge CO<sub>2</sub>-prijsscenario is er een 'gas-voor-kolen' situatie ontstaan door de veel hogere CO<sub>2</sub>-credit prijs (71 €/tonCO<sub>2</sub>). Tevens is door de hoge CO<sub>2</sub>-prijs het elektriciteitsprijzeniveau hoger ligt dan in het baselinescenario en dat er minder extreem lage elektriciteitsprijzen zijn: er worden meer gascentrales ingezet en daardoor is er meer flexibiliteit in het systeem beschikbaar.

Het Current Policies scenario heeft geen substantieel prijsverschil met het baselinescenario: de brandstofprijzen liggen iets hoger ten opzichte van 2030-Baseline (NP) scenario maar de CO<sub>2</sub>-credit-prijzen liggen iets lager (aandeel duurzaam is gelijk).

<sup>49</sup> De elektriciteitsprijs wordt in PLEXOS gedefinieerd aan de hand van de marginale kosten van de goedkoopste eenheid die op deellast draait (m.a.w. de marginale eenheid).

Figuur 30 Elektriciteitsprijs-duurkrommes voor Nederland voor de verschillende scenario's voor 2030



# Bijlage I Marktpositie WKK-eenheden op basis van variabele kosten/baten

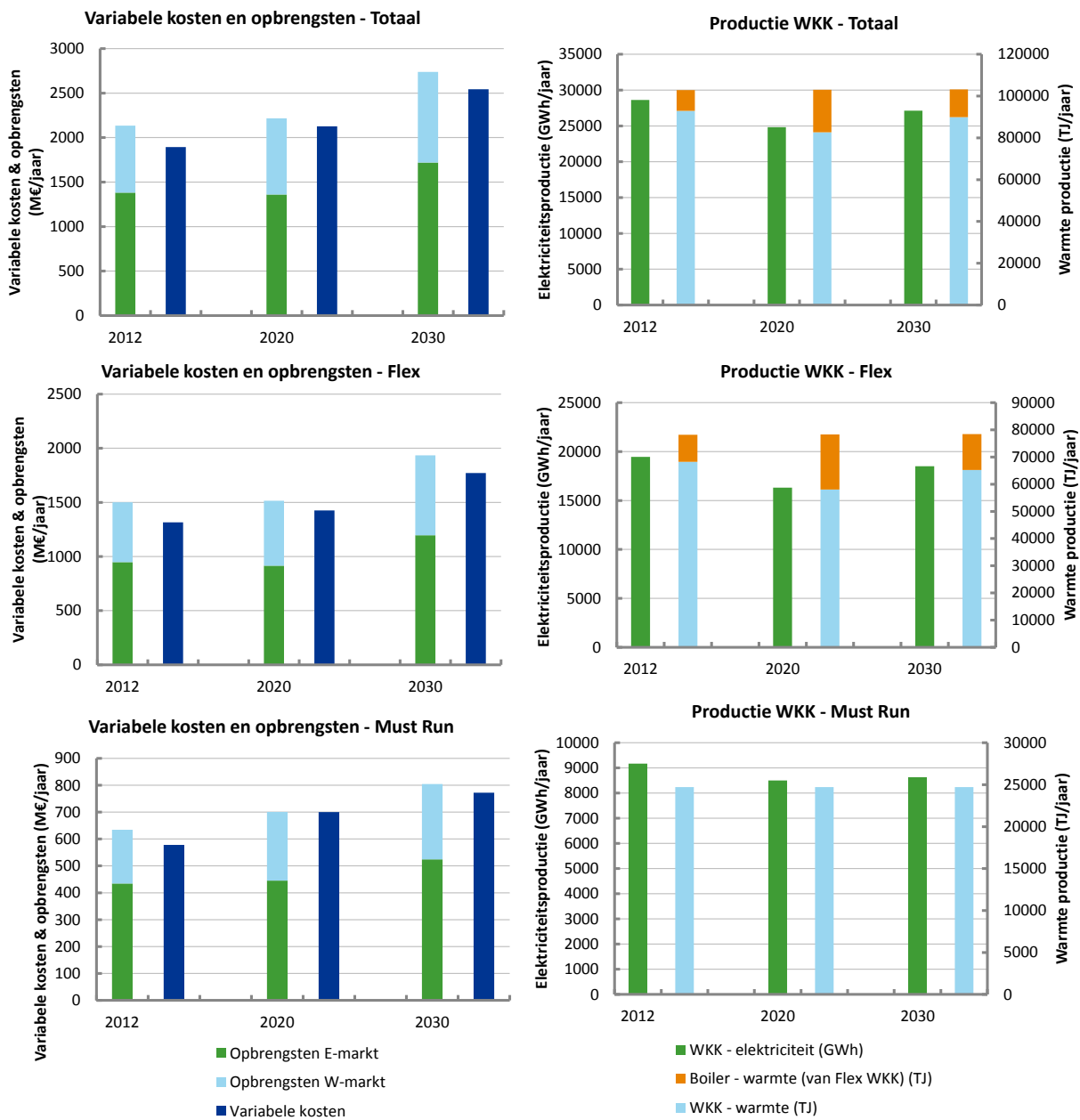
## Variabele kosten/ baten WKK-installaties in het basisscenario 2020/2030

Aan de hand van het Noordwest-Europese simulatiemodel zijn de variabele kosten en baten van de WKK-eenheden bepaald. De variabele kosten bestaan uit de brandstofkosten, start-kosten, emissiekosten en de variabele onderhouds- en bedrijfsvoering kosten. De variabele baten zijn de opbrengsten van de verkoop van elektriciteit en de verkoop van warmte.<sup>50</sup> Het verschil tussen de variabele kosten en baten, m.a.w. de variabele netto baten, geeft een eerste indicatie van de rendabiliteit van de WKK-eenheden.

---

<sup>50</sup> De elektriciteitsprijs wordt door het simulatiemodel berekend en is de marginale kostprijs van de marginale centrale. Deze elektriciteitsprijs wordt door een systeemoptimalisatie bepaald, strategisch gedrag zit hier niet in verwerkt. De warmteprijs is gelijkgesteld aan de vermeden warmtekosten indien men een boiler met 90% efficiëntie zou hebben gebruikt (incl. vermeden emissiekosten).

Figuur 31 De variabele kosten en opbrengsten en de warmte en elektriciteitsproductie van de industriële en glastuinbouw WKK-centrales in Nederland



De bovenste grafieken tonen de resultaten voor het totale industriële WKK-park met de glastuinbouw. De middelste grafieken tonen de resultaten voor flexibele WKK. De onderste grafieken tonen de resultaten voor de must-run WKK-centrales.

‘Opbrengsten E-markt’ zijn de inkomsten door verkoop van elektriciteit. ‘Opbrengsten W-markt’ zijn de baten van de verkoop van de warmte. ‘Variabele kosten’ bestaan uit de brandstofkosten, emissiekosten, startkosten en variabele onderhouds- en bedrijfsvoeringskosten; vaste kosten zijn hierin niet meegenomen. ‘WKK elektriciteit’ en ‘WKK - warmte’ zijn respectievelijk de elektriciteit en warmte (stoom) geproduceerd in WKK-modus (coproductie van warmte en elektriciteit). ‘Boiler -warmte (van Flex WKK)’ is de hoeveelheid warmte die door gas-boilers bij flexibele WKK of door flexibele WKK in pure stoommodus geproduceerd zijn.

De variabele kosten en baten zijn weergegeven in Figuur 31. Aangezien de variabele kosten en baten afhangen van de elektriciteit- en warmte productie van de WKK, is ook de productie weergegeven in Figuur 31. Figuur 31 toont de resultaten voor het WKK-park in het algemeen, voor de flexibele WKK-eenheden en de must-run WKK-eenheden. De absolute verschillen tussen de must-run en flexibele WKK komen gedeeltelijk door het verschil in omvang van het opgesteld vermogen en zijn daarom onderling lastig te vergelijken.

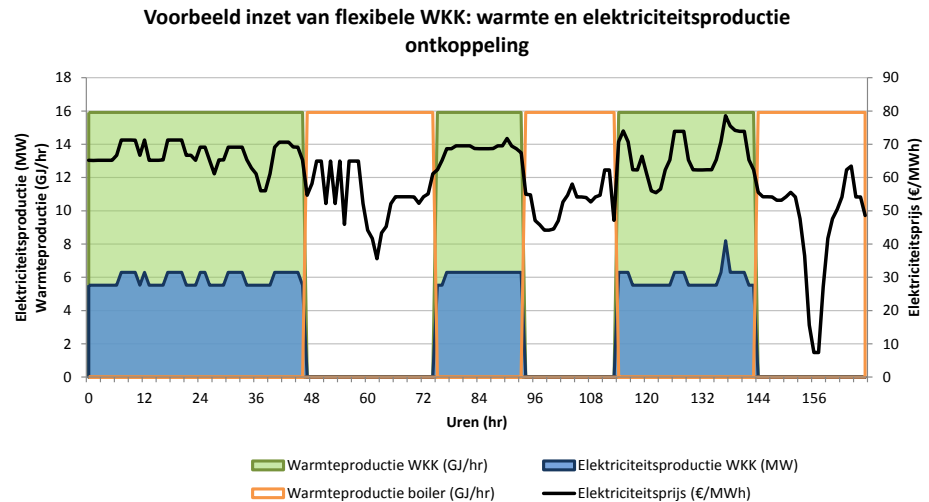
Bij de elektriciteits- en warmteproductie van de WKK-eenheden is te zien dat er in 2020 minder geproduceerd wordt. De toename van hernieuwbare energie in binnen- en buitenland zorgt voor een kleiner marktaandeel voor WKK-productie en voor kleinere marges. De grotere gaskolen prijs-spread in 2020 zorgt voor verdere verkleining van de marges voor de WKK-eenheden. Zo neemt de elektriciteitsproductie van 'must-run' eenheden af door lagere marges in 2020. De verminderde warmte productie van flexibele WKK wordt gecompenseerd door meer warmte te produceren in gas-boilers.

In 2030 neemt de coproductie van elektriciteit en warmte door flexibele WKK-eenheden weer toe ten opzichte van 2020: de markt voor WKK-productie is toegenomen door verminderde import uit Duitsland (uit-fasering van (bruin-) kolencentrales en nucleaire centrales in Duitsland). Verder wordt de groei in hernieuwbare energie (welke voor kleiner marktaandeel voor WKK zorgt) deels gecompenseerd door de toename in elektriciteitsvraag door verdere elektrificatie.

Het gevolg van de hierboven beschreven ontwikkelingen is dat voor het gehele WKK-park de netto variabele baten in 2020 zijn geslonken ten opzichte van 2012 en dat in 2030 de netto baten weer iets gegroeid zijn (maar nog steeds onder het 2012-niveau zitten). Let wel dat in 2020 en 2030 de baten en kosten hoger liggen omdat de brandstofprijzen hoger zijn dan in voorgaande jaren: hierdoor nemen de kosten toe, maar ook de warmteprijs en de elektriciteitsprijs.

De flexibele WKK-eenheden hebben relatief grotere netto baten dan de must-run WKK-eenheden in alle drie de steekjaren. Door de ontkoppeling van warmte- en elektriciteitsproductie bij flexibele WKK-eenheden kunnen zij ervoor kiezen om op uren met lage elektriciteitsprijzen de warmte met een efficiënte boiler op te wekken waardoor ze tijdens die uren geen verlies maken (zie Figuur 32). De must-run eenheden moeten tijdens diezelfde uren wel warmte produceren met de WKK-eenheid en verkopen hun elektriciteit daarbij met verlies. Vooral in 2020 is het voordeel van deze flexibiliteit goed te zien: de flexibele WKK-eenheden hebben dan positieve netto baten terwijl de must-run WKK daar geen netto baten hebben. Let wel, in deze netto baten zijn vaste kosten zoals afschrijving niet meegenomen (zie hiervoor de resultaten van het rendabiliteitsmodel).

Figuur 32 Voorbeeld van inzet van flexibele WKK: bij lage elektriciteitsprijs wordt de boiler gebruikt voor de warmte productie



### Variabele kosten/baten WKK-installaties bij andere scenario's

Figuur 33 laat zien wat de invloed is van een hogere gasprijs (2030-lage CO<sub>2</sub>-prijs scenario), een gas-voor-kolen verwisseling in de merit-order (2030-hoge CO<sub>2</sub>-prijs scenario) en van verdere verduurzaming van de elektriciteitsmix (2030-‘veel hernieuwbaar’). Het hoge CO<sub>2</sub>-prijs en het Groene Revolutie scenario schetsen een beeld van de WKK-positie welke verschilt van het basisscenario (het 2030-Baseline (NP) scenario).

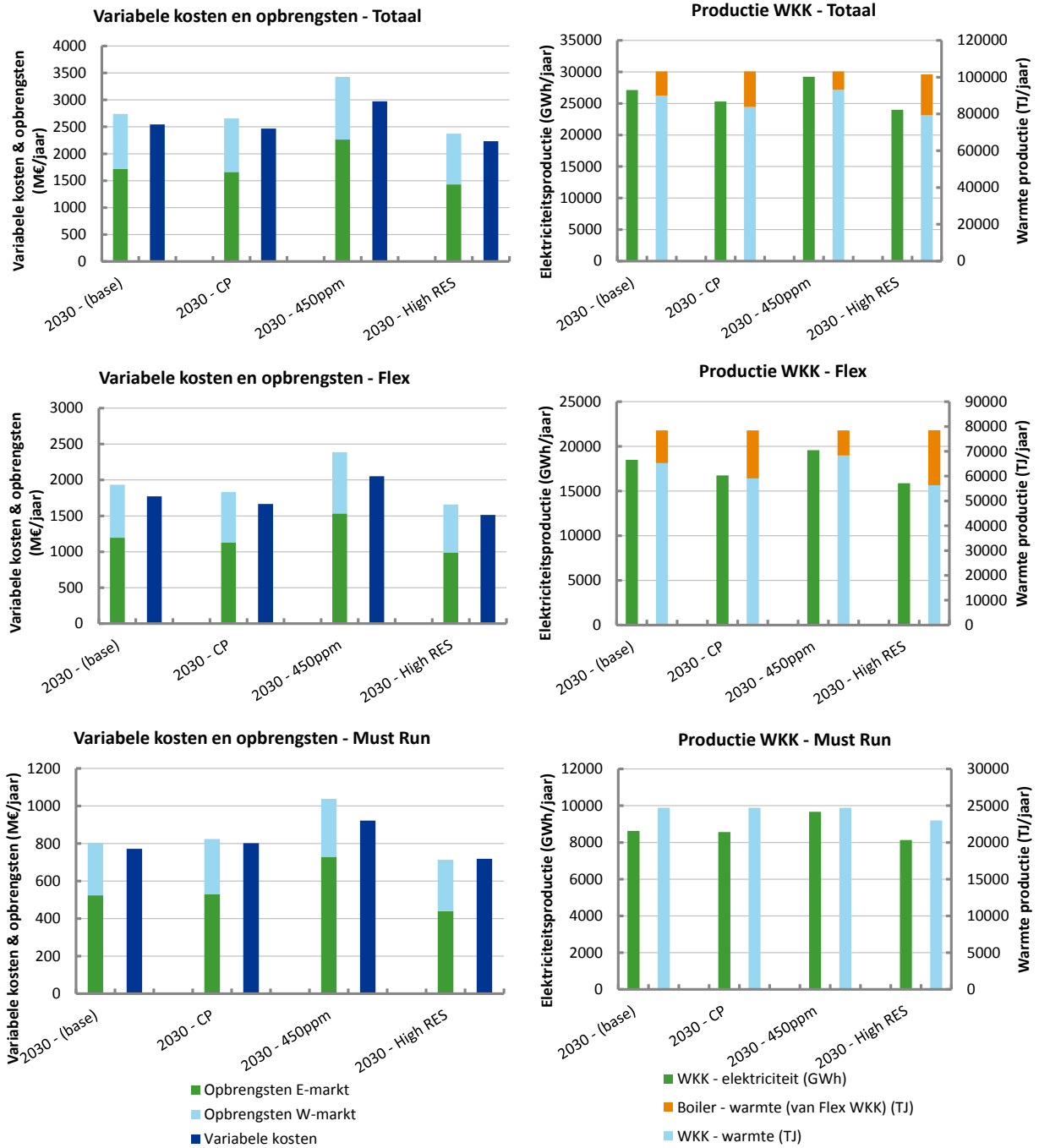
In het hoge CO<sub>2</sub>-prijs scenario is de CO<sub>2</sub>-prijs dermate hoog dat het prijsverschil tussen elektriciteit uit gas- en kolencentrales minimaal is: efficiënte STEG-centrales zijn zelfs goedkoper dan kolencentrales. Het gevolg van deze hoge CO<sub>2</sub>-prijs is dat het prijsniveau van de elektriciteitsprijs ook veel hoger ligt dan in het 2030 - baselinescenario. Daarom produceren de WKK-eenheden meer elektriciteit en verdienen ze meer per MWh elektriciteit. Het 2030-hoge CO<sub>2</sub>-prijs scenario is het scenario met de grootste netto variabele baten voor alle WKK-eenheden.

Het ‘veel hernieuwbaar’ scenario schets een tegengesteld perspectief. Door verdere penetratie van hernieuwbare energie is er minder ruimte voor conventionele eenheden (waaronder WKK) op de elektriciteitsmarkt en ligt het elektriciteitsprijs-niveau ook lager. De flexibele WKK-eenheden hebben door hun flexibiliteit nog positieve netto variabele baten (zij het lager dan in het basisscenario). Maar bij de must-run eenheden zijn de netto baten verdampt<sup>51</sup>.

<sup>51</sup> Elektriciteits- en warmteproductie van must-run eenheden ligt lager in verband met de afschakeling van de meest verlies-draaiende eenheden in de periode voorafgaande aan 2030.



Figuur 33 Resultaten van de gevoeligheidsscenario's, inclusief het 2030-baselinescenario ter referentie





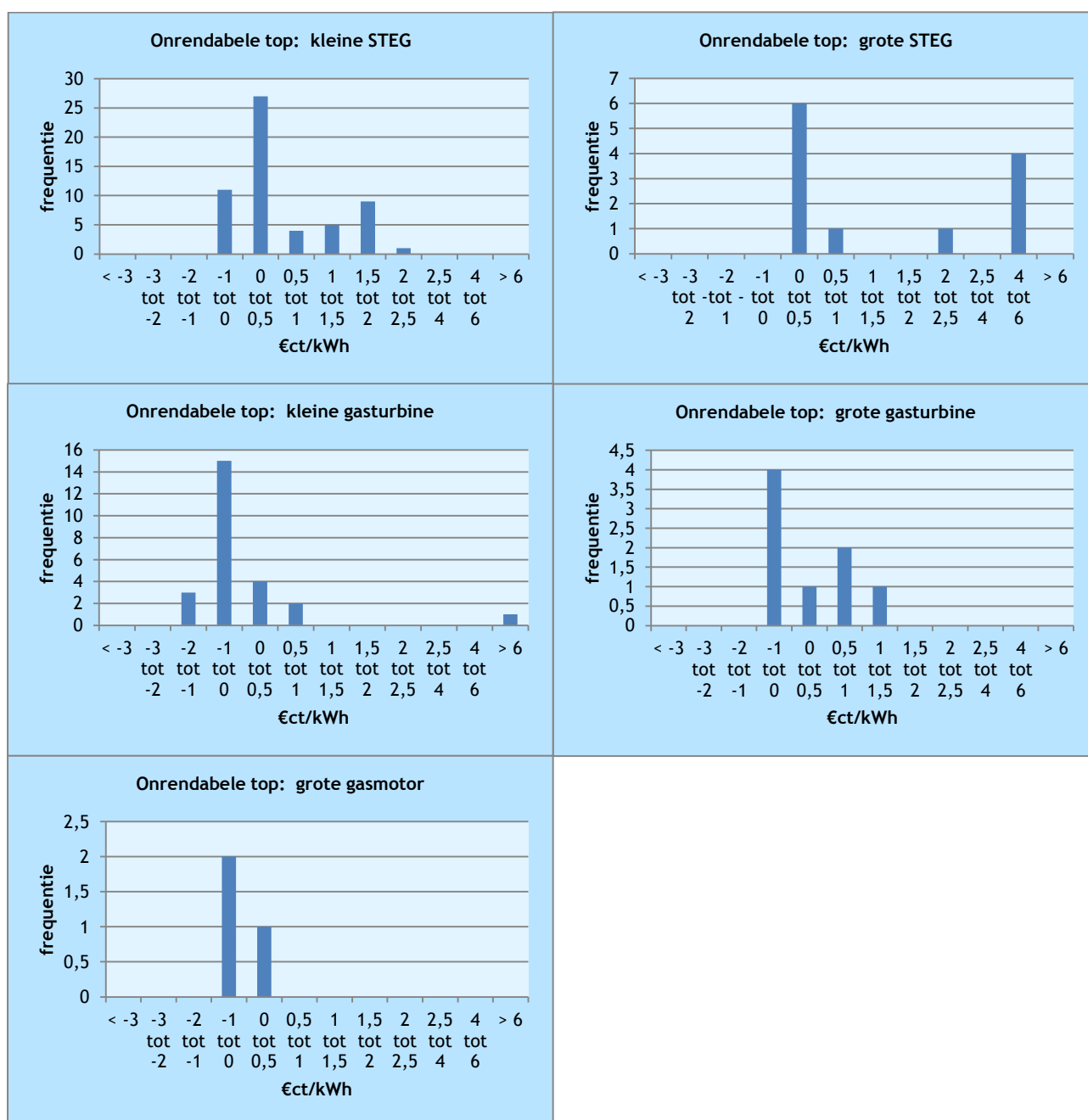
# Bijlage J Resultaten modellering rentabiliteitsmodel

## J.1 Basisscenario 2020

De figuren geven aan wat de ORT is van de WKK-installaties, per type in 2020. In de berekening zijn verdisconteerd:

- investeringen voor retrofitkosten om te voldoen aan de NO<sub>x</sub>-eisen;
- nieuw-investeringskosten van 35% tot en met 0% voor alle typen.

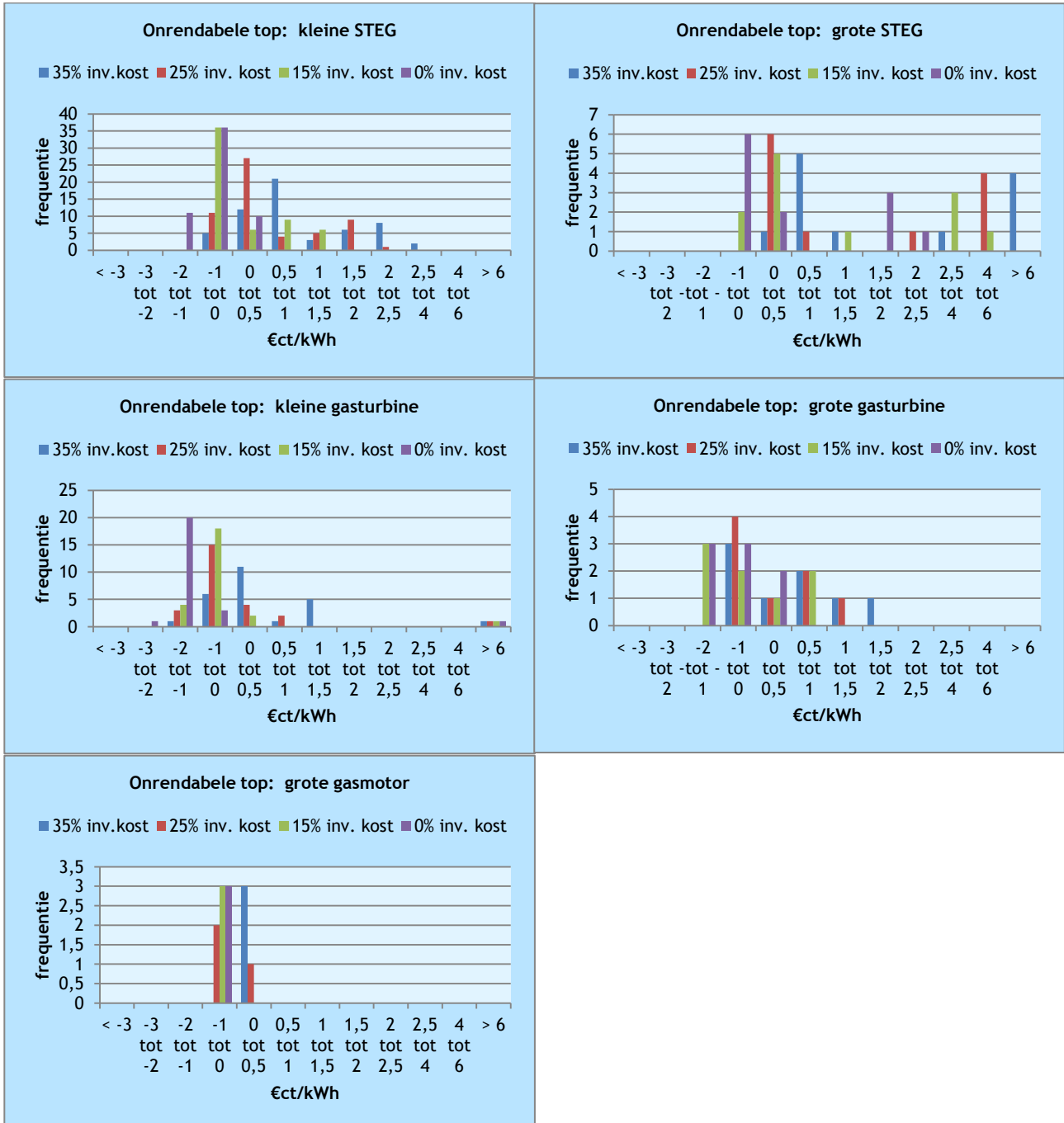
Onderstaande histogrammen 2020 zijn voor de 25% case, volgende pagina is de gevoeligheid voor de 25%.



## Gevoeligheid voor de omvang van de investeringskosten.

In voorgaande onrendabele top berekeningen gaan we van 25% van de nieuw-investeringskosten die meegenomen worden, naast de retrofitkosten om aan NO<sub>x</sub>-emissie-eisen te voldoen.

Onderstaande grafieken geven aan hoe de onrendabele toppen veranderen, als in plaats van het percentage van 25% een ander percentage wordt gekozen.

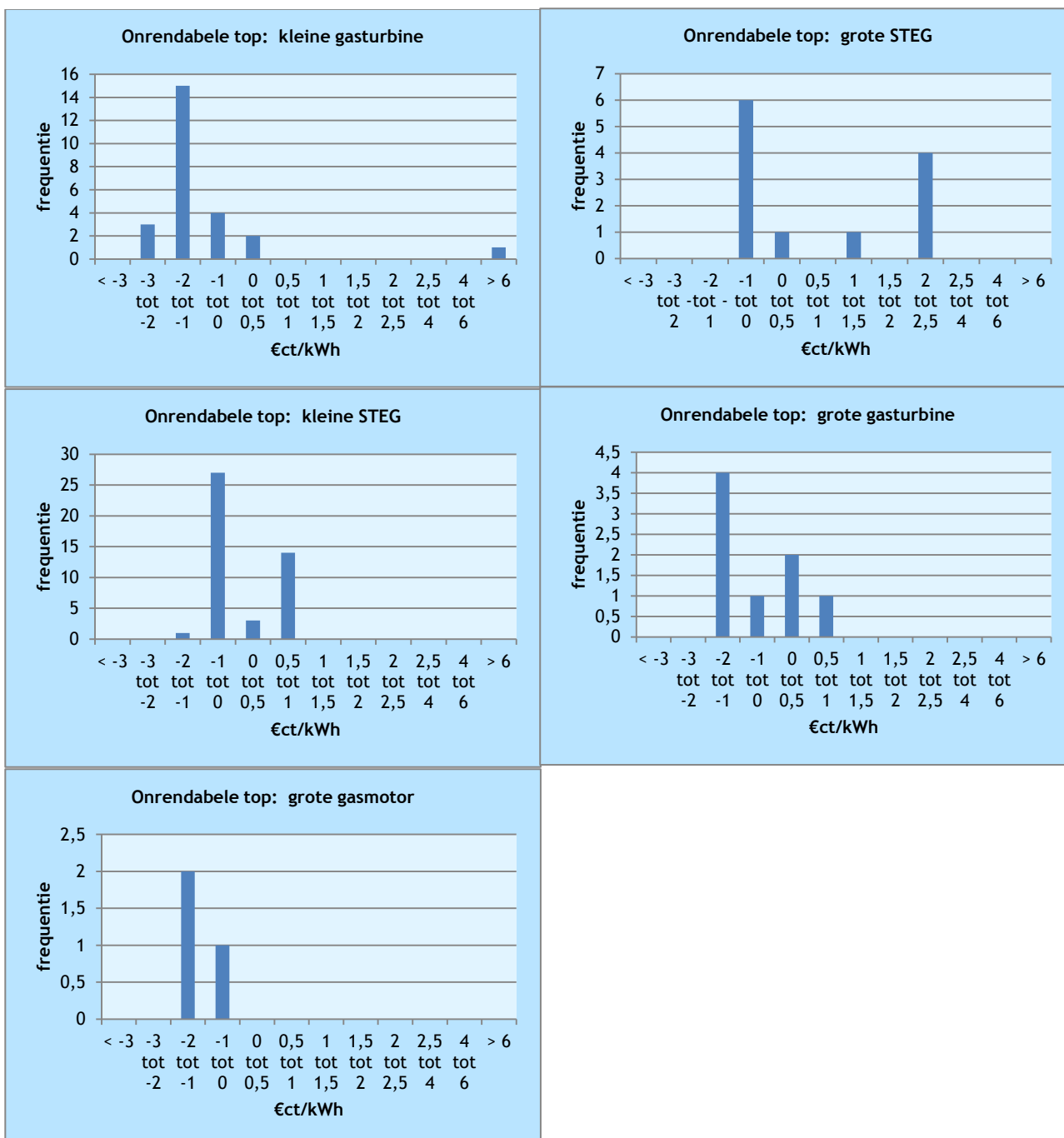


## J.2 Basisscenario 2030

De figuren geven aan wat de ORT is van de WKK-installaties, per type in 2030. In de berekening zijn verdisconteerd:

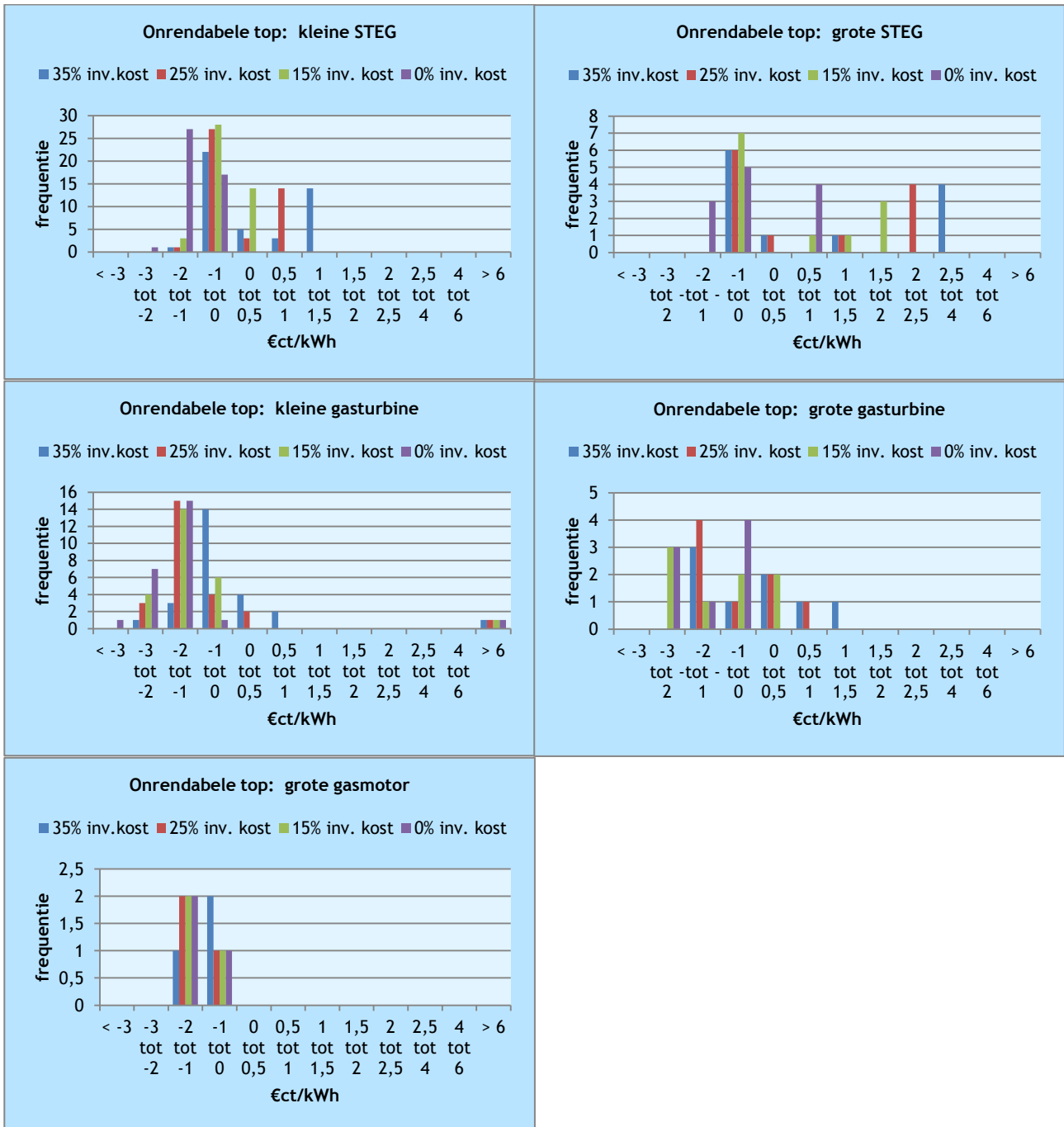
- investeringen voor retrofitkosten om te voldoen aan de NO<sub>x</sub>-eisen
- nieuw-investeringskosten van 35% tot en met 0% voor alle typen.

Onderstaande Histogrammen 2020 zijn voor de 25% case, volgende pagina is de gevoeligheid voor de 25%.



## Gevoeligheid voor 25% nieuw-investeringskosten meenemen bij de minimale retrofitkosten

Onderstaande grafieken geven onrendabele toppen afhankelijk van de omvang van de omvang van de investeringskosten.



### J.3 2030 - Hoge CO<sub>2</sub>-prijzen

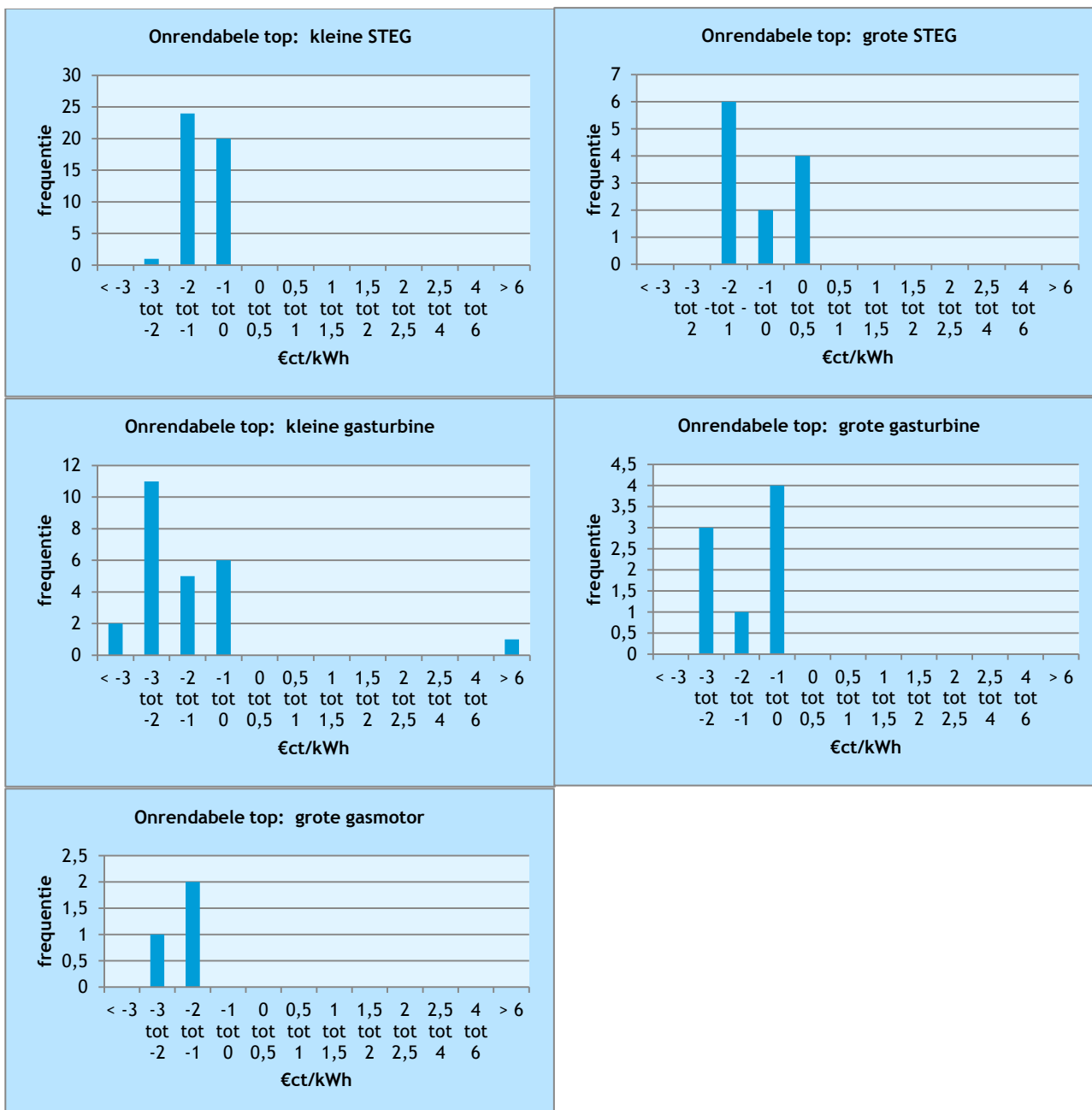
De figuren geven aan wat de ORT is van de WKK-installaties, per type in 2030. In de berekening zijn verdisconteerd:

- investeringen voor retrofitkosten om te voldoen aan de NO<sub>x</sub>-eisen;
- nieuw-investeringskosten van 35% tot en met 0% voor alle typen.

Onderstaande histogrammen 2030 zijn voor de 25% case, volgende pagina is de gevoeligheid voor de 25%.

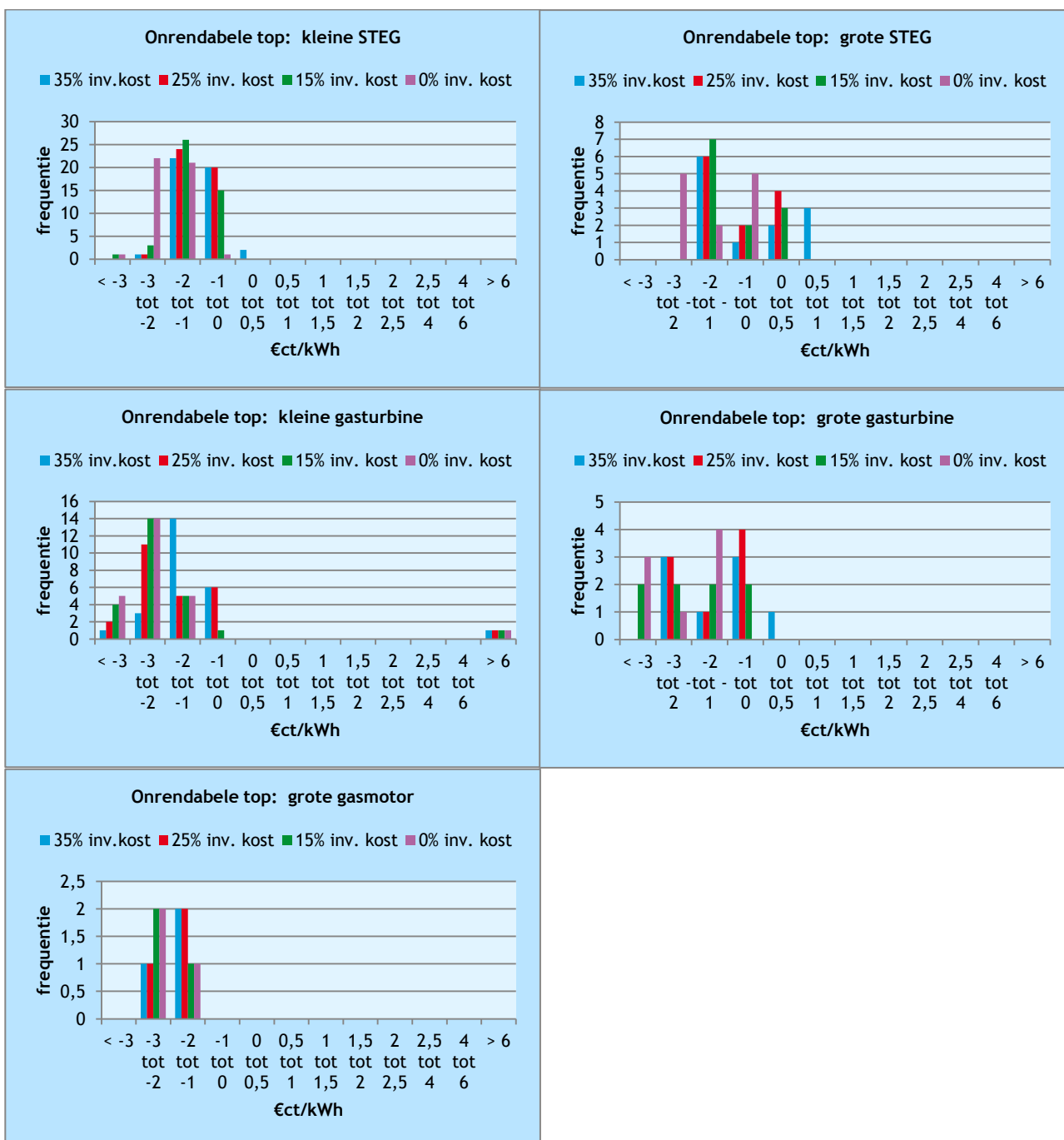
Gasprijs 7,2€/GJ 2012 euro's inflatiecorrectie nog steeds met 2% -> is 0,358 €/nm<sup>3</sup> in 2030.

CO<sub>2</sub>-kosten 71,43 euro/ton in 2012 euro's ; inflatie gecorrigeerd met 2% = 102 €/ton in 2030.



## Gevoeligheid voor 25% nieuw-investeringskosten meenemen bij de minimale retrofitkosten

Onderstaande grafieken geven onrendabele toppen afhankelijk van de omvang van de omvang van de investeringskosten.



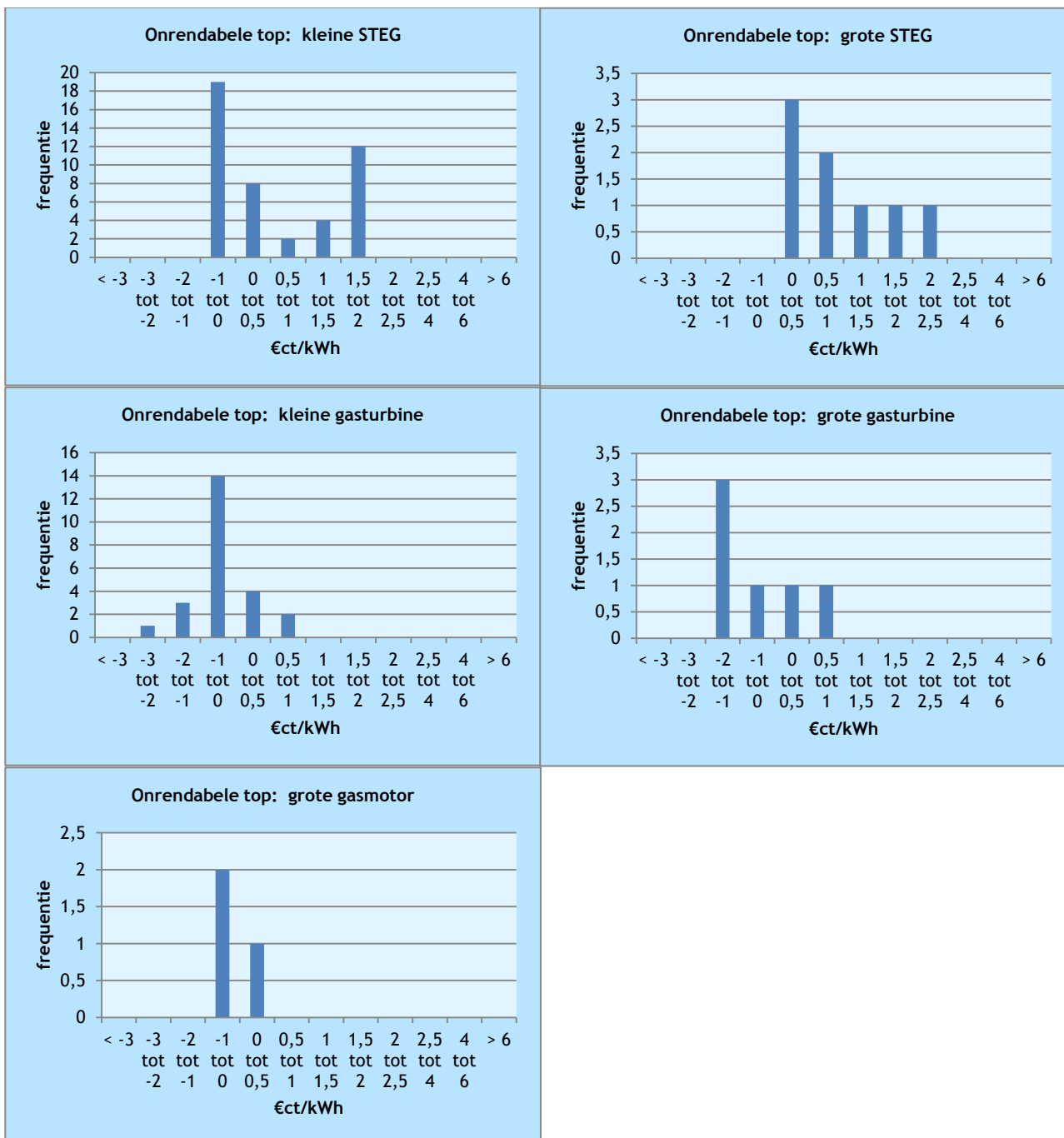


## J.4 2030 - Veel hernieuwbaar

De figuren geven aan wat de ORT is van de WKK-installaties, per type in 2030. In de berekening zijn verdisconteerd:

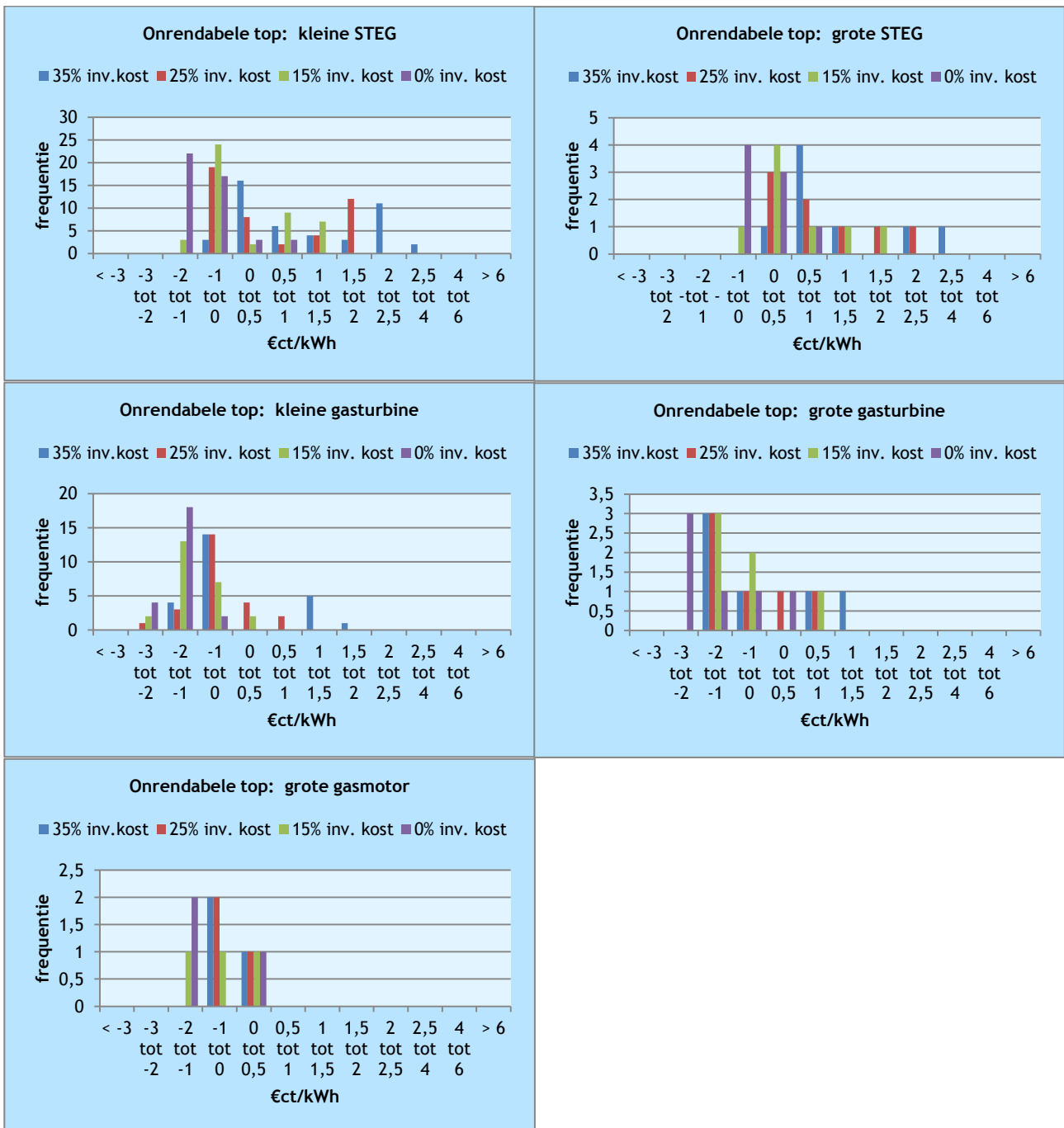
- investeringen voor retrofitkosten om te voldoen aan de NO<sub>x</sub>-eisen;
- nieuw-investeringskosten van 35% tot en met 0% voor alle typen.

Onderstaande Histogrammen 2020 zijn voor de 25% case, volgende pagina is de gevoeligheid voor de 25%.



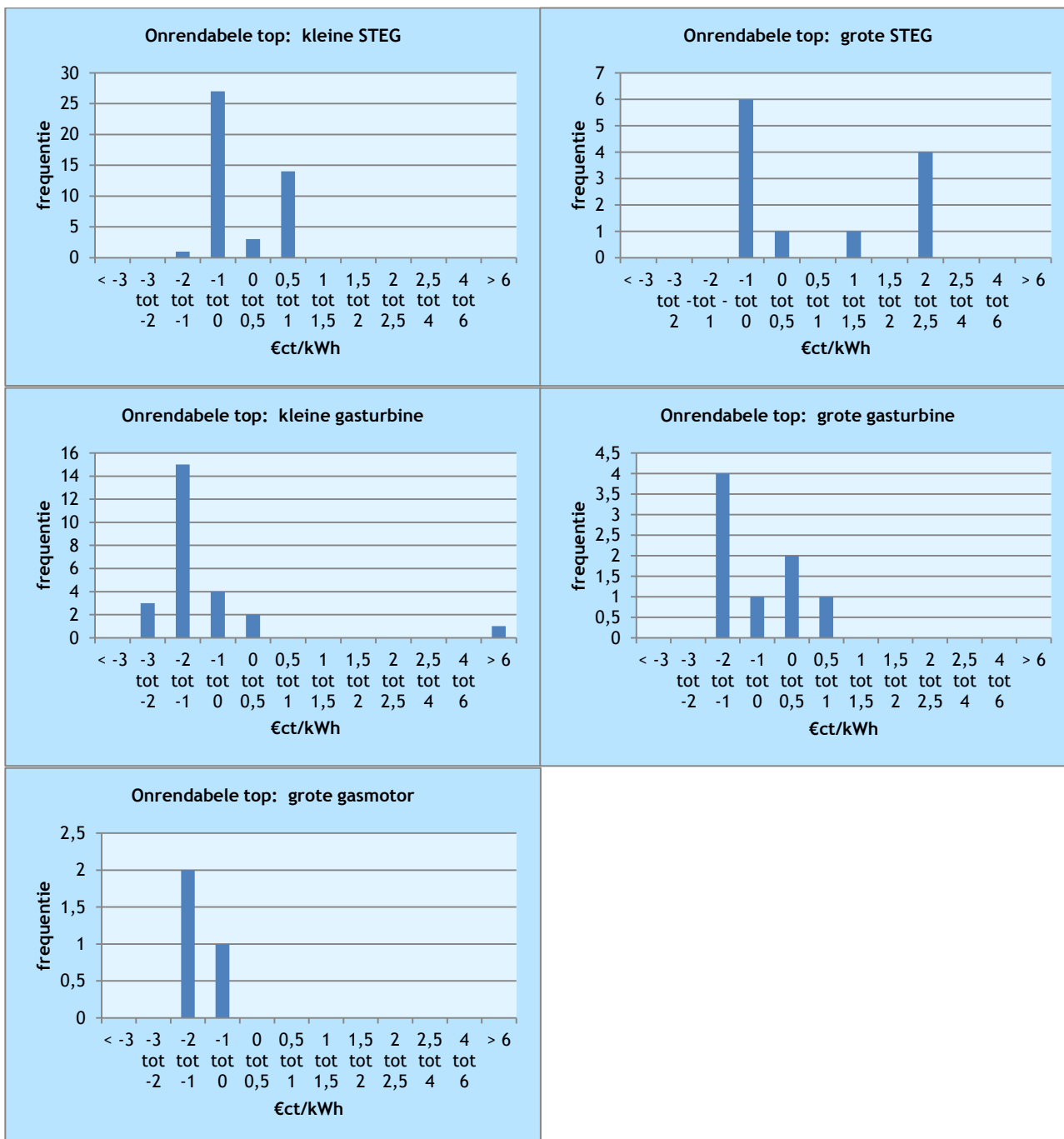
## Gevoeligheid voor 25% nieuw-investeringskosten meenemen bij de minimale retrofitkosten

Onderstaande grafieken geven onrendabele toppen afhankelijk van de omvang van de investeringskosten.



## J.5 2030 - mark-up (€8,1/ MWh)

Onderstaande Histogrammen 2030 zijn voor de 25% case, volgende pagina is de gevoeligheid voor de 25% parameter.

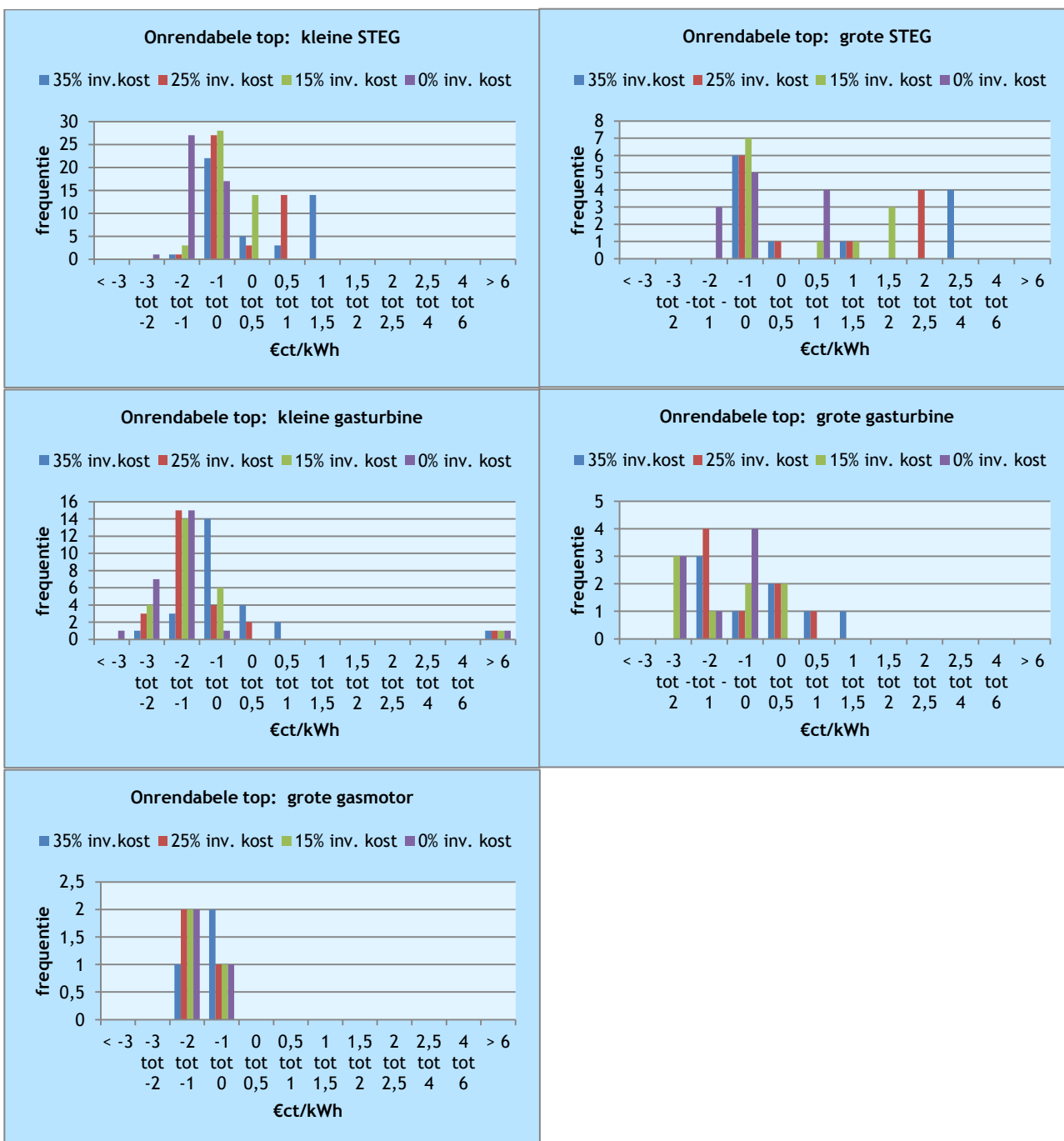


In de berekening zijn verdisconteerd:

- investeringen voor retrofitkosten om te voldoen aan de NO<sub>x</sub>-eisen;
- nieuw-investeringskosten van 35% tot en met 0% voor alle typen.

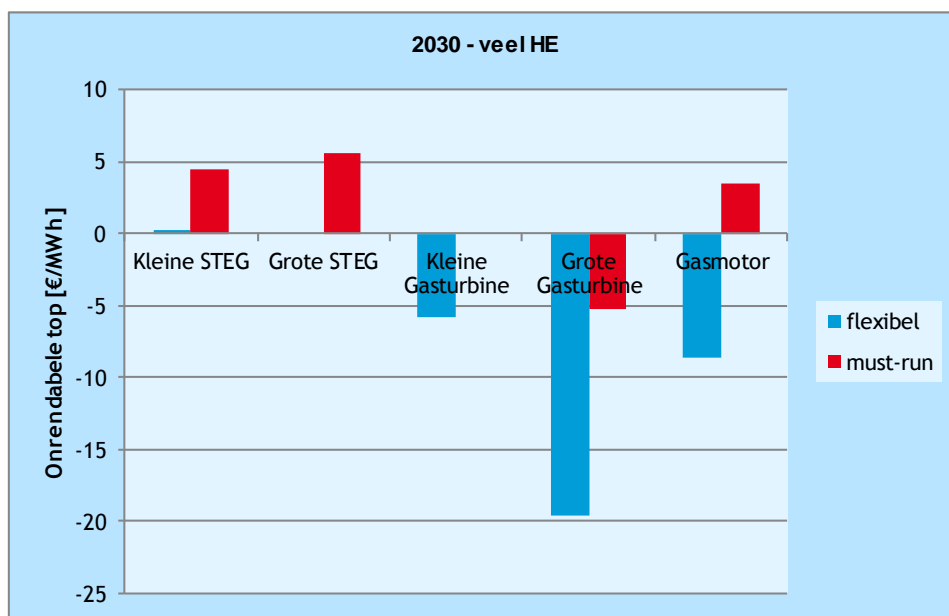
Gevoeligheid voor 25% nieuw-investeringskosten meenemen bij de minimale retrofitkosten.

Onderstaande grafieken geven onrendabele toppen afhankelijk van de omvang van de omvang van de investeringskosten.

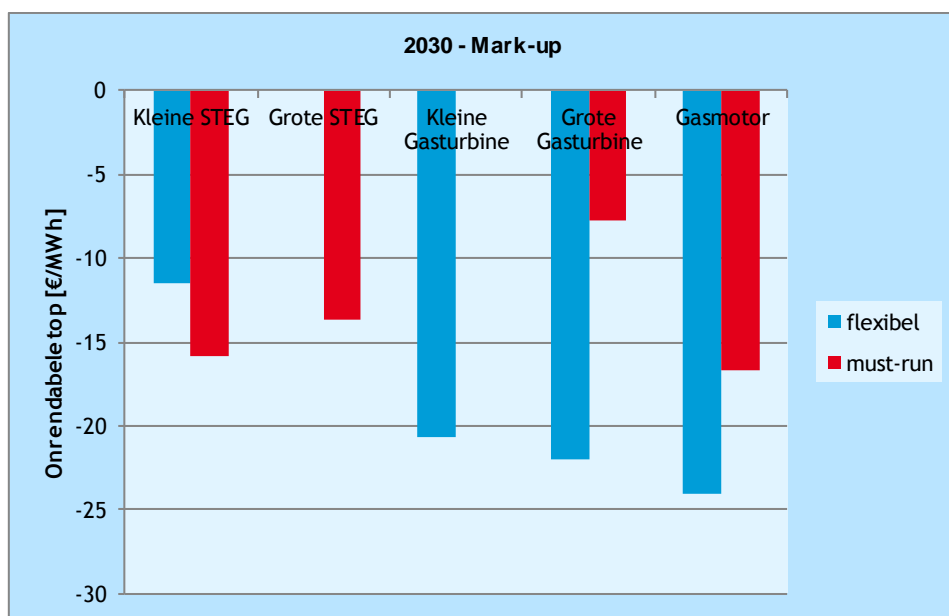


## J.6 Positie must-run en flexibele WKK-installaties in 2030-scenario's met hoog aandeel HE, mark-up en hoge CO<sub>2</sub>-prijs

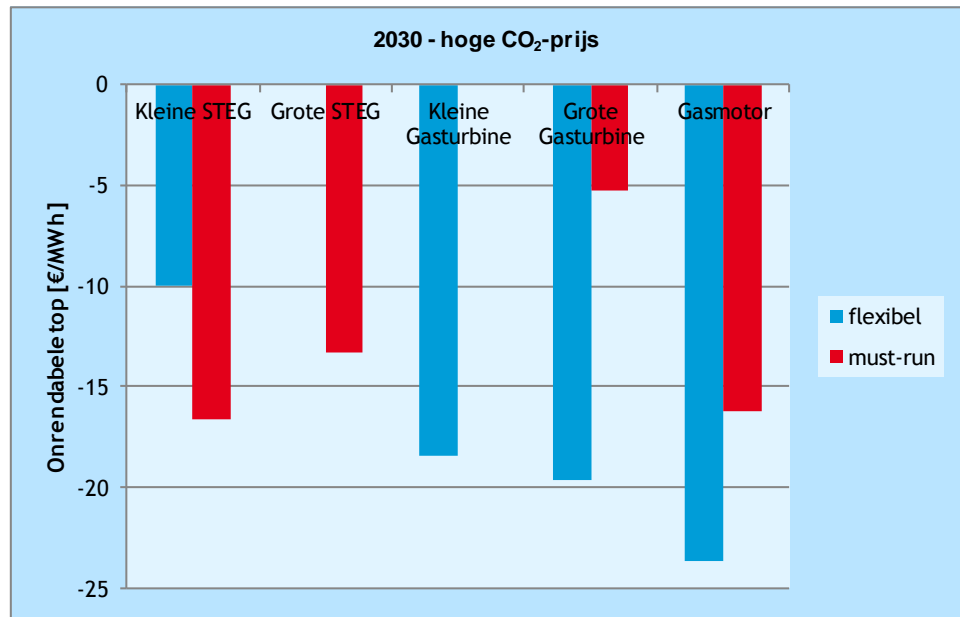
Onrendabele top van flexibele en must-run WKK-installaties in scenario met hoog aandeel HE:



Onrendabele top van flexibele en must-run WKK-installaties bij scenario met mark-up.



Onrendabele top van flexibele en must-run WKK-installaties bij scenario met hoge CO<sub>2</sub>-prijs.



# Bijlage K Berekening impact afschakeling WKK-vermogen op primair energiegebruik en emissies CO<sub>2</sub>

## Primair energiegebruik

Voor de berekening is uitgegaan van vervanging van warmteproductie door een boiler met een rendement van 90%. Voor de vervangende elektriciteitsproductie is uitgegaan van drie scenario's:

- vervanging door nieuwe kolengestookte centrales;
- vervanging door nieuwe gasgestookte centrales;
- vervanging door fossiele referentiepark, excl. WKK.

De verandering van het primaire energiegebruik is het verschil tussen het primaire energiegebruik van de WKK-installaties en de som van het primaire energiegebruik van de vervangende warmteproductie en de vervangende elektriciteitsproductie.

Voor de elektriciteitsproductie is uitgegaan van de volgende rendementen en CO<sub>2</sub>-emissiefactoren, gebaseerd op de database van DNV GL:

	Rendement opwekking elektriciteit		CO <sub>2</sub> -emissiefactor (kg/MWh)	
	2020	2030	2020	2030
Nieuwe kolencentrale	0,45	0,45	786	786
Nieuwe gascentrale	0,58	0,60	348	336
Referentiepark fossiel (excl. WKK)	0,45	0,51		

Het referentiepark is hierbij het fossiele productiepark, exclusief WKK, per 2014. Het referentiepark bestaat in hoofdzaak uit kolen- en gascentrales. Het rendement is daarbij het quotiënt van geproduceerde elektriciteit en energie-inhoud van de brandstof. Dit rendement ligt relatief laag, op 45%, vanwege het aandeel oudere gas- en kolencentrales. Dit ligt daarmee op eenzelfde niveau als dat van nieuwe kolencentrales. Voor 2020 ligt het rendement hoger, op 51%. Reden hiervan is dat oudere kolen- en gascentrales dan zijn afgeschakeld.

Het rendement is niet gecorrigeerd voor transportverliezen, omdat ook bij WKK-installaties sprake is van transportverliezen.

Voor de boiler is uitgegaan van een rendement van 90%. De emissiefactor voor gas is 56,1 kg CO<sub>2</sub>/GJ.

Het uitgangspunt dat het referentiepark fossiel excl. WKK is, is overeenkomstig het protocol monitoring energiebesparing (ECN ; RIVM ; Novem ; CPB, 2001) en de notitie berekening referentierendement (ECN, 2011).

Uit de simulatieberekening volgt een gedeerde productie van elektriciteit en warmte van:

		2020- base	2030- base	2020- base	2030- base
Oorspronkelijke H-productie WKK	[PJ]	91,6	104	91,6	104
Oorspronkelijke E-productie WKK	[TWh]	30,2	34,7	30,2	34,7
Oorspronkelijke emissies WKK	[Mton CO <sub>2</sub> ]	14,8	16,9	14,8	16,9
Gederfde e-opwek WKK	[TWh]	15,8	19,2	24,3	28,2
Gederfde H-opwek WKK	[PJ]	40,3	48,8	70,2	80,7
Verminderde WKK-emissies	[kton CO <sub>2</sub> ]	7,4	8,9	11,5	13,3

Resultaat:

Berekening impact op primair energiegebruik	Aandeel uitfaseren 2020 hernieuwde berekening (52%)		Uitfaseren 2020 hernieuwd, incl. glastuinbouw (87%)	
	2020 base case	2030 base case	2020 base case	2030 base case
<b>1. Primair e-gebruik WKK</b>				
Inzet gas (PJp):	131	159	20558	237
<b>2. Primair e-gebruik vervangende warmte</b>				
Gederfde warmteproductie (PJe)	40,3	48,8	70,2	80,7
prim. Energiegebruik (PJp)	44,8	54,2	78,0	89,6
<b>3. Primair e-gebruik vervangende elektriciteit</b>				
Gederfde E-productie (PJe) (PJe)	56,9	69,0	87,4	101,7
A. vervanging door gas	98,0	115	151	169
B. vervanging door kolen	126	153	194	226
C. vervanging door ref. park (fossiel, excl. WKK)	126	135	194	199
<b>Groei primair e-gebruik</b>	<b>11,45</b>	<b>9,72</b>	<b>24,15</b>	<b>21,58</b>
A. vervanging door gas	<b>39,76</b>	<b>48,06</b>	<b>67,70</b>	<b>78,06</b>
B. vervanging door kolen	<b>39,76</b>	<b>30,02</b>	<b>67,70</b>	<b>51,48</b>
C. vervanging door ref. park (fossiel, excl. WKK)				



## Berekening groei CO<sub>2</sub>-emissies:

	2020 <i>base case</i>	2030 <i>base case</i>	2020 <i>base case</i>	2030 <i>base case</i>
1. CO <sub>2</sub> -emissies afgeschakelde WKK	7,37	8,95	11,48	13,32
2. CO <sub>2</sub> -emissie vervangende warmte	2,51	3,04	3,94	4,53
3. CO <sub>2</sub> -emissie vervangende elektriciteit				
A. <i>vervanging door gas</i>	5,50	6,44	8,45	9,49
B. <i>vervanging door kolen</i>	12,41	15,07	19,09	22,20
<b>Groei CO<sub>2</sub>-emissies</b>				
A. <i>vervanging door gas</i>	<b>0,64</b>	<b>0,53</b>	<b>0,91</b>	<b>0,69</b>
B. <i>vervanging door kolen</i>	<b>7,56</b>	<b>9,16</b>	<b>11,55</b>	<b>13,40</b>



## Bijlage L Suggesties uit case-studies

- Stoom uit restafval:
  - vereenvoudiging vergunningenregime voor aanvoer afval derden.
- Stoom uit biomassa:
  - subsidieregime voor biomassa dat rekening houdt met toekomstige prijsfluctuaties;
  - voldoende ruime criteria duurzaamheid biomassa;
  - sturen op inzet van biomassa voor stoomopwekking i.p.v. e-productie;
  - (hoger energetisch rendement bij inzet als warmtebron);
  - vereenvoudiging procedure voor toekenning digestaat als meststof;
  - optie is ook stoomlevering uit biomassa-bijstook in kolencentrale.
- Geothermie:
  - fonds voor risicovolle investeringen (bijv. revolving fund);
  - behoud van garantieregeling voor geothermieboringen;
  - in SDE-Plus geen cap op hoeveelheid geothermie.
- Energiebesparing/verhogen efficiency WKK:
  - risicodragend overheidskapitaal (off-balance financiering) voor investeringen in energiebesparing;
  - beleidsaandacht voor WKK.
- Flexibiliseren WKK:
  - verbeteren mogelijkheden om flexibliteit WKK's te vermarkten (onbalansmarkt TenneT, kortere tijdsbestekken);
  - ondersteunen innovatieve vormen van flexibele WKK, zoals power to heat en power to pressure.