

COGEN Vlaanderen

*Adviesnota 2015*

Flexibele WKK in het  
energielandschap van de  
toekomst



**COGEN  
Vlaanderen**



## 1 Inhoudsopgave

1	Inhoudsopgave .....	3
2	Inleiding .....	5
2.1	Belgische elektriciteitsvoorziening .....	5
2.1.1	Elektriciteitsvraag .....	5
2.1.2	Elektriciteitsproductiepark .....	5
2.1.3	Elektriciteitsopslag .....	7
2.2	Wat is flexibiliteit .....	7
2.3	Eigenschappen van flexibiliteit .....	8
2.3.1	Snelheid .....	8
2.3.2	Richting .....	8
2.3.3	Vermogen, duurtijd en verschuiving .....	9
2.3.4	Kost .....	9
2.4	Nood aan flexibiliteit .....	10
3	Technische flexibiliteit bij WKK-installaties .....	11
3.1	Turbines .....	11
3.1.1	Flexibiliteit elektrisch .....	11
3.1.2	Flexibiliteit thermisch .....	15
3.2	Motoren .....	17
3.2.1	Flexibiliteit elektrisch .....	17
3.2.2	Flexibiliteit thermisch .....	19
4	Systeembenadering van flexibele inzet WKK .....	22
4.1	Opzet berekeningen .....	22
4.2	De plaats van baseload-WKK in het energiesysteem .....	24
5	WKK-park in Vlaanderen: ervaringen met flexibiliteit .....	28
5.1	Opgesteld vermogen .....	28
5.2	Ervaringen met flexibiliteit .....	29
5.2.1	Gasturbines .....	29
5.2.2	Stoomturbines .....	31
5.2.3	Motoren .....	31
6	Barrières .....	33
6.1	Algemeen .....	33
6.1.1	Lagere elektrische efficiëntie van de WKK-installaties .....	33

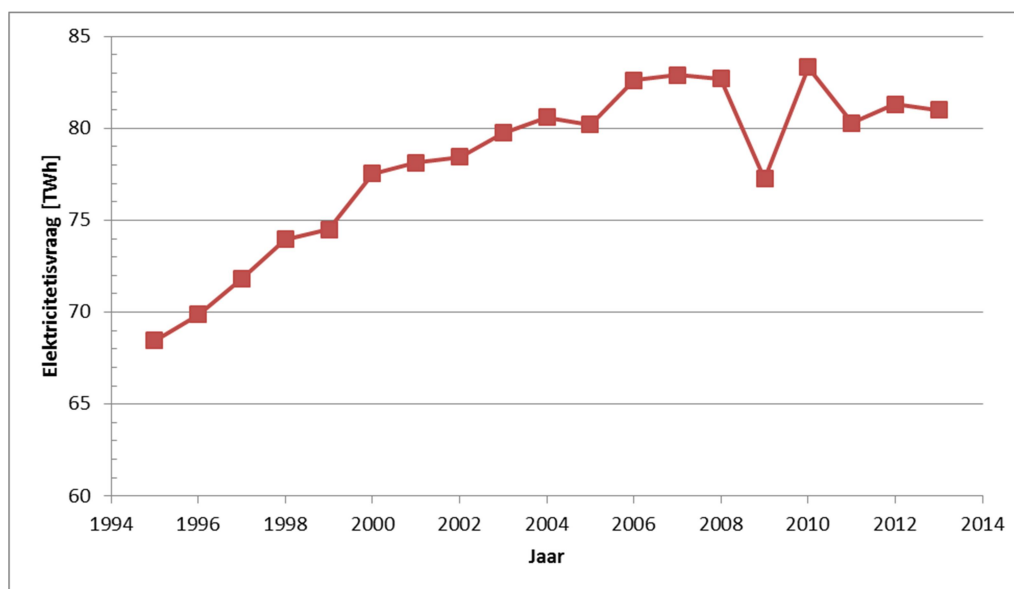
6.1.2	Bijkomende investeringskosten .....	33
6.1.3	Bijkomende operationele kosten .....	33
6.1.4	Verminderde rendabiliteit bestaande installaties.....	33
6.1.5	Verminderde rendabiliteit nieuwe installaties.....	34
6.1.6	Onzekerheid betreffende toekomstig beleid .....	34
6.2	Turbines in industrie.....	34
6.2.1	Buffering van grote hoeveelheden stoom is praktisch moeilijk.....	34
6.2.2	Gebrek aan voldoende (efficiënte) stoomproductiecapaciteit .....	35
6.2.3	Risicoaversie met oog op maximale betrouwbaarheid van de stoomlevering .....	35
6.2.4	Contractuele bepalingen met een eventuele mede-investeerder .....	35
6.2.5	Onderhoudscontract .....	36
6.3	Motoren in de gebouwensector.....	36
6.3.1	Bepaalde blootstelling aan variabele elektriciteitsprijzen.....	36
6.3.2	Bepaalde thermische buffercapaciteit .....	36
7	Gebruiksvoorbeelden van flexibele WKK .....	37
7.1	Impact van een flexibele inzetstrategie bij een motor-WKK.....	37
7.2	Impact van flexibele inzetstrategieën bij een GT-WKK .....	39
7.3	Virtual powerplants.....	40
8	Besluit .....	41
9	Bibliografie.....	43
A	Addendum: Flexibiliteit: WKK vs wind (en zon) .....	45
A.1	Inleiding .....	45
A.2	Dimensionering wind-turbines.....	45
A.2.1	Wiekdiameter .....	46
A.2.2	Het vermogen van de generator .....	47
A.2.3	Voordeel vlakker profiel .....	50

## 2 Inleiding

### 2.1 Belgische elektriciteitsvoorziening

#### 2.1.1 Elektriciteitsvraag

De evolutie van de totale bruto elektriciteitsvraag in België gedurende de jaren 1995 – 2013 wordt in Figuur 1 afgebeeld. Vóór 2009, steeg de elektriciteitsvraag bijna jaarlijks. In 2009 had men een dip in de elektriciteitsvraag ten gevolge van de crisis. In 2010 lijkt de elektriciteitsvraag terug de evolutie te volgen van voor de crisis om vanaf 2011 te stagneren rond de 81 TWh.

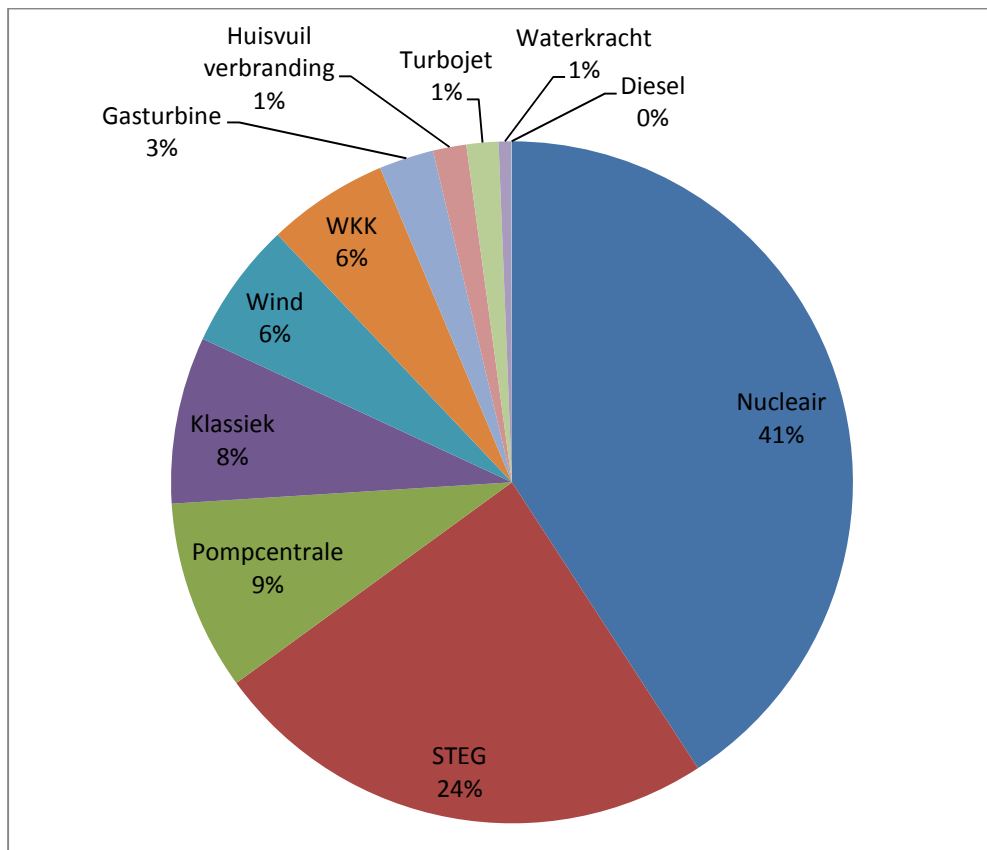


Figuur 1: Bruto elektriciteitsvraag in België (Eurostat, 2015)

In haar studie over de vooruitzichten van de elektriciteitsbevoorrading tot 2030 voorspelt het Federaal Planbureau (Federaal Planbureau, 2015) een stijging van de elektriciteitsvraag met ongeveer 0,76% per jaar tussen 2010 en 2030. Deze langetermijnevolutie van de elektriciteitsvraag wordt bepaald op basis van onder andere de voorspelde economische groei, de demografie en de internationale brandstofprijzen.

#### 2.1.2 Elektriciteitsproductiepark

Deze elektriciteitsvraag wordt grotendeel ingevuld door Belgische productie-eenheden. In 2014 werd ongeveer 22% van de binnenlandse vraag gedekt door import (CREG, 2015). Figuur 2 geeft een overzicht van de verschillende types productie-installaties op het transmissienet (Elia) met het aandeel in het totaal opgesteld vermogen dat ze vertegenwoordigen. Hieronder worden de voornaamste installaties besproken.



Figuur 2: Type productie-installaties aangesloten op het transmissienet op vermogenbasis

Er staan 7 kernreactoren opgesteld in België, verdeeld over de sites van Doel en Tihange, met een totale productiecapaciteit van 5.926 MW. (CREG, 2015) De centrales zijn typische baseload centrales met trage opstart. In 2003 is een wet gestemd die voorziet voor een geleidelijke afbouw van nucleaire elektriciteitsproductie. In 2013 is beslis om hiervan af te stappen door de levensduur van Tihange 1 te verlengen met tien jaar tot 2025. Recent is eveneens de verlenging van de levensduur van Doel 1 & 2 goedgekeurd. Volgens de huidige planning zullen Doel 3 en Tihange 2 sluiten in 2022 en de overige nucleaire centrales in 2025.

Andere typische baseload centrales zijn de klassieke thermische centrales bestaande uit een stoomketel en stoomturbine. Het totaal opgesteld vermogen in België is 1.465 MW. De meest gebruikte brandstoffen in dergelijke centrales zijn steenkool, biomassa en afval. In Tabel 1 kan men een onderverdeling vinden volgens het type brandstof. De milieuvergunning van de steenkoolcentrale in Langerlo verstrijkt in april 2016 en wordt vermoedelijk omgebouwd tot een biomassacentrale, zij het dat de toekomst van dit project recent weer in vraag werd gesteld omwille van het faillissement van de nieuwe eigenaar van de centrale. Anderzijds plant Belgian Eco Energy (BEE) de bouw van een moderne 200 MW biomassacentrale in Gent. De klassieke thermische centrales zijn doorgaans typische baseload centrales, hoewel nieuwe installaties (bijvoorbeeld installatie BEE) ook met flexibiliteitsvereisten geconcipeerd worden.

Tabel 1: Klassieke thermische centrales met brandstoftype

Brandstof	Aantal	Totaal nominaal vermogen (MW)
Steenkool	2	470
Houtpellets	2	363
Afval	14	317
Mix aardgas en hoogovengas	1	315
<b>Totaal</b>	<b>19</b>	<b>1465</b>

In 2014 waren er in België 9 stoom-en gascentrales, of kortweg STEG-centrales, met elk een vermogen van ongeveer 400 MW. STEG-eenheden zijn relatief flexibel en worden gebruikt voor het leveren van op- en afregelvermogen als secundaire reserves. Door de lage rendabiliteit van de STEG-eenheden de afgelopen jaren hebben verscheidene producenten echter beslist om hun centrales al dan niet tijdelijk buiten werking gestellen.

In België staan er 5 gasturbines (292 MW) en 11 turbojets (220 MW) opgesteld die dienst doen als piekvermogen. De centrales kunnen meerdere keren per dag opgestart worden en bereiken hun maximaal vermogen op minder dan 10 minuten.

België heeft eind 2015 een totaal geïnstalleerd vermogen van 2.228,7 MW aan wind, waarvan 1516,4 MW op land en 712 MW in zee (Het laatste nieuws, 2016). Het totaal geïnstalleerd PV-vermogen bedraagt 2953 MW. (Elia)

### 2.1.3 Elektriciteitsopslag

België telt 2 sites uitgerust met pompcentrales. De grootste is Coe, met een maximale productiecapaciteit van 1.216 MW en een opslagcapaciteit van ongeveer 5 GWh. De tweede, Plate Taille, heeft een maximale productiecapaciteit van 141 MW. Energieopslag gebeurt door water naar een hoger gelegen spaarbekken te pompen tijdens perioden van lage elektriciteitsvraag en het water over een turbine terug naar een lager gelegen spaarbekken te laten lopen tijdens perioden met een grote elektriciteitsvraag. De opslagcapaciteit wordt bepaald door de kleinste van deze twee spaarbekken.

## 2.2 Wat is flexibiliteit

In een elektriciteitssysteem moeten de elektriciteitsvraag en de elektriciteitsproductie op ieder ogenblik perfect in balans zijn. Een onevenwicht van vraag en productie heeft een frequentie- en spanningsafwijkingen tot gevolg. Indien deze te groot worden kunnen zij leiden tot schade bij de netelementen waaronder de elektriciteitsgebruikers.

Voor het elektriciteitssysteem **is flexibiliteit de mogelijkheid om continu in dienst (in evenwicht) te blijven bij sterk fluctuerende elektriciteitsvraag of -productie.**

## 2.3 Eigenschappen van flexibiliteit

Zoals hierboven aangehaald, is flexibiliteit de mogelijkheid om te reageren op een verhoogde elektriciteitsproductie of –vraag. Dit is een dienst die door verschillende partijen en technologieën geleverd kan worden, die op verschillende vlakken van elkaar kunnen verschillen. Hieronder worden een aantal belangrijke eigenschappen besproken.

### 2.3.1 Snelheid

Snelheid is op twee vlakken van belang: de reactiesnelheid en de regelsnelheid. De reactiesnelheid is de tijd tussen de nood aan flexibiliteit (bijvoorbeeld een centrale die wegvalt) en de werkelijke reactie (een andere centrale die meer begint te produceren, een bijkomende centrale die opstart ...). De reactiesnelheid is doorgaans groot voor installaties die al ‘online’ zijn, terwijl bijvoorbeeld klassieke installaties die koud staan erg traag zullen zijn.

De regelsnelheid is de snelheid van verandering die gerealiseerd wordt: het vermogen per tijdseenheid dat toegevoegd wordt of dat weggenomen wordt. Gasmotoren en gasturbines kunnen bijvoorbeeld 15% van hun vermogen op- of afregelen per minuut. Voor een gasturbine van 40 MW betekent dat dan 6 MW/min.

Onderstaande tabel geeft hiervan een aantal richtwaarden (Energy Matters, 2015).

	opstarttijd (h)	regelsnelheid (%/min)	regelsnelheid (MW/min) [veronderstelde capaciteit (MW)]
Poederkool	6	2%	10 [500]
Kerncentrale	100	3%	30 [1000]
Gasturbine	0,25	15%	6 [40]
Kolenvergasser met gasturbine	24	3%	7,5 [250]
STEG	2	4%	16 [400]
Gasmotoren	0,1	15%	0,75 [5]
Batterijen <sup>1</sup>	0	100%	10 [10]

### 2.3.2 Richting

Vermogen regelen kan in twee richtingen: stijgende productie (of dalende vraag) en afnemende productie (of stijgende vraag). Sommige technologieën kunnen voornamelijk in 1 richting regelen. Andere kunnen in beide richtingen regelen, maar moeten daarvoor bepaalde maatregelen treffen (bijvoorbeeld op deellast draaien, om zowel meer als minder te produceren; of opslagcapaciteit niet volledig benutten, zodanig dat energie zowel opgenomen als geleverd kan worden).

<sup>1</sup> <http://www.energieactueel.nl/tennet-blij-met-batterijsysteem-voor-inpassen-groene-stroom/>



### 2.3.3 Vermogen, duurtijd en verschuiving

De grootte van het vermogen dat op- of afgeregeld kan worden is een andere onderscheidende factor. Ze hangt daarenboven sterk samen met de duurtijd waarbij dat vermogen kan geleverd worden. Het product van vermogen en duurtijd geeft immers een capaciteit.

Klassieke productie-installaties kunnen – zolang men binnen het nominale werkingsgebied blijft – quasi oneindig<sup>2</sup> bepaalde vermogens leveren. Bij opslag wordt men beperkt door de maximale opslagcapaciteit (bijkomende afname is maar mogelijk tot de buffer vol is, bijkomende levering is mogelijk tot de buffer leeg is). Demand side management wordt doorgaans beperkt door de achterliggende processen: hoe lang kunnen de processen op een economische/comfortabele manier aangepast worden aan de flexibiliteitsbehoefte.

Dit is sterk gelinkt aan een volgend kenmerk: verschuiving. Zuivere productietechnologieën kennen doorgaans geen verschuiving: of men op tijdstip A meer of minder produceert heeft geen rechtstreeks effect op het al dan niet produceren op tijdstip B. Voor andere technologieën en oplossingen, zoals opslag en demandside management, is dat wel het geval. Een batterij die aangewend wordt om piekproductie van elektriciteit op te slaan, moet deze op een later tijdstip weer afstaan (wil ze later weer beschikbaar zijn voor nieuwe opslag). Bij demand side management zien we dan weer dat het uitstellen van bepaalde verbruiken later gecompenseerd wordt door een toegenomen verbruik.

Beperkte duurtijd en verschuiving (de ene induceert de andere) hebben voornamelijk een impact op de inzet van deze oplossingen, gezien deze altijd met een opportuiniteitskost gepaard gaat.

WKK-toepassingen vallen algemeen genomen tussen de categorieën met een beperkte en een oneindige capaciteit: enerzijds wordt de elektriciteitsproductie klassiek bepaald door de warmtevraag. Door opslag van de warmte (cf. glastuinbouw, zie verder), kan elektriciteit produceren op momenten zonder warmtevraag, tot de warmtebuffer gevuld is, en kan warmte leveren zonder elektriciteitsproductie op momenten van weinig elektriciteitsvraag. Anderzijds kan men verder gaan, en bijvoorbeeld alternatieve warmteproductie inzetten bij lage elektriciteitsvraag of hoge productie (bijvoorbeeld klassieke ketel, of zelfs power-to-heat waarbij de elektriciteitsproductie van de WKK wegvalt maar er bovendien een elektriciteitsvraag is voor levering van de warmte), en kan men zelfs omgekeerd overwegen om warmte weg te koelen<sup>3</sup> bij hoge elektriciteitsvraag op momenten zonder warmtevraag.

### 2.3.4 Kost

Uiteraard is de kost een belangrijke factor. Hierbij moet onderscheid gemaakt worden tussen de investeringskost en de exploitatiekost. Indien flexibiliteit slechts gedurende een aantal uren per jaar benut wordt, is het moeilijk om hoge investeringskosten terug te verdienen, zelfs bij lage exploitatiekosten. Naarmate de nood aan flexibiliteit toeneemt, worden duurdere technologieën met een lagere exploitatiekost echter meer en meer interessant.

<sup>2</sup> i.e. erg lang in vergelijking met de standaard benodigde regelsnelheden en -tijden

<sup>3</sup> Dit is uiteraard niet gunstig voor de primaire-energiebesparing van de installatie, maar is in se niet slechter dan het uitschakelen van de WKK-installatie en het inschakelen van bijvoorbeeld een open-cycle gasturbine.

## 2.4 Nood aan flexibiliteit

In een elektriciteitssysteem bestaande uit hoofdzakelijk stuurbare productiecapaciteit, zoals tot enkele jaren terug het geval was, kan de elektriciteitsproductie de variatie in de elektriciteitsvraag gemakkelijk volgen. Afgelopen jaren is er veel hernieuwbare productiecapaciteit geïnstalleerd op basis van zon- en windenergie. Beide bronnen produceren elektriciteit in functie van de weersomstandigheden en houden geen rekening met ogenblikkelijke elektriciteitsvraag. Zo kan het zijn dat er veel hernieuwbare elektriciteitsproductie is wanneer er weinig vraag is of omgekeerd. Daarnaast zijn beide energiebronnen nooit perfect voorspelbaar en wijkt de werkelijke elektriciteitsproductie intraday bijgevolg regelmatig af van de voorspellingen. Dit heeft als gevolg dat resterende stuurbare productiecapaciteit zowel de fluctuaties in de elektriciteitsvraag als de fluctuaties in de niet-stuurbare hernieuwbare productiecapaciteit moet opvangen. Hoe kleiner het aandeel stuurbare productiecapaciteit wordt, hoe uitdagender dit zal zijn. Dit werd ook aangetoond in de nota die COGEN Vlaanderen vorig jaar opleverde, en waarnaar we graag verwijzen voor een uitgebreidere bespreking van dit onderwerp. (COGEN Vlaanderen, 2014)

Een Nederlandse studie van (ECN, 2014) heeft de impact onderzocht van een toenemend opgesteld vermogen aan intermitterende hernieuwbare energieproductie op de vraag naar flexibele (productie-)capaciteit. Door gebrek aan flexibiliteit van bepaalde conventionele centrales (steenkool, nucleair) zal er een verschuiving van productie plaatsvinden naar meer flexibele, gasgestookte centrales.

Ten gevolge van de toename van de productie uit HEB zal de vraag naar flexibiliteit, in de vorm van op- of afregelvermogen, op de intraday-markt toenemen. De toegenomen vraag op de intraday-markt zal de prijzen opdrijven, zoals men kan zien in Figuur 3. Deze toont een inschatting van de maandelijkse prijzen in 2023 voor de (Nederlandse) spotmarkt day-ahead en de intraday-markt voor op- en afregelend vermogen. De waarde op de intraday-markt zal hoger zijn dan de day-ahead om de nood aan flexibiliteit in te kunnen vullen. Zowel op- als afregelen zal een bijkomende inkomstenbron zijn voor conventionele productiecentrales.



Figuur 3: Maandelijke day-ahead en intraday prijzen (ECN, 2014)

Een efficiënte en transparante intraday-markt zal helpen om de toenemende elektriciteitsproductie uit HEB op een kostenefficiënte wijze te integreren in het elektriciteitssysteem. (ECN, 2014)

### 3 Technische flexibiliteit bij WKK-installaties

Ruwweg kan men de WKK-installaties in twee groepen onderverdelen in functie van de warmtedrager: stoom en warm water. Daarbij heeft men voornamelijk de turbinetechnologieën voor stoomtoepassingen en de inwendige verbrandingsmotoren voor warmwatertoepassingen. Beide technologieën worden hieronder besproken.

#### 3.1 Turbines

Onder de turbinetechnologieën vindt men de stoomturbines en de gasturbines. Stoomturbines zijn typisch zware machines met een grote thermische inertie. Zoals in hoofdstuk 5.2 wordt aangetoond, denkt men bij flexibiliteit van turbines in de eerste plaats aan gasturbines, vandaar dat enkel deze besproken worden.

Hoewel WKK als gelijktijdige productie van elektriciteit én warmte traditioneel door de warmtevraag wordt gestuurd, zijn er verschillende mogelijkheden om flexibiliteit in functie van de elektriciteitsvraag aan te bieden. Dit heeft echter ook impact op de warmteproductie van de WKK, daarom dienen daarnaast ook de mogelijkheden bekeken worden om het verlies (of overschot) aan warmteproductie door de WKK te compenseren.

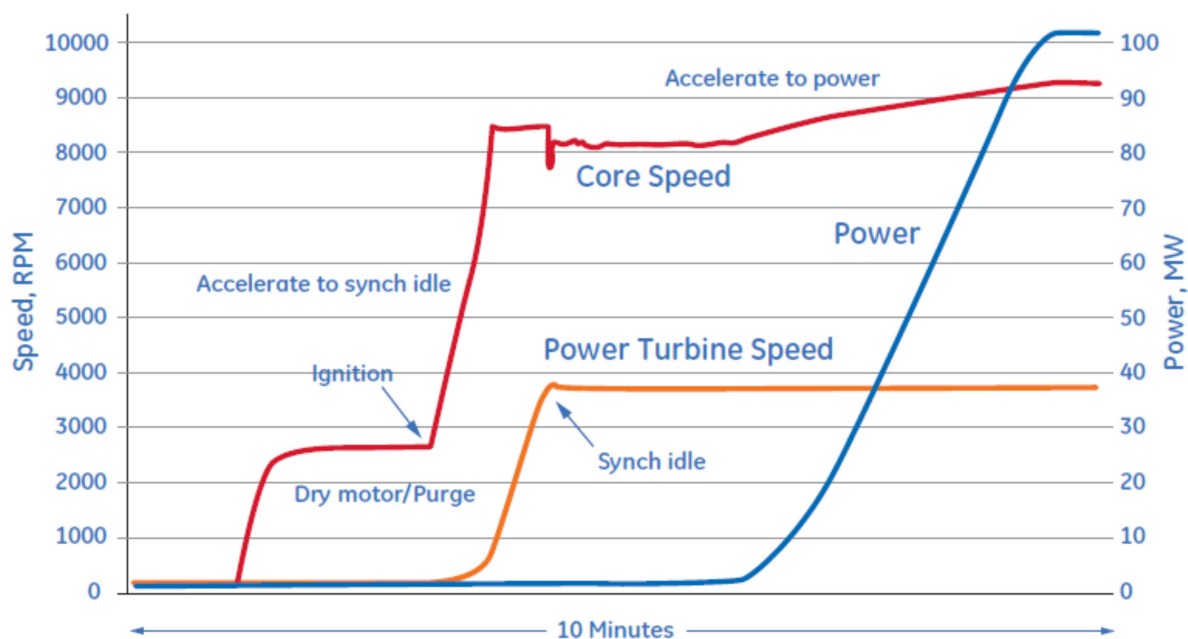
##### 3.1.1 Flexibiliteit elektrisch

###### 3.1.1.1 Start-stopcyclus

Men kan de gasturbine starten en stoppen in functie van een respectievelijke hoge en lage elektriciteitsvraag. Dit wordt ook wel eens omschreven als *cycling*. Het aantal start- en stopcyclussen per jaar zal hierbij veel hoger zijn dan bij het traditionele baseloadbedrijf. Bij elke start- en stop zullen er hoge temperatuurgradiënten ontstaan. Hoge temperatuurgradiënten veroorzaken thermische stress op de componenten, waardoor de beschikbare levensduur van de turbine afneemt. De temperatuurgradiënten zullen meer uitgesproken zijn naarmate de materiaaldikte toeneemt. Daarnaast zal het probleem toenemen naarmate de start-of stopprocedure versneld wordt.

De gasturbine-WKK bestaat uit twee hoofdcomponenten nl. de gasturbine en de afgassenketel. Elk zal afzonderlijk een impact hebben op de opstartsnelheid en *cycling*-frequentie van de installatie.

Gasturbines kan men onderverdelen in heavy-duty eenheden en aëroderivatives. Heavy-duty eenheden zijn speciaal ontwikkeld voor de elektriciteitssector of industriële toepassingen. Aëroderivatives daarentegen, zijn gebaseerd op lichte, compacte en efficiënte vliegtuigmotoren die aangepast werden voor stationaire toepassingen. Deze laatste kunnen sneller opstarten en sneller reageren op een veranderende belasting. Ze kunnen binnen enkele minuten opstarten van koud naar synchronisatiesnelheid om vervolgens het productievermogen op te drijven tot vol vermogen binnen de 10 à 15 minuten. Een voorbeeld van een startsequentie van een twee-assige gasturbine wordt uitgebeeld in Figuur 4. In sommige installaties worden dergelijke turbines ingezet als piekeenheden. De belangrijkste factoren die de opstart van een gasturbine beperken zijn de limieten op de snelheid van de luchtstroom doorheen de compressorschoepen, trillingslimieten en de verbrandingstemperatuurlimieten om schade aan de turbineschoepen te voorkomen.



Figuur 4: Opstartsequentie gasturbine (GE, 2015)

In vergelijking met de gasturbine is de afgassenketel vaak de meest beperkende factor in de opstartsnellheid en *cycling*-frequentie van de WKK-installatie. De afgassenketel bestaat namelijk uit verschillende dikwandige onderdelen in het hogedrukstoomgedeelte (stoomtrommel, oververhitter, ...), die gevoeliger zijn aan thermische stress ten gevolge van hoge temperatuurgradiënten. Deze gradiënten moeten goed opgevolgd worden om schadelijke gevolgen zoals metaalmoeheid, corrosie en vervormingen tegen te gaan.

Naarmate de gebruikte stoomdruk en –temperatuur toeneemt, dient de materiaaldikte van de componenten van de afgassenketel toe te nemen, waardoor deze een hogere thermische belasting ondervinden en bijgevolg een kortere levensduur kennen.

Om de thermische belasting binnen de perken te houden duurt het langer om de afgassenketel op te starten van uit koude toestand in vergelijking met warme toestand. De definitie van warme start varieert van constructeur tot constructeur, maar gewoonlijk is dit gedefinieerd tot acht à zestien uur na stop van de gasturbine. Dit heeft tot gevolg dat de verstreken tijd sinds de laatste stop een grote impact heeft op de opstarttijd.

Problemen bij de afgassenketel ten gevolge van een snelle opstart van een gasturbine kan men vermijden door beide te ontkoppelen. Dit kan gebeuren met een *bypassstack*, een bijkomende schouw die tussen de gasturbine en de afgassenketel geplaatst wordt, waarbij men de toevoer van uitlaatgassen naar de afgassenketel tijdelijk kan beperken.

Een installatie met afgassenketel moet voor opstart geventileerd worden om zelfontbranding van de opeengehoopte gassen in de gasturbine, afgassenketel of uitlaatsysteem te vermijden. De ventilatietijd hangt af van het ketelvolume en de luchtstroom door de afgassenketel is gemiddeld 15 minuten. Deze ventilatietijd verhoogt de totale starttijd van een gasturbine-WKK. Een vrijstelling van deze verplichte ventilatieprocedure voor opstart kan toegestaan worden indien er gedurende de

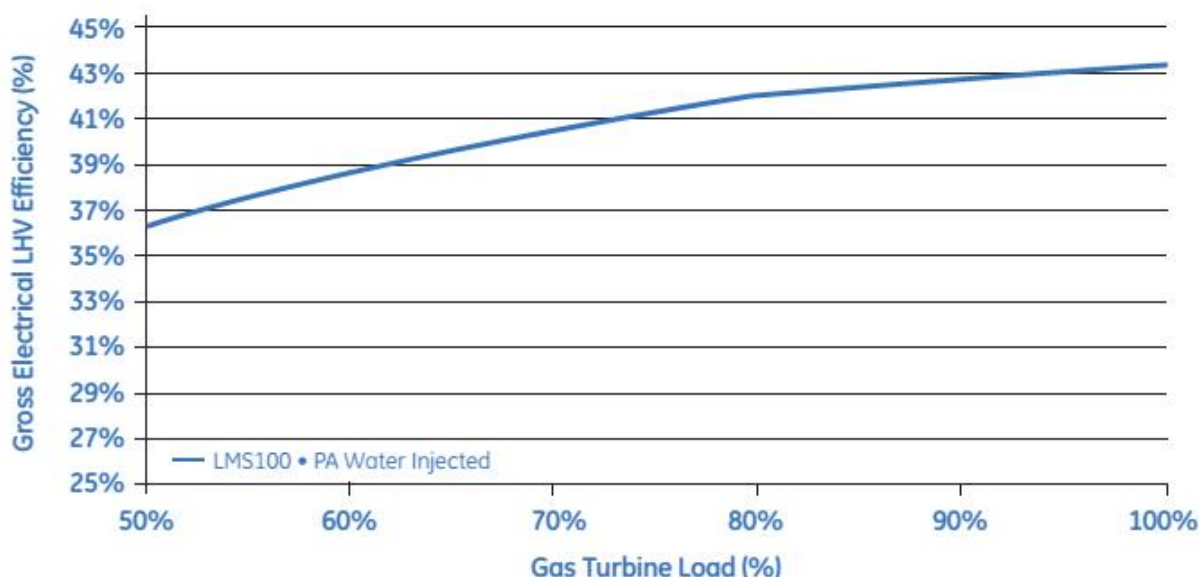
normale stopprocedure voldoende grote luchtstroom is om alle resterende brandbare gassen uit het systeem te verwijderen en bijkomende veiligheidsinrichtingen zijn die garanderen dat er zich geen gaslekken kunnen voordoen tijdens stilstand.

De opstart van een STEG-WKK, bestaande uit (een) gasturbine(s), een afgassenketel en een stoomturbine, is complexer en zal langer duren voordat het geheel op vol vermogen werkt. De uitlaatgassen moeten immers de afgassenketel opwarmen alvorens deze stoom met de juiste stoomparameters kan produceren die de stoomturbine zal aandrijven. Het kan zijn dat de gasturbine(s) binnen 10 à 15 minuten op vol vermogen werken, waarna de stoomcyclus langzaam wordt opgestart zodat bij een warme start de stoomturbine na 30 tot 50 minuten zijn volledig vermogen kan leveren.

Bij de meeste gasturbine-WKK-installaties moet men om technische redenen na een stop minimaal 3 à 4 uur wachten alvorens men de gasturbine terug mag starten. Om de startkosten te kunnen terugverdienen is eveneens een minimale draaitijd gewenst. Bijgevolg zal men ervoor zorgen dat de WKK maximaal één start-stopcyclus per dag doorloopt.

### 3.1.1.2 Deellastbedrijf

Er bestaat ook de mogelijkheid om in functie van de elektriciteitsvraag de elektriciteitsproductie van de gasturbine terug te regelen. Bij deellastwerking daalt echter het elektrisch rendement van de gasturbine, zoals men kan zien in Figuur 5. Daarnaast stijgen de onderhoudskosten per eenheid geproduceerde elektriciteit, de draaiuren blijven immers constant terwijl de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit afneemt.



Figuur 5: Efficiëntie van een gasturbine bij deellast (GE, 2015)

Een voordeel van deellastwerking is dat men sneller kan reageren bij een toenemende elektriciteitsvraag. Daarnaast vermindert men de onderhoudskosten die gepaard gaan met een start-stop. Bijkomend vermijdt men mogelijke risico's op opstartproblemen, dewelke – afhankelijk van de 'balancing'-prijzen – grote negatieve impact kunnen hebben op de rendabiliteit.

Het niveau tot waarop men de gasturbine kan terug regelen is vaak beperkt vanwege de hogere CO/NOx-uitstoot bij lagere temperaturen in de verbrandingskamer.

Bij (aeroderivative) gasturbines wordt het vermogen gemoduleerd door sets van branders aan- of uit te schakelen. Binnen elk werkingspunt zorgt de sturing van de gasturbine ervoor dat de actieve branders gelijkmatig verdeeld zijn in de verbrandingskamer zodanig dat de kans op oververhitting van bepaalde componenten beperkt blijft. Om van een bepaald werkingspunt naar een ander werkingspunt over te gaan moeten er telkens enkele branders aan- en uitgezet worden. Sterk schommelende elektriciteitsproductie waarbij men telkens van werkingspunt moet veranderd worden is daarom niet zo vanzelfsprekend bij gasturbines.

### 3.1.1.3 Piekproductie

Bij sommige (oudere) types van gasturbines injecteert men stoom of water in de verbrandingskamer om de emissies onder controle te houden. Deze techniek noemt men *wet low emissions* (WLE). Door meer stoom te injecteren dan nodig kan met de elektriciteitsproductie met een bijkomende 10% opdrijven. Dit zou men ook kunnen gebruiken indien er een hoge elektriciteitsvraag is. De meeste recente gasturbines gebruiken echter *dry low emissions* (DLE), waarbij de emissies onder controle gehouden door een geavanceerder ontwerp van de verbrandingskamer. Hierbij is piekproductie door stoominjectie niet mogelijk.

Bij acute stroomtekorten<sup>4</sup> is het mogelijks ook interessant om elektriciteit te produceren onafhankelijk van de warmtevraag. Vermits buffering van stoom niet vanzelfsprekend is zal dit betekenen dat bij afwezigheid van een warmtevraag deze warmte vernietigd moet worden. Dit kan op verschillende manieren.

Een eerste optie is de verbrandingsgassen van de gasturbine afleiden door een bypass-stack zodat deze niet door de afgassenketel gaan en er bijgevolg geen stoom geproduceerd wordt. Zoals hierboven uitgelegd is dit niet mogelijk met de meeste bestaande installaties, omdat ze hier niet op voorzien zijn.

Een tweede optie is het condenseren van de geproduceerde stoom in (nood)koelers. Hiervoor is eveneens een bijkomende investering nodig.

Tenslotte heeft men ook altijd de mogelijkheid om stoom af te blazen. Met deze mogelijkheid verliest men naast de warmte ook het behandeld water, wat ook een zekere kost heeft. De investering die hiervoor nodig is, is echter gering.

In de praktijk is de kans echter klein dat er elektriciteit moet geproduceerd moet worden zonder een stoomvraag vermits turbine-WKK-installaties meestal geplaatst worden op industriële sites met een continue warmtevraag.

---

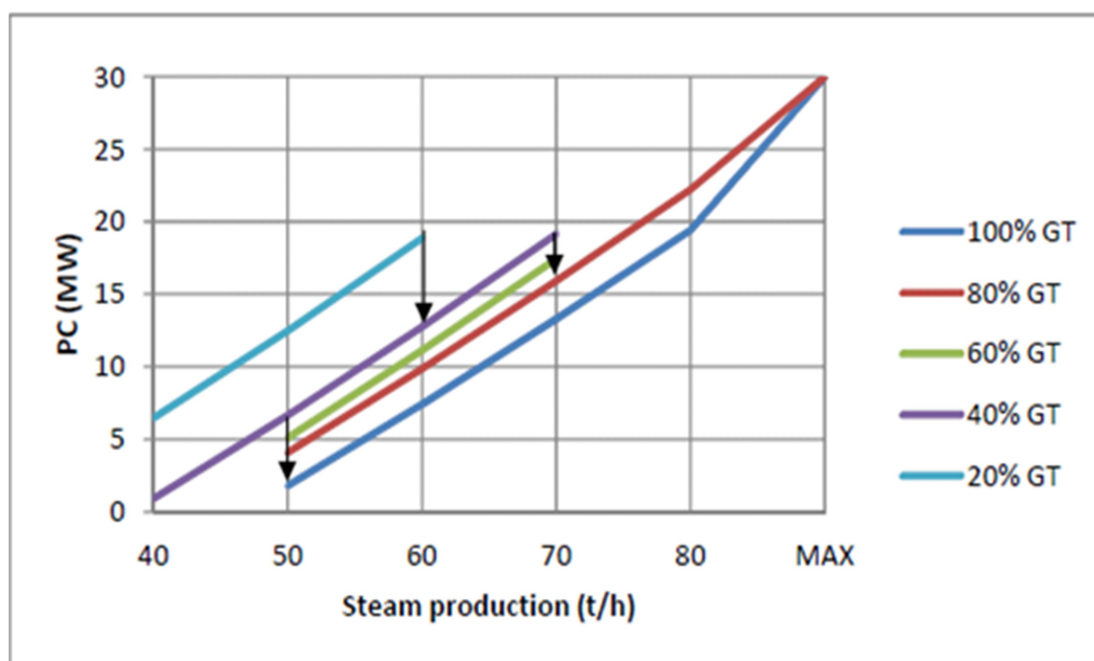
<sup>4</sup> Denk bijvoorbeeld aan de dreigende stroomtekorten in de winter '14-'15

### 3.1.2 Flexibiliteit thermisch

Het flexibel inzetten van de gasturbine heeft ook impact op de warmteproductie van de WKK. Om de continuïteit van het productieproces te kunnen verzekeren moet de stoom door alternatieve technieken geproduceerd worden. Deze technieken verschillen afhankelijk of de gasturbine stilstaat of in deellast draait.

#### 3.1.2.1 Extra bijstook in de afgassenketel of HRSG (Heat Recovery Steam Generator)

Bij een gasturbine WKK in deellastwerking kan men tot op een zeker hoogte het verlies aan stoomproductie compenseren door de bijstook te verhogen. Dit wordt getoond in Figuur 6, die voor verschillende belastingen van een gasturbine (40 MWe GT-WKK op basis van LM6000) aangeeft welk vermogen aan bijstook (post combustion, PC) nodig is om een bepaald tonnage aan stoomproductie te realiseren. Zo kan een installatie die nominaal bij vollast 70 ton stoom produceert bij een deellast op 40% van de elektriciteitsproductie evenveel stoom produceren door de bijstook met ongeveer 6 MW te verhogen.



Figuur 6: Bijstook in functie van de totale stoomproductie (Electrabel, 2013)

#### 3.1.2.2 Koudeluchtbedrijf van de HRSG

Als de HRSG-ketel uitgerust is met een 'forced draft'-ventilator kan, terwijl de gasturbine stil staat, de ketel met verse lucht werken. Indien de installatie ook nog eens voorzien is van een bypass-stack tussen de gasturbine en de HRSG-ketel kan de overschakeling tussen WKK-bedrijf en ketelbedrijf bijna onmiddellijk gebeuren. Terwijl de gasturbine gestopt wordt, start de ventilator op en binnen 30 seconden is deze op vollast. Ondertussen wordt de luchtstroom uit de gasturbine afgeleid via een bypass-stack. Het drukverlies in de stoomlevering is beperkt. De optie bypass-stack en 'forced draft'-ventilator moet voorzien worden tijdens de bouw van de WKK. Achteraf bijbouwen is technisch enkel mogelijk indien er voldoende plaats voorzien is tussen de gasturbine en de HRSG. Gezien de constructie van een afgassenketel is het rendement bij forced-draft werking wel substantieel lager dan dat van een klassieke stoomketel.

### **3.1.2.3 Bijkomende stoomketel**

Een alternatief is dat stoomproductie bij het afschakelen van de gasturbine overgenomen wordt door één of meerder stoomketels. Indien dit op een regelmatige basis gebeurt, zal het rendement van de stoomketel belangrijk zijn. Hiervoor volstaat de typische back-upketel niet omdat hier vaak oudere en minder efficiënte stoomketels voor gebruikt worden. Hierdoor heeft men vaak een bijkomende investering in efficiënte stoomketels nodig. De investeringskost hiervan is sterk afhankelijk van de stoomkarakteristieken. Vlampijpketels voor de productie van lagedrukstoom ( $\leq 10$  bar) zijn beduidend goedkoper dan waterpijpketels die nodig zijn voor hogedrukstoom. Bij ketels op andere brandstoffen (bv. biomassa) is deze kost veel hoger. Om een snelle overgang mogelijk te maken zal de stoomketel op temperatuur gehouden moeten worden. Aan het op temperatuur houden van de stoomketels is eveneens een brandstofkost verbonden.

### **3.1.2.4 Power to heat**

Een volgend alternatief is de productie van warmte (stoom) op basis van elektriciteit; power-to-heat. Op vandaag wordt dit nog enigszins met argusogen bekeken, omdat dit – indien de elektriciteit op basis van fossiele brandstof wordt opgewekt – minder efficiënt is dan de rechtstreekse benutting van die fossiele brandstof voor warmteproductie. Indien er echter momenten komen waarop de totale elektriciteitsvraag kleiner is dan de productie, en bijgevolg een nood tot afschakeling van hernieuwbare productie dreigt, kan het interessant zijn om deze productie toch aan te houden, en op warmteproductie op basis van elektriciteit over te schakelen.

In vergelijking met een conventionele stoomketel is een elektrische stoomketel goedkoper. De additionele investering kan echter maar interessant zijn indien deze jaarlijks voldoende uren (aan een voldoende hoge besparing) ingezet kan worden.



## 3.2 Motoren

### 3.2.1 Flexibiliteit elektrisch

#### 3.2.1.1 Start-stopcyclus

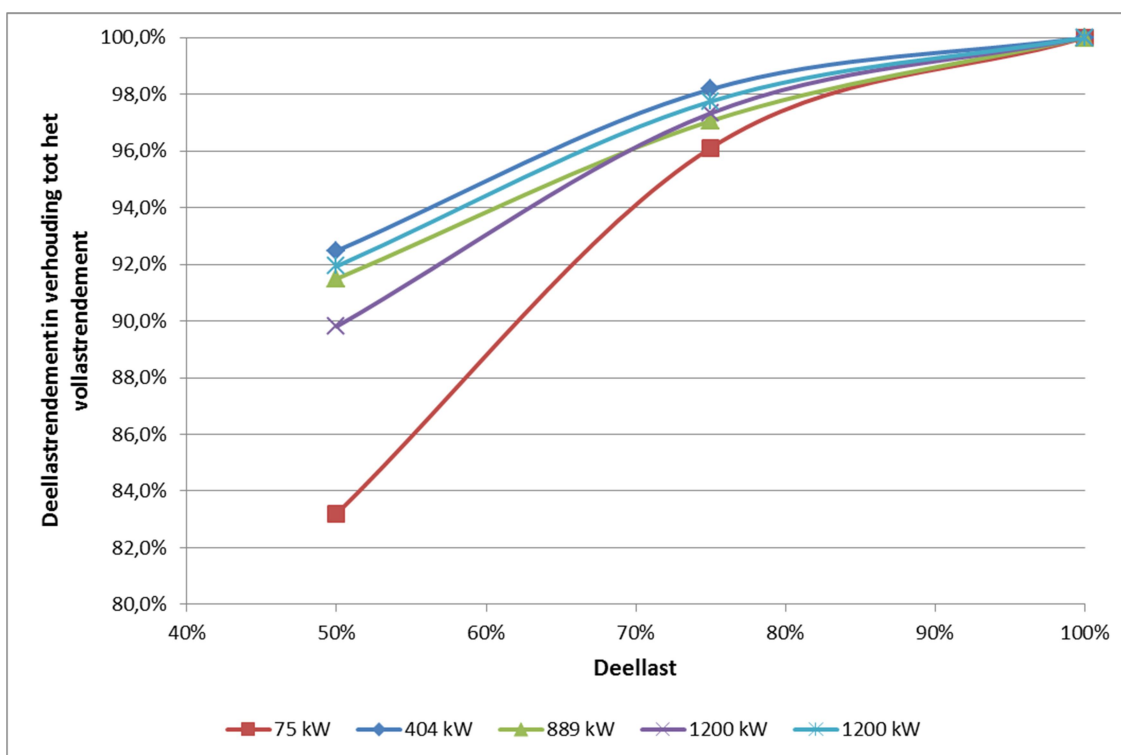
WKK-installaties met inwendige verbrandingsmotoren (IVM) kunnen relatief snel opstarten en stoppen waardoor ze uitermate geschikt zijn om flexibel in te spelen op de fluctuerende elektriciteitsvraag. Na het startsignaal zal de motor typisch binnen de 2 à 3 minuten synchroniseren met het net. Bij weinig stabiele netten waarbij de netbeheerders de grenzen scherp ingesteld hebben kan dit langer duren (5 à 10 minuten). Na synchronisatie heeft de motor slechts één à twee minuten nodig om zijn vermogen tot vollast op te drijven. In principe zal de startsequentie van een gasmotor gemiddeld 5 à 10 minuten duren. Na een stop hebben ze eveneens geen afkoelperiode nodig alvorens terug te kunnen starten. (Klimstra, 2014).

Ten gevolge van de thermische spanningen zal een start-stopcyclus ook een zekere impact hebben op de motor. Bij meervoudige start-stopcyclussen zal (sneller) metaalmoeheid optreden waarbij er problemen optreden zoals lekkende cilinderkoppen, problemen met kleppen of waarbij men de turbolagering sneller dan gewoonlijk vervangen moet worden. In het onderhoudscontract wordt dan meestal ook bepaald dat het aantal start-stopcyclussen beperkt moet blijven tot maximaal 3 à 4 per dag.

Daarbij zal, bij WKK-installaties die minder draaiuren behalen, de prijs van het onderhoudscontract hoger zijn. Omdat het potentieel aantal interventies onafhankelijk is van het aantal draaiuren, moeten de onderhoudsfirma's in het onderhoudscontract de kost per draaiuur verhogen om kostendekkend te zijn. Het minimaal aantal draaiuren is bijgevolg eveneens vastgelegd in het onderhoudscontract.

#### 3.2.1.2 Deellastbedrijf

Een motor-WKK kan tussen 100% en 70% gemoduleerd worden zonder al te veel in efficiëntie in te boeten. Onder de 75% deellast neemt de efficiëntie sterk af. In sommige gevallen wordt de motor-WKK gemoduleerd tussen 100% en 50% om het aantal startstops te beperken. Modulatie van de motor-WKK onder de 50% is vaak niet wenselijk. In Figuur 6 kan men de verhouding van het deellastrendement t.o.v het vollastrendement van verschillende motor-WKK-installaties vinden. De grote installaties bekomen allemaal een deellastrendement van 90% tot 92% van het vollastrendement bij 50% deellast. Dit hangt natuurlijk ook af van het rendement bij vollast. Bij kleinere WKK-installaties (zonder turbo) zakt het rendement nog dieper weg bij deellast.



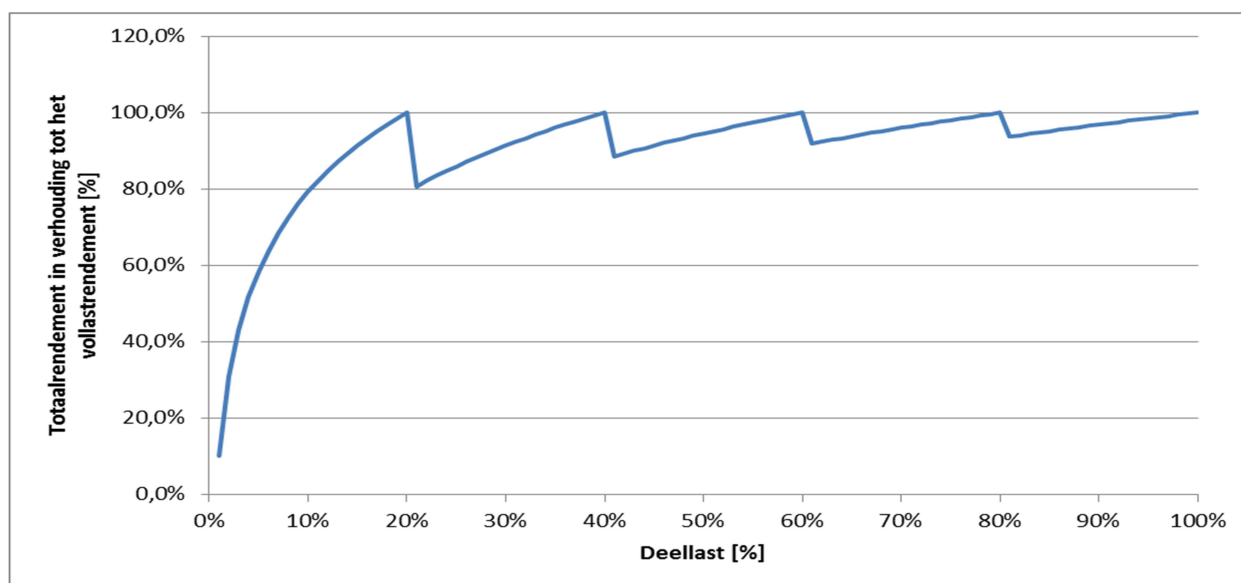
Figuur 7: Deellastrendement motor-WKK t.o.v. het vollastrendement

Bij (diepe) deellastwerking zal de motor meer olie verbruiken door afzetting van olie op de turbo. Bij een langdurige deellastwerking is het aan te raden om regelmatig de motor op vollast te laten draaien om de motor te ‘spoelen’.

Deellastwerking heeft weinig invloed op de onderhoudskost per draaiuur. Doordat de motor echter op deellast werkt zal de onderhoudskost per eenheid geproduceerde elektriciteit groter zijn dan bij vollast.

Modulatie is technisch doorgaans eenvoudig, de sturingsmodules laten modulatie toe op een analogo ingangssignaal.

Vanuit systeemniveau bieden stationaire motoren qua efficiëntie bij deellast een belangrijk voordeel tegenover turbine technologieën. Omdat de gemiddelde motor qua vermogen kleiner is dan de gemiddelde turbine heeft men meerdere motoren nodig om dezelfde hoeveelheid elektriciteit te produceren. Globaal gezien zullen motoren minder problemen hebben met een verlaagde efficiëntie bij deellastwerking omdat men telkens één of meerdere motoren kan uitschakelen. Hierdoor kunnen de overige motoren dichter tegen hun optimale werkingspunt produceren en kan het elektrisch rendement relatief constant gehouden worden. In Figuur 8 ziet men een voorbeeld met 5 motoren waarbij het deellastrendement relatief tegenover het vollastrendement wordt weergegeven.



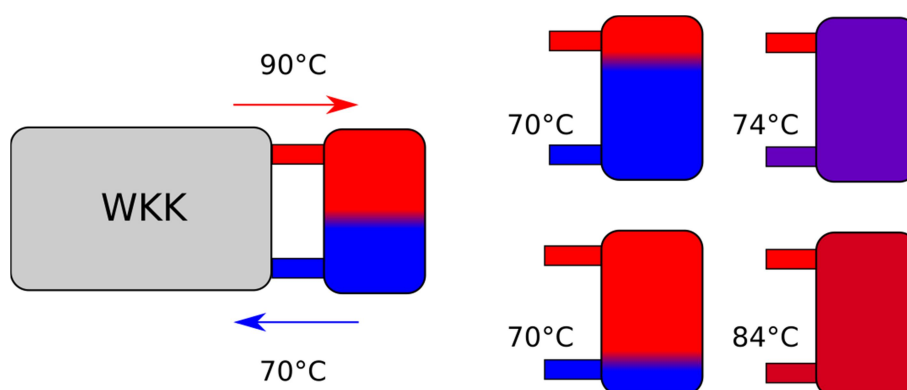
Figuur 8: De verhouding van het deellastrendement tot de vollastrendement van 5 motoren bij deellast

### 3.2.2 Flexibiliteit thermisch

#### 3.2.2.1 Warmwaterbuffering

Warmtetoepassingen die met warm water gevoed kunnen worden bieden als voordeel dat warm water eenvoudiger gebufferd kan worden. Warmwaterbuffers zijn relatief goedkoop en bieden heel wat bijkomende voordelen. Eén van deze voordelen is dat bij het afschakelen van de WKK-installatie er minder nood is om over te schakelen naar andere (energetisch minder efficiënte) warmteproductietechnieken, omdat de warmte nog eventueel kan geleverd worden uit de warmtebuffer. Een ander voordeel is dat er geen nood is om de WKK-installatie te moduleren in functie van de warmtevraag, vermits de overtollige warmte opgeslagen kan worden. Indien de WKK-installatie nominaal draait is zijn elektrische efficiëntie maximaal en zal de onderhoudskost per geproduceerde eenheid elektriciteit minimaal zijn. Bij het gebruik van een buffer zijn er wel bijkomende (thermische) bufferverliezen.

Bij WKK-installaties met inwendige verbrandingsmotoren wordt een deel van de warmte gerecupereerd uit het koelwater van de motor. Indien de retourtemperatuur te hoog is (> 70 à 80°C, afhankelijk van motortype) kan de motor niet meer gekoeld worden en zal de motor door de motorbeveiliging uitgeschakeld worden. Het is dus van belang dat ten allen tijde een voldoende lage retourtemperatuur naar de WKK verzorgd wordt. Om ervoor te zorgen dat de temperatuur voldoende laag is, is het aangewezen dat er een goede stratificatie of gelaagdheid in de buffer bestaat: een scheiding tussen warmere zone(s) bovenin de buffer, en een koudere zone onderin de buffer. Een goede stratificatie zorgt ervoor dat de buffercapaciteit ten volle benut kan worden: zelfs wanneer de buffer grotendeels gevuld is blijft water onder de maximale aanvoertemperatuur beschikbaar, zoals weergegeven in Figuur 9.

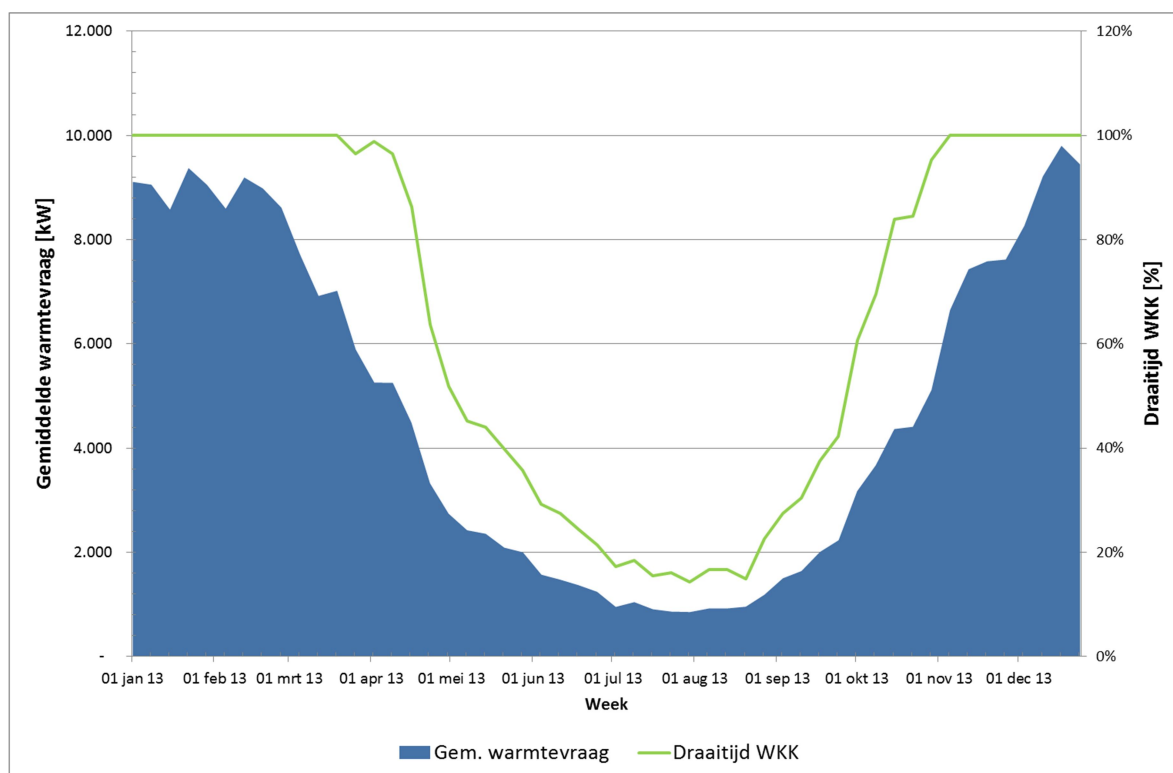


**Figuur 9: vergelijking van een gelaagde buffer links met een niet-gelaagde buffer rechts. Bij een gelaagde buffer blijft de aanvoertemperatuur richting de WKK op 70°C; indien de buffer gemengd is stijgt de temperatuur al snel boven de maximale aanvoertemperatuur van bijvoorbeeld 75°C. De situatie rechtsonder kan met een WKK niet gerealiseerd worden (de aanvoertemperatuur is te hoog), en de buffercapaciteit wordt bijgevolg niet ten volle benut.**

De meeste WKK-installaties met warmwaterproductie zijn geïnstalleerd in verwarmingstoepassingen waarbij de omgevingstemperatuur een grote invloed heeft op het warmtevraagprofiel. Indien deze WKK-installaties voldoende groot zijn gedimensioneerd zullen ze slechts gedurende een beperkte periode in het jaar voltijds moeten draaien, zoals men kan zien in Figuur 10. Gedurende de perioden met een lage warmtevraag hoeft de WKK maar enkele uren per dag te draaien om voldoende warmte te produceren voor de hele dag. De overtollige warmte wordt gebufferd en kan later afgegeven worden. De buffer zorgt met andere woorden voor een ontkoppeling van de elektriciteitsproductie en de warmteproductie. Deze ontkoppeling geeft WKK-eigenaars de flexibiliteit om te produceren tijdens de tijdstippen met een hoge elektriciteitsvraag.

In tegenstelling tot de industrieën waar men veelal een baseload warmtevraag kent, zorgt het afschakelen van de WKK-installatie in deze gevallen niet voor een verlies van inkomsten door elektriciteitsproductie of warmte-krachtcertificaten, gezien de totale elektriciteits- en warmteproductie dezelfde blijft, maar enkel verschoven wordt in de tijd.

In de nota die COGEN Vlaanderen in 2014 uitwerkte rond de rol van WKK in het kader van warmtenetten (COGEN Vlaanderen, 2014), werd duidelijk aangetoond dat in principe een belangrijke meerwaarde vervat zit in een intelligente sturing van de WKK-installatie op basis van de buffercapaciteit, de verwachte warmtevraag en de day-ahead prijzen. Anderzijds bleek ook dat er een aantal hinderpalen een flexibele uitbating in de weg staan. Hierop wordt teruggekomen in hoofdstuk 7.1.



Figuur 10: Draaitijd WKK in functie van de warmtevraag

### 3.2.2.2 Inherente thermische inertie van de warmtetoepassing

Bepaalde warmtetoepassingen hebben inherent een hoge thermische inertie. WKK-installaties in dergelijke toepassingen kunnen elektrische flexibiliteit leveren indien de toepassing het toelaat om de temperatuur te laten variëren binnen een zeker bereik zonder nadelige effecten op het proces. Voorbeelden van dergelijke toepassingen zijn o.a. het op temperatuur houden van bepaalde opslagtanks in de industrie, verwarming van zwembaden en vloerverwarming in gebouwen.

### 3.2.2.3 Backup-ketel

Een backup-ketel die het volledige vermogen van de warmtevraag kan dekken is hoe dan ook noodzakelijk indien de WKK-installatie in onderhoud of panne is. De ketel kan ook gebruikt worden tijdens perioden met een hoge warmtevraag en een lage elektriciteitsvraag. De kans hiervoor is het grootst tijdens koude voorjaar- of herfst dagen met veel zon en/of wind.

## 4 Systeembenadering van flexibele inzet WKK

### 4.1 Opzet berekeningen

Naar aanleiding van het stakeholderoverleg rond het 'Vlaams Actieplan hernieuwbare energie 2020', stelde VITO op 19 juni 2014 een scenariostudie voor met verschillende scenario's met een verhoogd aandeel hernieuwbare energie in 2030 (en bij uitbreiding in 2050): "Potentieel studie hernieuwbare energie 2030 in Vlaanderen" (VITO, 2014). Hiertoe werden met het Belgisch TIMES-model de verschillende scenario's doorgerekend, waarbij voor 2030 en 2050 vaste percentages aan hernieuwbare energie werden opgelegd (20 tot 30% voor 2030; 60 tot 85% voor 2050).

De tijdsresolutie van het TIMES-model is echter onvoldoende precies om de impact op de netuitbating tot uiting te brengen. Daarom heeft COGEN Vlaanderen in 2015 een studie gepubliceerd waarbij deze scenario's doorgerekend zijn op basis van actuele kwartuurgegevens van de elektriciteitsvraag en -aanbod. De berekeningen in dit document zullen van dezelfde data gebruik maken.

De geïnstalleerde capaciteit qua hernieuwbare energie van de verschillende scenario's kan men vinden in Tabel 2. Hierbij zijn de '2025'-scenarios een lineaire interpolatie tussen het huidige en de '2030'-scenarios. Voorts veronderstellen we dat de piekvraag in lijn ligt met het huidig elektriciteitsverbruik (13,4 GW). De residuele elektriciteitsvraag geeft het deel van de elektriciteitsvraag weer dat niet ingevuld kan worden door hernieuwbare energiebronnen en bijgevolg ingevuld moet worden door klassieke productie, buffering of demand site management. De residuele elektriciteitsvraag voor het referentie- en 'hoog HE'-scenario kan men vinden in Figuur 11. In het referentiescenario zal de residuele elektriciteitsvraag gedurende enkele kwarturen dalen onder de 1 GW met een minimale elektriciteitsvraag van 470 MW. In het scenario met een hoog aandeel energie uit hernieuwbare bronnen zal de elektriciteitsproductie gedurende meer 1000 uur per jaar groter zijn dan de ongewijzigde<sup>5</sup> elektriciteitsvraag, zoals men kan zien in Figuur 12. Dit betekent met andere woorden een negatieve residuele elektriciteitsvraag.

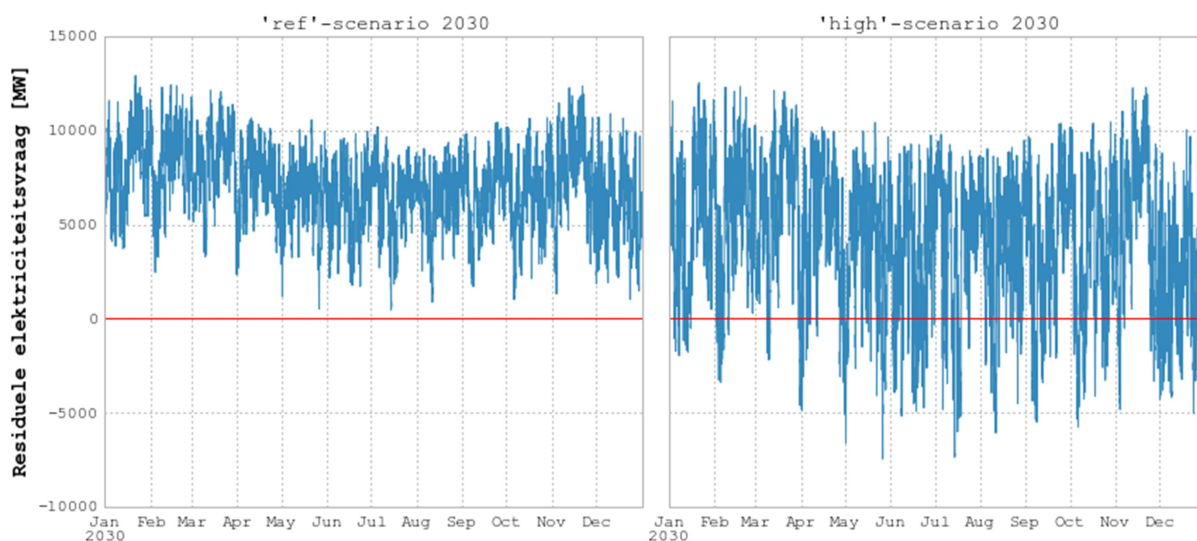
Tabel 2: Geïnstalleerde capaciteit intermitente hernieuwbare energie

Vermogen [MW]	PV	Wind op land	Wind op zee
Huidig	2.953	1.122	712
Ref HE-scenario 2025	3.644	3.464	1.562
Ref HE-scenario 2030	4.000	4.670	2.000
High HE-scenario 2025	5.341	3.882	5.522
High HE-scenario 2030 (30% HE)	6.571	5.304	8.000

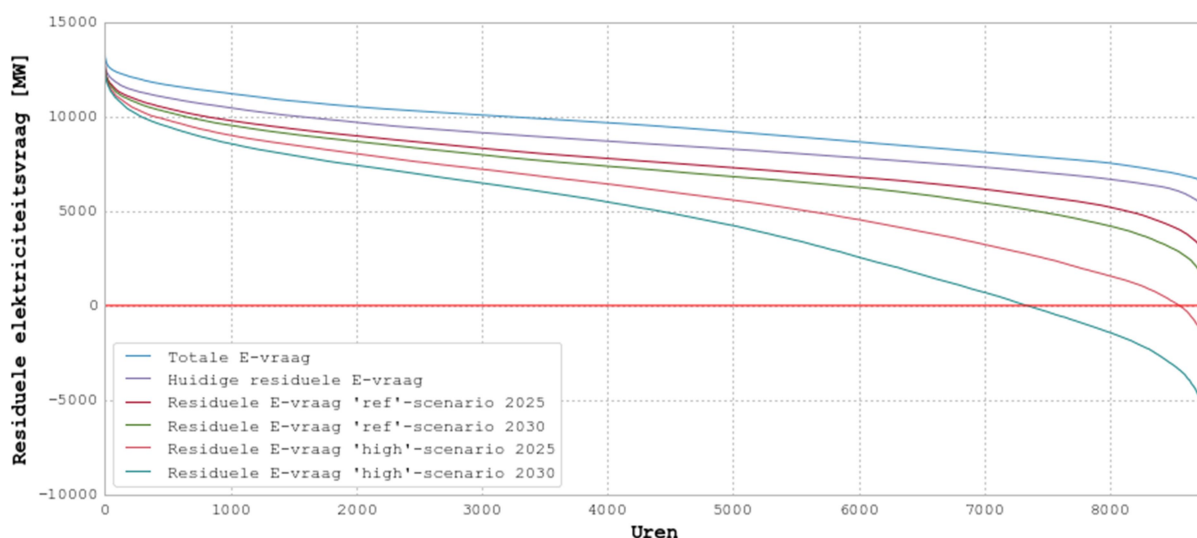
<sup>5</sup> Opslag en DSM kunnen dit evenwicht uiteraard ook nog beïnvloeden

In het referentie- en 'hoog HE'-scenario moet nog respectievelijk 75% en 49% van de elektriciteitsvraag door brandstoffen opgewekt worden. Daarbij is de impact van hernieuwbare energieproductie op de residuele piekvraag slechts beperkt. Zoals men kan zien in Figuur 12, daalt deze in het referentie- en 'hoog HE'-scenario slechts met respectievelijk 3,8% en 6,6%.

Sowieso dient, wanneer beroep gedaan wordt op brandstoffen om de elektriciteitsvraag te dekken, maximaal ingezet te worden op duurzaamheid en efficiëntie. In deze zin blijft WKK in al deze scenario's sowieso relevant. Een belangrijkere vraag is echter vanaf wanneer flexibele WKK-toepassingen haalbaar en wenselijk zijn. Hierop gaan we in in punt 4.2.



Figuur 11: Residuele elektriciteitsvraag voor het referentie- en high-scenario's



Figuur 12: Monotoon van de residuele elektriciteitsvraag

## 4.2 De plaats van baseload-WKK in het energiesysteem

WKK is een duurzame en efficiënte manier om elektriciteit en warmte te genereren. Op vandaag draaien bijna alle WKK-technologieën op stockeerbare brandstof<sup>6</sup> – al dan niet fossiel. Naast het feit dat de inzet van fossiele bronnen gepaard gaat met CO<sub>2</sub>-emissies, gaat de inzet van brandstoffen algemeen gepaard met een opportuiniteitskost: de verbrande brandstoffen zijn niet meer beschikbaar voor later gebruik. Dit geldt ook voor groene brandstoffen. Intermittente bronnen zoals wind en PV hebben deze nadelen niet: er is geen emissie, en zij kennen ook geen opportuiniteitskost (het benutten van wind of zon op moment Z heeft geen invloed op de beschikbaarheid van wind of zon op moment Y).

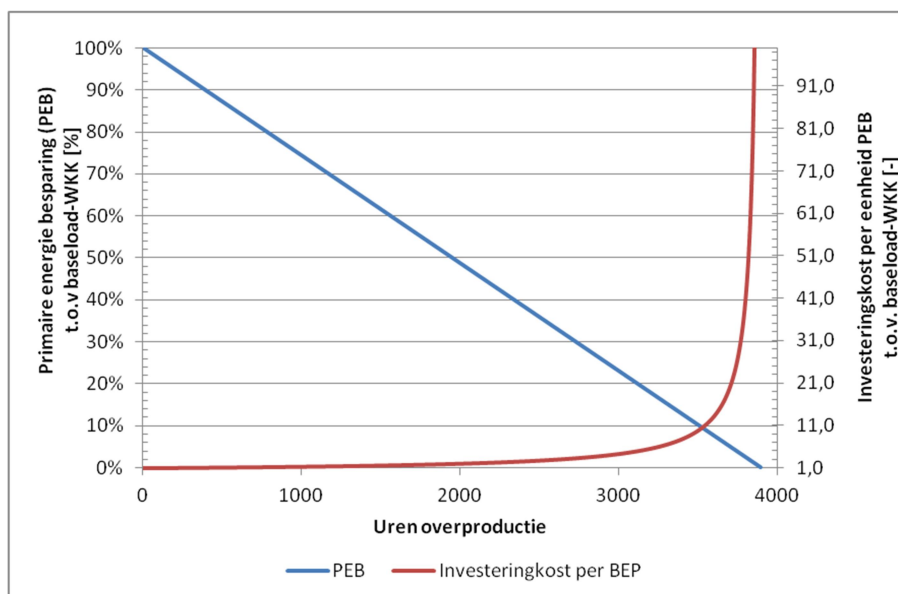
Op het moment dat de volledige elektriciteitsvraag gedekt kan worden door deze brandstofloze hernieuwbare bronnen levert een WKK-installatie bijgevolg geen primaire-energiebesparing. Integendeel: door toch te draaien op zulke momenten wordt primaire energie vernietigd. Algemeen is dus het standpunt – uiteraard ook van COGEN Vlaanderen – dat WKK-installaties niet moeten draaien op momenten waarop er voldoende elektriciteit wordt geproduceerd door zuiver hernieuwbare, brandstofloze bronnen.

Zoals hieronder zal blijken, dient hierop wel enige nuance aangebracht te worden wanneer we op systeemniveau kijken. Als *gedachte-oefening* veronderstellen we een baseload-WKK die continu draait, maar niet kan moduleren of stoppen. Deze levert dan op vandaag gedurende 8760 uren op jaarbasis primaire-energiebesparing. In een toekomstscenario met grotere aandelen wind en zon, zullen er momenten zijn waarop er voldoende zuiver hernieuwbare elektriciteit is om de vraag te dekken. Indien de WKK-installatie dan verder draait, wordt op dat moment primaire energie vernietigd in plaats van bespaard. Zolang het aantal uren waarop de vraag volledig gedekt is beperkt blijft, is de primaire-energiebesparing die de installatie netto produceert op jaarbasis echter positief, zelfs wanneer de installatie blijft doordraaien op die momenten. Indien men dus enkel kan kiezen tussen een zuivere baseload-WKK of geen WKK, blijft het energetisch gezien interessant om voor de installatie te kiezen bij een beperkt aantal uren overproductie. Dit wordt weergegeven door de blauwe curve in Figuur 13: de netto primaire-energiebesparing neemt af naarmate er meer uren zijn waarop er reeds voldoende hernieuwbare elektriciteit voorhanden is. Dit betekent ook dat, naarmate er meer uren zijn waarop er voldoende productie zou zijn, de vaste kost (investeringskost) per gerealiseerde eenheid primaire-energiebesparing toeneemt: de vaste kost van de installatie blijft dezelfde, en indien ze minder besparing realiseert is de kost per eenheid besparing hoger.

---

<sup>6</sup> Er bestaan bijvoorbeeld WKK-installaties op basis van zonlicht, maar deze toepassingen zijn momenteel nog erg beperkt.





Figuur 13: De netto primaire-energiebesparing in functie van het aantal uren waarop er reeds voldoende elektriciteit wordt geproduceerd, en de relatieve investeringskost per eenheid primaire-energiebesparing.

Uiteraard is dit scenario wel al te eenvoudig: enerzijds is het voor het systeem niet mogelijk om te opereren wanneer zowel de intermitterende bronnen als de WKK's blijven produceren, en anderzijds is het in principe altijd mogelijk om een WKK-installatie zo te concipiëren dat zij wel degelijk kan stilgelegd worden op momenten van overproductie. Hier staat echter een zekere kost tegenover (meerkost flexibele installatie t.o.v. een baseload-installatie, zie punt paragraaf 6.1.2).

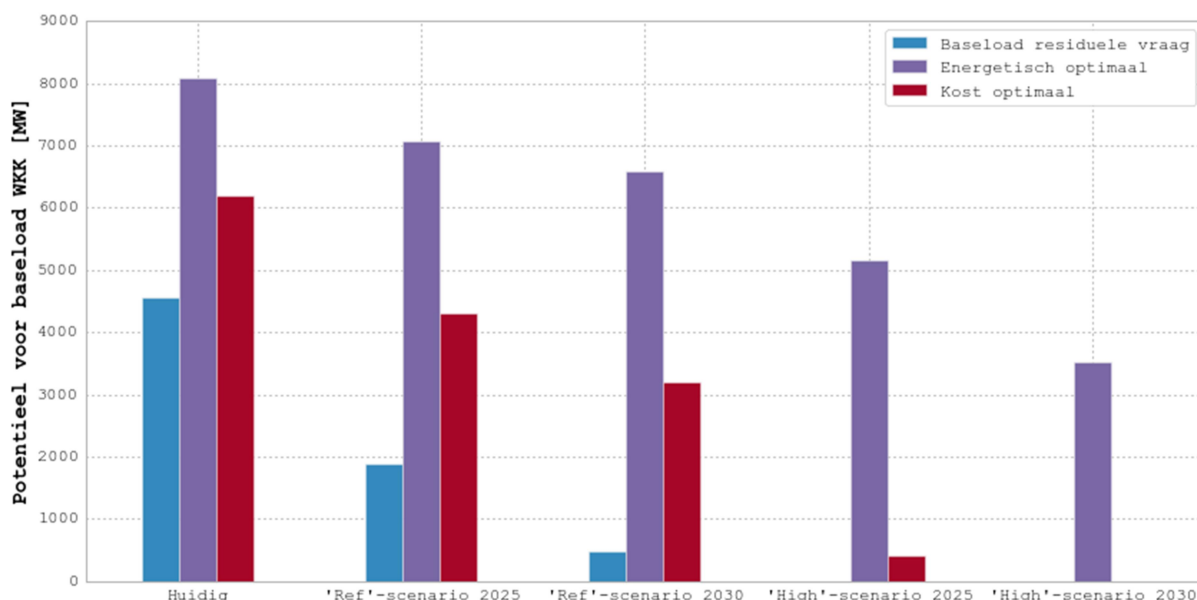
Indien we er dus van uitgaan dat de WKK's nuttig zijn voor het systeem en aanwezig blijven, we het systeem in evenwicht willen houden én de totale hoeveelheid groenestroomproductie gelijk willen houden zijn er twee mogelijkheden:

- we betalen de meerkost voor de flexibilisering van de WKK-installaties, en leggen deze stil op de momenten dat er voldoende intermitterende productie is; of
- we curtailen op de piekmomenten met overproductie de intermitterende productie én investeren in bijkomende intermitterende productiecapaciteit om de verloren productie te compenseren<sup>7</sup>.

Beide scenario's laten toe dat de PE-besparing die WKK kan realiseren benut wordt, en dat de totale hoeveelheid groenestroomproductie gelijk blijft. Beide scenario's gaan echter gepaard met een zekere kost: voor het eerste scenario de kost van het flexibiliseren van de WKK-installaties, voor het tweede scenario de kost van het installeren van bijkomende intermitterende productie. Indien beide kosten met elkaar vergeleken worden, blijkt de kost van scenario twee lager dan deze van scenario één wanneer het aantal uren van overproductie op jaarbasis beperkt is.

<sup>7</sup> Dit lijkt contra-intuïtief: overproductie verhelpen door meer capaciteit te installeren. Door het specifieke productieprofiel van intermitterende bronnen is het economisch gezien – en zeker op systeemniveau – echter interessant om een groter park met een beperkter piekvermogen te plaatsen, wat overeenkomt met het verhogen van de vollasturen van de intermitterende productie-installaties.

We concretiseren bovenstaande graag op basis van concretere cijfers uit de hogervermelde VITO-studie en de daarin vermelde scenario's. In het referentiescenario is er strikt gezien slechts ruimte voor 470 MW baseloadcapaciteit en puur theoretisch zou deze baseloadruimte opgevuld kunnen worden met 470 MWe baseload-WKK-capaciteit. Voor het 'ref-scenario' in 2030, weergegeven in Figuur 12, zakt de residuele elektriciteitsvraag slechts gedurende een 60-tal uren onder de 2000 MWe. Indien men de elektriciteitsproductie door intermitterende HE-productie-installaties zou aftoppen tijdens deze 60 uren zou men voor 2000 MWe aan baseload-WKK kunnen plaatsen. Men verliest hierbij 29 GWh aan groene stroom, die overeenkomt met 58 GWh primaire-energiebesparing. De 1530 MWe bijkomende baseload-WKK zou echter een netto<sup>8</sup> primaire-energiebesparing realiseren van ongeveer 7200 GWh. Hieruit kan men concluderen dat het energetisch gezien zinvol kan zijn om een beperkte hoeveel hernieuwbare energie af te toppen ten gunste van baseload-WKK-capaciteit. Het optimum in functie van verschillende scenario's kan men vinden in Figuur 14. In het 2030-referentiescenario zou die overeenkomen met ruimte voor ongeveer 6 GWe baseload-WKK-capaciteit. Dit is beduidend hoger dan de werkelijke baseloadruimte van 470 MW.



Figuur 14: Baseload-WKK voor verschillende scenario's

Zoals hierboven aangehaald, kan men echter ook een optimum bepalen qua investeringskosten. In bovenstaand voorbeeld zou het flexibel maken van 1530 MWe bestaande baseload-WKK-capaciteit een investeringskost vragen van 306 M€. Alternatief kan men door het installeren van 14 MW bijkomende capaciteit aan windturbines 29 GWh afgetopte hernieuwbare energie compenseren, wat slechts een investeringskost van 19 M€ zou vragen. Ook vanuit het perspectief van investeringskosten kan men beschouwen dat het aftoppen van een beperkte hoeveelheid energie ten gunste van baseload-WKK-capaciteit zinvol kan zijn. Het optimum in functie van de HE-scenario kan men eveneens vinden in Figuur 14.

<sup>8</sup> Dus inclusief de vernietiging van primaire energie tijdens momenten van curtailment

Hieruit blijkt duidelijk dat hier een afweging gemaakt moet worden, en dat deze voornamelijk in de groeifase naar hogere aandelen hernieuwbare productie gemaakt moet worden. Wanneer erg hoge aandelen aan hernieuwbare bronnen gehaald worden kan het interessanter worden om algemener te investeren in flexibiliteit. Ook dan dient echter weer een gelijkaardige afweging gemaakt te worden voor de allerhoogste productiepieken die slechts een beperkt aantal malen per jaar bereikt worden. Voor een verdere analyse van de inpassing van piekproductie van intermitterende bronnen, en de impact op flexibele WKK, verwijzen we graag naar het Addendum.

## 5 WKK-park in Vlaanderen: ervaringen met flexibiliteit

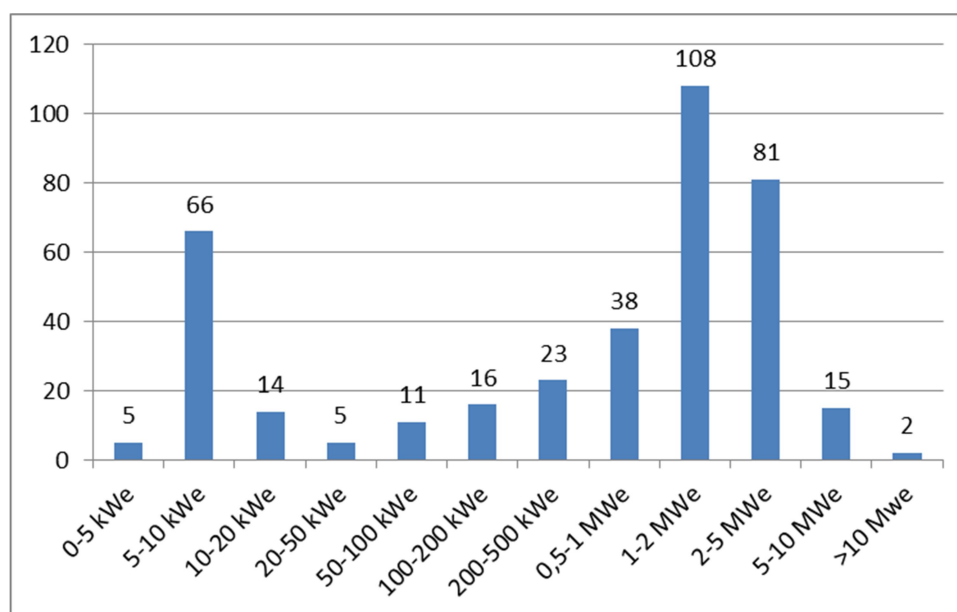
### 5.1 Opgesteld vermogen

In 2014 was het operationeel WKK-vermogen (elektrisch+mechanisch) in Vlaanderen 2.223 MW. Het operationeel thermisch vermogen was 3.799 MW<sub>th</sub>. Er waren 580 WKK-installaties operationeel, verdeeld over 467 (bedrijf)sites (VITO, 2014). Een overzicht in functie van de gebruikte technologieën kan men vinden in Tabel 3.

Tabel 3: Overzicht van het operationeel WKK-vermogen in Vlaanderen per technologie in 2014 (VITO, 2014)

Operationeel vermogen 2014	Elektrisch/mechanisch vermogen [MW <sub>e</sub> ]	Thermisch vermogen [MW <sub>th</sub> ]	Aantal installaties	Aantal WKK-toepassingen
Motoren ≤ 50 kW <sub>e</sub>	1,0	2,6	94	94
Motoren > 50 kW <sub>e</sub>	560	691	416	316
Gasturbines	493	735	17	17
STEGs	805	583	13	6
Stoomturbines; netgekoppeld	213	850	23	18
Stoomturbines; directe aandrijving	152	937	17	16
<b>Som</b>	<b>2.223</b>	<b>3.799</b>	<b>580</b>	<b>467</b>

Het merendeel (88%) van de WKK-installaties die opgesteld staan in Vlaanderen zijn inwendige verbrandingsmotoren. Het totaal geïnstalleerd elektrisch vermogen hiervan is 560 MW. Een opdeling van de motoren-WKK-installaties volgens vermogen kan men vinden in Figuur 15 (VREG, 2015).



Figuur 15: Overzicht aantal IWW-WKK's per vermogenklasse

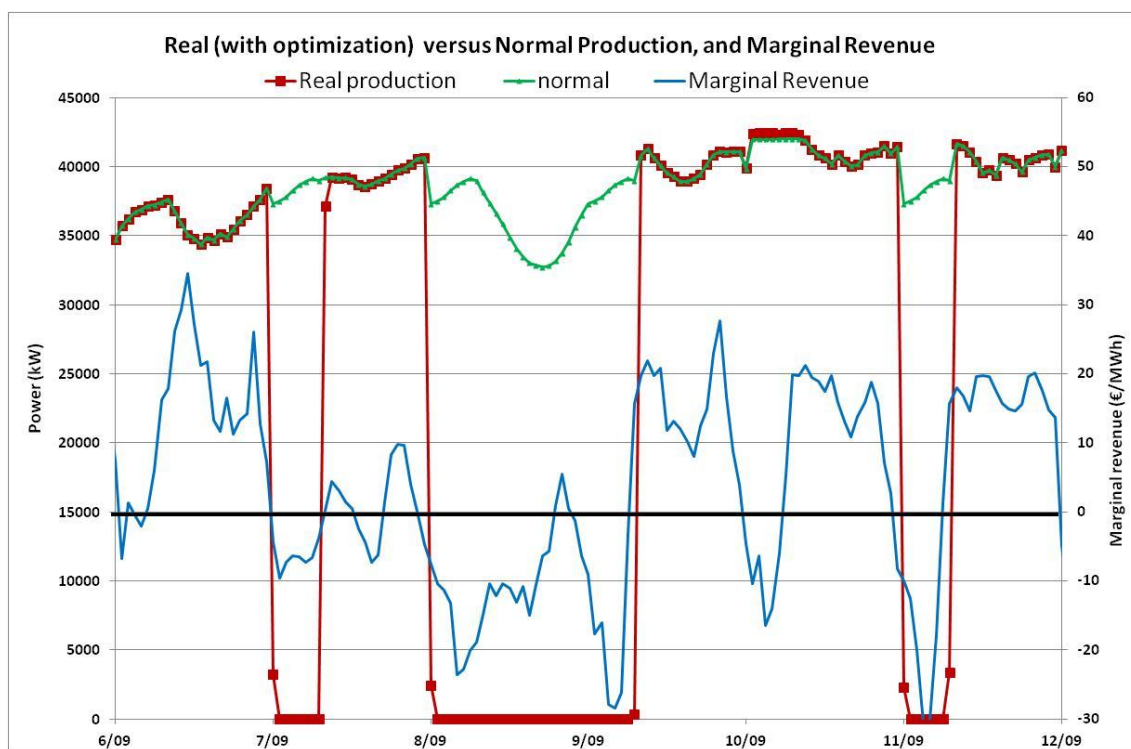
## 5.2 Ervaringen met flexibiliteit

### 5.2.1 Gasturbines

Vanaf 2013 is men in Vlaanderen beginnen experimenten met het flexibel inzetten van industriële WKK-installaties met gasturbines, als gevolg van de lage elektriciteitsprijzen op de groothandelsmarkt. Hierdoor zagen WKK-eigenaars hun inkomsten immers dalen. Tijdens perioden met lage elektriciteitsprijzen liet men de WKK-installatie stoppen of in deellast draaien om het verlies te beperken. Dit was voornamelijk het geval voor WKK-installaties die geen of weinig warmtekrachtcertificaten ontvingen.

Gasturbine-WKK-installaties, die bereid zijn om flexibel te draaien, kunnen, in functie van de geplande warmtebehoefte en de beschikbare stoomcapaciteit, deze flexibiliteit aanbieden aan de Belpex Day Ahead Market (DAM). De DAM-prijs zal dan bepalen welke uren de WKK al dan niet moet draaien. De DAM heeft als voordeel dat een start en stop van een WKK-installatie ruim op voorhand kunnen gepland worden. Andere markten waarbij flexibiliteit gewaardeerd kan worden, zoals de *continuous intraday market* (CIM) en *balancing market*, worden om die reden minder gebruikt.

De afgassenketels van het merendeel van de GT-WKK-installaties in Vlaanderen zijn niet uitgerust om in koudeluchtbedrijf te werken. Dit houdt in dat de mogelijkheden om de stroomproductie te blijven garanderen bij deellast of afschakelen van de gasturbine beperkt zijn tot het opdrijven van de bijstook in de afgassenketel of stoomproductie door ketels. Deze afweging verschilt van site tot site en zal ook afhangen van de voorspelde stoomvraag en beschikbare stoomproductie.

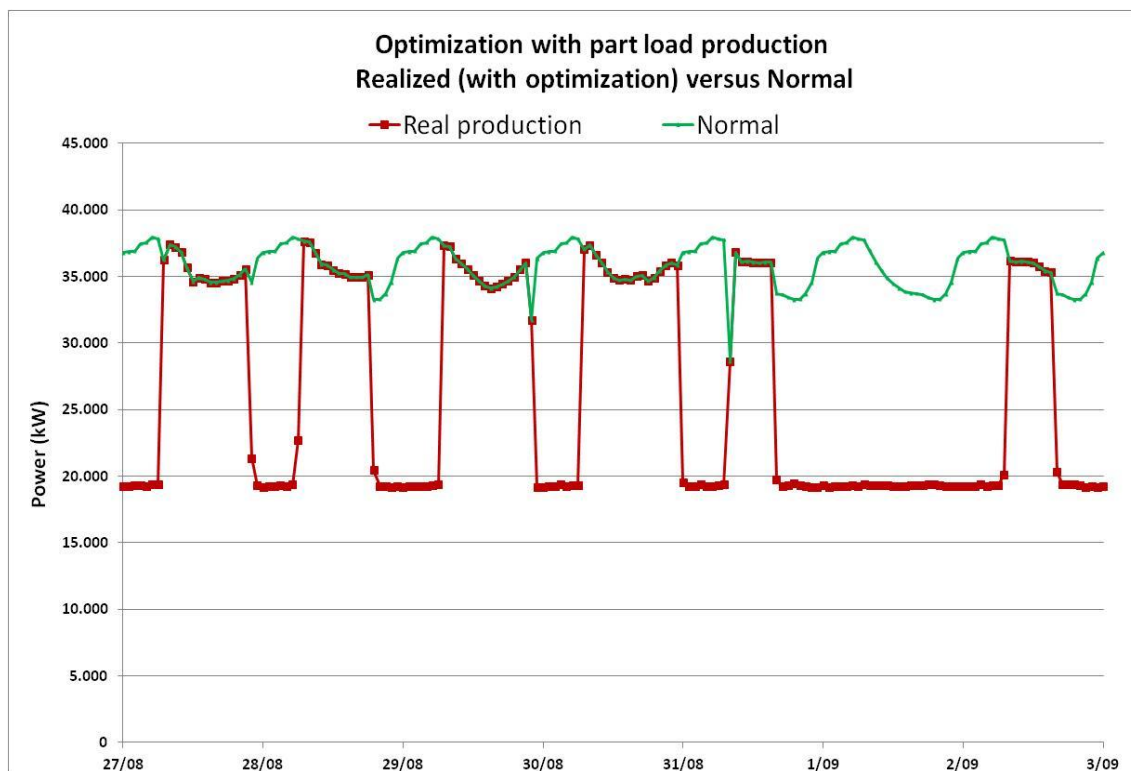


Figuur 16: Afschakelen van een gasturbine-WKK in functie van de elektriciteitsprijzen (Electrabel, 2013)

Indien de beschikbare alternatieve stoomproductie op de site voldoende is om de voorspelde stoomvraag te dekken, zal men er meestal voor opteren om de GT-WKK te stoppen om over te

schakelen op de stoomketels. Starten of stoppen van de WKK is enkel zinvol indien de elektriciteitsprijs gedurende meerdere uren respectievelijk hoog of laag blijft. Hierbij moet men eveneens rekening houden met de kosten qua brandstof en onderhoud die gepaard gaan met het starten van een GT-WKK. Om technische en financiële redenen beperkt men het aantal start-stopcyclussen tot één per dag. Als de WKK stilstaat wordt de elektriciteit van het net aangekocht en zullen efficiënte stoomketels de stoomproductie overnemen. Een voorbeeld van een flexibele uitbating van een GT-WKK door middel van start-stopcyclussen wordt weergegeven in Figuur 16. De keuze om de WKK-installatie te starten of te stoppen wordt gemaakt op de marginale opbrengst van de WKK-installatie in vergelijking met aankoop van elektriciteit op het net en stoomproductie door ketels.

Sommige bedrijfsites beschikken niet over voldoende efficiënte stoomproductiecapaciteit. Meestal worden investeringen in nieuwe stoomketels pas gedaan indien de huidige capaciteit niet meer voldoende is om te voldoen aan de voorspelde stoomvraag. De WKK-installaties worden dan meestal gebackupt door oudere minder efficiënte ketels. In dat geval kan men ervoor kiezen om de gasturbine-WKK in deellast te laten werken. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Figuur 17.



Figuur 17: Deellastwerking van een gasturbine-WKK in functie van de elektriciteitsprijs (Electrabel, 2013)

Elektriciteitsproductie van WKK-installaties zonder stoomvraag bij acute stroomtekorten is vaak niet aan de orde vermits dergelijke meestal op een industriële site geïnstalleerd staan met een vrij constante warmtevraag waardoor de kans groot is dat ze toch moeten draaien vanwege de warmtevraag.

Hoewel deze installaties aantonen dat er technisch gezien mogelijkheden zijn om WKK's op basis van gasturbines flexibel uit te baten is, is deze uitbating op vandaag, amper of helemaal niet rendabel

voor bestaande WKK's, laat staan voldoende interessant om investeringen in nieuwe installaties of vervangingen te verantwoorden.

### 5.2.2 Stoomturbines

Moduleren van een stoomturbine is mogelijk maar vanwege de context waarin deze stoomturbines zijn opgesteld wordt dit niet gedaan in functie van de elektriciteitsprijs. Bijvoorbeeld in het geval dat een stoomturbine opgesteld is in een STEG-WKK heeft de stoomturbine een equivalent rendement van bijna 100%, waardoor het interessanter is om de gasturbine naar beneden te regelen in plaats van de stoomturbine. Bij een stoomturbine-WKK gekoppeld aan een afvalverbrandingsinstallatie is moduleren in functie van de elektriciteitsprijs onmogelijk omdat men de toevoer van inputstoffen niet voldoende kan bufferen.

### 5.2.3 Motoren

Een groot deel van het vermogen van de WKK-motoren is geplaatst binnen de glastuinbouwsector. Het merendeel van deze installaties wordt reeds flexibel ingezet in functie van de elektriciteitsmarkten (Belpex Day Ahead, Belpex Intraday en onbalans).

Het succes van de ontwikkeling van de flexibele WKK in de glastuinbouwsector valt te verklaren door verschillende factoren. Ten eerste is het een sector met een hoge warmtevraag waardoor er WKK-eenheden met een voldoende groot vermogen geplaatst werden. De relatieve kost om een WKK-installatie flexibel te maken (buffer en sturingen), daalt in functie van het vermogen van de WKK-installatie. Daarnaast zijn de tuinders die de WKK willen gebruiken voor CO<sub>2</sub>-bemesting praktisch genooddaakt om een thermische buffer te installeren vermits de warmtevraag gedurende de nacht het grootst is en de CO<sub>2</sub>-bemesting voornamelijk zinvol is gedurende de dag, wanneer de planten groeien. De WKK zal bijgevolg voornamelijk draaien tijdens de dag, wanneer de elektriciteitsprijs typisch het hoogst is. M.a.w. de investeringen die nodig zijn om de CO<sub>2</sub>-productie los te koppelen van de warmteproductie kan ook gebruikt worden om de WKK flexibel te laten draaien in functie van de elektriciteitsprijs.

In het verlengde hiervan geldt als voordeel dat de glastuinbouwsector slechts laagwaardige warmte nodig heeft. Indien de tuinder voldoende heeft geïnvesteerd in isolerende schermen, kan de aanvoertemperatuur van de verwarmingsbuizen zakken tot 52,5°C, met een retourtemperatuur van 45°C. Het grote temperatuurverschil tussen de retourtemperatuur van het verwarmingsnet en de aanvoer van de WKK-installatie (90-95°C) zorgt ervoor dat de thermische opslagdensiteit vergroot of de investeringskost bij gelijke opslagcapaciteit daalt.

Daarnaast kan men bij een (flexibele) WKK installatie in de glastuinbouw spreken over een relatief gemakkelijk reproduceerbaar concept. Dit volgt uit het feit dat er enerzijds voldoende glastuinbouwbedrijven zijn in Vlaanderen en anderzijds dat de randvoorwaarden voor de installatie en de uitbating van de flexibele WKK-installaties vrij gelijkaardig zijn.

Het buffervolume is vaak zodanig gedimensioneerd dat de warmte die de WKK produceert gedurende 12 à 24 uur opgeslagen kan worden. Afhankelijk van de grootte van de WKK-installatie komt dit overeen met een buffervolume van 1000 à 2000 m<sup>3</sup>. Hoe groter het vermogen van de WKK is ten opzichte van de warmtevraag, des te interessanter het is om een grote(re) buffer te plaatsen.

In de glastuinbouw is plaatsgebrek meestal geen beperkende factor. In Figuur 18 kan men een voorbeeld zien van een thermische buffer in de glastuinbouw.



Figuur 18: Thermische buffer in de glastuinbouw

De voorgaande redenen zorgen ervoor dat de glastuinbouwsector een interessante sector is bv. om flexibiliteit te gaan benutten. Als gevolg hiervan hebben verschillende energieleveranciers (bv. Edf Luminus, Eni) en aggregatoren (bv. Powerhouse) zich op deze sector gericht om dit potentieel aan te boren. De WKK-gebruikers krijgen hiervoor toegang tot een tradingsplatform waarbij ze hun gas en elektriciteit respectievelijk aankopen en verkopen. In principe kunnen ze zelfs eerder verkochte elektriciteit terug aankopen, indien de elektriciteitsprijzen hiervoor gunstig zijn.

Om op een degelijke manier in te kunnen spelen op de energieprijzen dienen de WKK-installaties best te beschikken over de nodige sturingen, waarbij de WKK-eigenaar de keuze heeft om zijn WKK-installatie al dan niet automatisch te laten draaien in functie van externe (markt)signalen. Afhankelijk van de sturingsmodule kan dit een aan/uit-sturing zijn of vermogenmodulatie. Bij de geavanceerdere sturingssystemen wordt de WKK-eigenaar van activatie op de hoogte gebracht door een SMS.

Naast de glastuinbouw zijn er ook verscheidene WKK-installaties opgesteld in de gebouwensector, dewelke ingezet worden voor ruimteverwarming en de productie van sanitair warm water. Het thermisch vermogen van een installatie varieert hier van één kW in een woning tot een paar MW bij grote ziekenhuizen.

Flexibiliteit van dergelijke installaties wordt gebruikt binnen een andere context. Bij verscheidene installaties is een terugwatt-beveiliging geïnstalleerd om ervoor te zorgen dat er geen elektriciteit in het net geïnjecteerd wordt, vermits de groothandelsprijs van elektriciteit zeer laag is. Deze vorm van flexibiliteit is slechts een lokale economische optimalisatie, maar toont aan dat ook in deze sector flexibiliteit in (beperkte mate) mogelijk is<sup>9</sup>. De opslagcapaciteit van de buffers in dergelijke installaties is eerder beperkt. Soms wordt ervoor gekozen om geen buffer te installeren, indien de warmtetoepassing dit niet behoeft (bv. zwembad) of indien het verwarmingsnet voldoende groot is om als buffer gebruikt te worden. Indien er een buffer gebruikt wordt, is de opslagcapaciteit meestal beperkt tot maximaal één à twee vollastdraaiuren van de WKK. Indien de warmte uit de buffer niet volstaat om de warmtevraag in te vullen wordt deze meestal aangevuld door een stookketel.

---

<sup>9</sup> We hebben weet van één installatie waarbij een 70 kW WKK gedurende ongeveer één jaar continue moduleerde om complementair te zijn aan een 57 kWp PV-installatie.



## 6 Barrières

De noodzaak aan flexibiliteit in ons systeem neemt ontegensprekelijk toe, en het is uiteraard belangrijk dat deze nood op zo'n duurzaam mogelijke wijze wordt ingevuld. WKK-installaties kunnen hier een belangrijke rol in spelen, maar dat betekent niet dat we als vanzelfsprekend kunnen aannemen dat zij deze rol ook zullen invullen. Er zijn immers ook belangrijke hinderpalen die een benutting van de flexibiliteitsopties in de weg kunnen staan. Hieronder wordt een niet-exhaustief overzicht gegeven van belangrijke barrières die op vandaag en/of in de toekomst flexibele inzet van WKK tegenwerken.

### 6.1 Algemeen

#### 6.1.1 Lagere elektrische efficiëntie van de WKK-installaties

Zoals besproken in Hoofdstuk 3 zal de elektrische efficiëntie dalen bij deellast voor zowel motoren als turbines. De grotere motoren uitgerust met een turbo ondervinden hier relatief gezien nog het minste last van. Deze lagere efficiëntie leidt tot een lagere primaire energiebesparing en hogere brandstofkosten per eenheid geproduceerde elektriciteit.

Een start-stopcyclus heeft eveneens een impact op de efficiëntie. Gedurende de tijd die nodig is om een generator te synchroniseren met het net, verbruikt de WKK-installatie brandstof zonder dat er elektriciteit geproduceerd wordt. Eveneens zal de WKK-installatie suboptimaal produceren bij het op- of afregelen in een start-stopcyclus vermits de WKK-installatie gedurende deze periode ook in deellast werkt.

#### 6.1.2 Bijkomende investeringskosten

Om een WKK-installatie flexibel te kunnen laten draaien moet er bijkomend geïnvesteerd worden om ervoor te zorgen dat de warmteproductie op een efficiënte manier kan verzorgd worden op momenten dat de WKK-installatie niet produceert. Zie hiervoor paragraaf 6.2.2 en 6.3.2 voor de bijkomende investeringskosten die nodig zijn voor respectievelijk gasturbines en motoren. Ook indien men tijdelijk enkel elektriciteit wil kunnen produceren zijn bijkomende investeringen nodig.

#### 6.1.3 Bijkomende operationele kosten

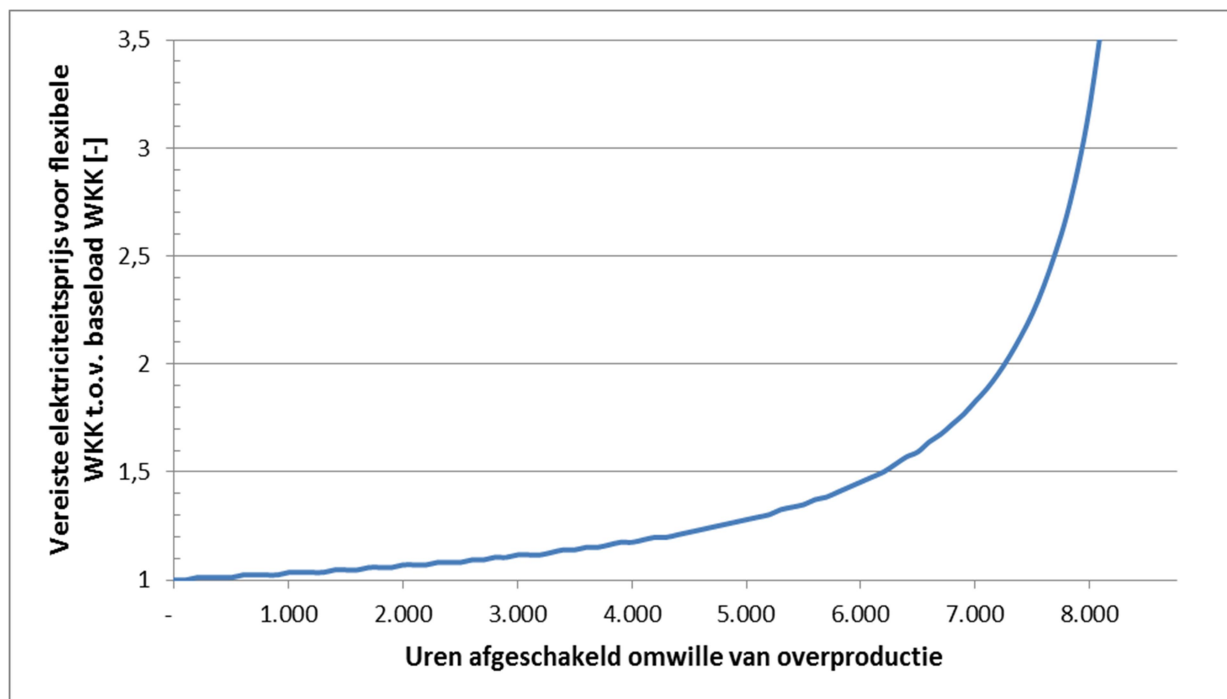
Indien de WKK-installatie flexibiliteit gaat leveren door middel van deellastwerking heeft dit een invloed op de exploitatiekosten. De onderhoudskosten van een WKK-installatie zijn evenredig met het aantal draaiuren. Hierdoor zal, ten gevolge van de lagere elektriciteitsproductie bij deellast, de onderhoudskost per geproduceerde elektriciteit stijgen.

Bij het leveren van flexibiliteit door de WKK-installatie te starten en te stoppen zullen bepaalde componenten in de installatie meer thermische stress ondervinden waardoor ze mogelijks sneller vervangen moeten worden. Daarbij komt nog dat de vaste kost verbonden met opvolgen van de installatie, verdeeld moet worden lager aantal draaiuren waardoor de kost per draaiuur stijgt.

#### 6.1.4 Verminderde rendabiliteit bestaande installaties

Zoals aangehaald in de bovenstaande paragrafen zal bij het leveren van flexibiliteit door WKK-installaties de efficiëntie dalen terwijl de investerings- en onderhoudskosten stijgen. Daarbij moet de investering terugverdiend worden gedurende een beperkter aantal vollasturen, waardoor de rendabiliteit van een WKK-project verminderd. Of anders gesteld, de elektriciteitsprijs die een WKK-

installatie nodig heeft om rendabel te zijn zal toenemen met het aantal uren dat deze afgeschakeld moet worden ten gevolge van overproductie door intermitente productie. Dit wordt afgebeeld in Figuur 19.



Figuur 19: Vereiste elektriciteitsprijs voor een flexibele WKK-installatie t.o.v. een baseload WKK in functie van het aantal uren dat deze afgeschakeld moet worden ten gevolge van overproductie

### 6.1.5 Verminderde rendabiliteit nieuwe installaties

De onzekerheid in de elektriciteitsmarkt remt nieuwe investeringen in productiecapaciteit af. Investeerders moeten immers ook rekening houden met *worst case* scenario's waardoor investeringen snel minder interessant lijken. Dit geldt zowel voor installaties die baseload produceren als voor flexibele installaties. Voor flexibele WKK-installaties weegt dit argument dubbel zo zwaar: een flexibele uitbating vergt extra investeringen en operationele kosten (zie paragrafen 6.1.2) t.o.v. baseloadproductie, terwijl het aantal uren waarop de installatie actief is (en de investering terugverdiend wordt) lager is.

### 6.1.6 Onzekerheid betreffende toekomstig beleid

De waardering van flexibiliteit in het (distributie)net is een relatief nieuw concept, waarbij het wetgevend kader hierrond eerder beperkt is. Momenteel wordt er werk gemaakt van dit wetgevend kader. Hierbij bestaat het risico dat dit toekomstig wetgevend kader flexibiliteit eerder zal afremmen dan dat het zal stimuleren. Er is momenteel ook geen duidelijkheid over de manier waarop de flexibiliteit die een WKK aan het net kan bieden gevaloriseerd kan worden.

## 6.2 Turbines in industrie

### 6.2.1 Buffering van grote hoeveelheden stoom is praktisch moeilijk

Omwille van het benodigde volume is het praktisch moeilijk om grote hoeveelheden stoom te bufferen. Dit betekent dat ontkoppeling van warmte- en elektriciteitsproductie door de warmte op te

slaan voor later gebruik niet mogelijk is. In plaats daarvan zal men moeten overschakelen naar andere technieken om stoom te produceren, die energetisch minder efficiënt zijn.

### 6.2.2 Gebrek aan voldoende (efficiënte) stoomproductiecapaciteit

De bestaande WKK-installaties zijn gebouwd om volcontinu te draaien. De perioden waarbij deze geen stoom produceren ten gevolge van een onderhoud of een (on)geplande uitval is beperkt. De ketels die als back-up gebruikt worden zijn meestal niet geoptimaliseerd qua energie-efficiëntie om de investeringskosten te drukken. Vaak worden hier zelfs de oude (bestaande) stookketels voor gebruikt en kan het zijn dat hun capaciteit niet meer voldoende is om de volledige stoomvraag van de site te dekken omwille van de toegenomen stoomvraag.

Daarnaast is het aanpassen van meeste bestaande HRSG-ketels voor koudluchtbedrijf technisch onmogelijk. Er dient een ventilator en een bypass-stack geïnstalleerd te worden tussen de gasturbine en de ketel, waarvoor er meestal geen ruimte voorzien is. Indien dit geen probleem is, kost deze optie rond de 5% van totale investeringskost van een gasturbine WKK-installatie, onafhankelijk of dit bij nieuwbouw of ombouw gebeurt.

Indien bestaande WKK-installaties flexibel moeten werken zal dit bijkomende investeringen vragen voor efficiënte stookketels. Voor aardgasketels kan deze kost variëren tussen de 40 k€ per ton stoom per uur voor een vlampijpketel met verzadigde lagedrukstoom ( $\leq 30$  bar) tot 130 k€ per ton stoom per uur voor een waterpijpketel met droge hogedrukstoom ( $> 70$  bar).

### 6.2.3 Risicoaversie met oog op maximale betrouwbaarheid van de stoomlevering

In de industrie wordt stoom gebruikt in de productieprocessen. Problemen met de stoomproductie kunnen leiden tot kwaliteitsverlies of onderbreking van de productie. Bij stolling van viskeuze producten kan dit zelfs leiden tot schade aan de installaties. Bijgevolg is de betrouwbaarheid van de stoomlevering prioritair in de industrie.

Indien de WKK flexibel inspeelt op de elektriciteitsmarkt, creëert men een bijkomend risico bij het moduleren of afschakelen van de gasturbine. Het automatisch sturen van de WKK op basis van externe signalen is helemaal uitgesloten omdat men dan deels de controle over de stoomproductie verliest.

Qua flexibiliteit van de WKK wordt daarom voornamelijk naar de Belpex Day Ahead Markt gekeken vermits men hierbij de starts en stops van de gasturbine ruim op voorhand kan plannen en voorbereiden.

### 6.2.4 Contractuele bepalingen met een eventuele mede-investeerder

Verscheidene industriële WKK-installaties zijn gebouwd en worden uitgebaat in samenwerking met een energieleverancier. De uitbatingsvoorwaarden en verdeling van de kosten en de opbrengsten van deze installaties zijn contractueel vastgelegd om de rendabiliteit van de investering voor beide partijen te waarborgen. Deze contracten zijn opgesteld met oog op baseload energieproductie. Het flexibel inzetten van de WKK-installatie kan hierbij leiden tot een onevenwichtige kosten-batenverdeling of tot de verplichting tot het betalen van een boete van de ene partij t.o.v de andere partij.

### 6.2.5 Onderhoudscontract

Bij de oudere onderhoudscontracten voor gasturbines wordt een startstop gelijk gesteld aan een bepaald aantal draaiuren. Hierbij werd abstractie gemaakt van het feit dat een startstop-cyclus op verschillende componenten een verschillende impact heeft, waardoor de impact bijgevolg vrij conservatief ingeschat werd. Hierdoor wordt flexibiliteit in deze contracten benadeeld. In de nieuwe onderhoudscontracten wordt de impact op de afzonderlijke componenten bijgehouden, waardoor dit minder nadelig is voor flexibiliteit.

## 6.3 Motoren in de bouwsector

### 6.3.1 Beperkte blootstelling aan variabele elektriciteitsprijzen

Doordat de warmtevraag in de bouwsector gemiddeld kleiner is dan in de industrie, zijn de opgestelde vermogens, zowel elektrisch als thermisch, eerder klein. Daarnaast zijn deze installaties op vandaag aangesloten op sites met een vast elektriciteitstarief (eventueel met dag/nacht-tarief). Bijgevolg zijn deze installaties gedimensioneerd op elektriciteitsproductie voor lokaal verbruik. Door een vast elektriciteitstarief is er daarbij geen incentive om de productie op marktsignalen af te stemmen.

### 6.3.2 Beperkte thermische buffercapaciteit

Bij WKK-installaties in gebouwen is vaak niet voldoende ruimte beschikbaar om een grote warmtebuffer te installeren. Daarnaast zijn de meeste WKK-installaties geplaatst in bestaande gebouwen met een verwarmingscircuit op een hogere temperatuur. Dit heeft als effect dat het temperatuurverschil in de buffer eerder beperkt is, waardoor men bij een gelijkaardig volume een kleinere thermische opslagcapaciteit heeft.

Daarbij neemt de relatieve kost van de buffer[€/m<sup>3</sup>] toe bij kleinere installaties. De prijs van een buffer van enkele tientallen m<sup>3</sup> is in de orde grootte van 1000 à 1500 €/m<sup>3</sup>. Bij de kleinste WKK-installaties kan deze kost oplopen tot 3000 €/m<sup>3</sup>.

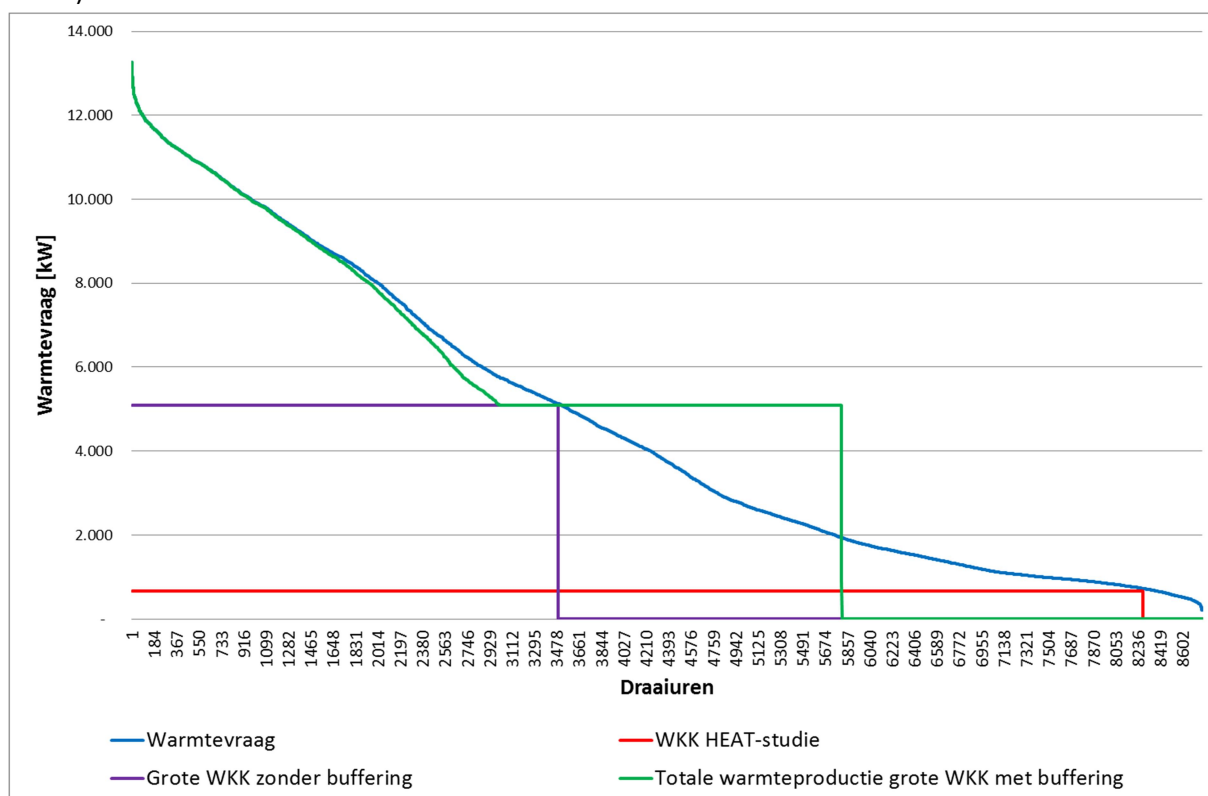
In praktijk raden de meeste constructeurs aan om de warmtebuffer te dimensioneren op wat de WKK-installatie kan produceren gedurende een half uur tot één uur voltijds draaien. Hierdoor proberen zij het aantal start per dag tot een minimum te beperken. Hierdoor is de flexibiliteit van de WKK-installatie beperkt.

## 7 Gebruiksvoorbeelden van flexibele WKK

### 7.1 Impact van een flexibele inzetstrategie bij een motor-WKK

In de studie van (COGEN Vlaanderen, 2014) wordt de haalbaarheid van een WKK-installatie in een potentieel warmtenet bestudeerd. In plaats van de WKK-installatie te dimensioneren op de elektriciteitsvraag van een van de bedrijfsites aangesloten op het warmtenet, wordt er gekeken om de WKK te dimensioneren op de warmtevraag van het warmtenet, waarbij het merendeel van de elektriciteit in het net geïnjecteerd moet worden. Voor de energetische en financiële analyse werd op uurbasis bepaald hoe de warmtevraag ingevuld wordt door de verschillende warmtebronnen (WKK, ketel en buffer) in functie van de dimensionering en het type sturing. Bij één type sturing wordt er rekening gehouden met de uurwaarden van de elektriciteitsprijs (Belpex Day-Ahead 2013). De thermische buffercapaciteit werd beperkt tot de thermische energie dewelke de WKK kan produceren gedurende zes uren volcontinue draaien.

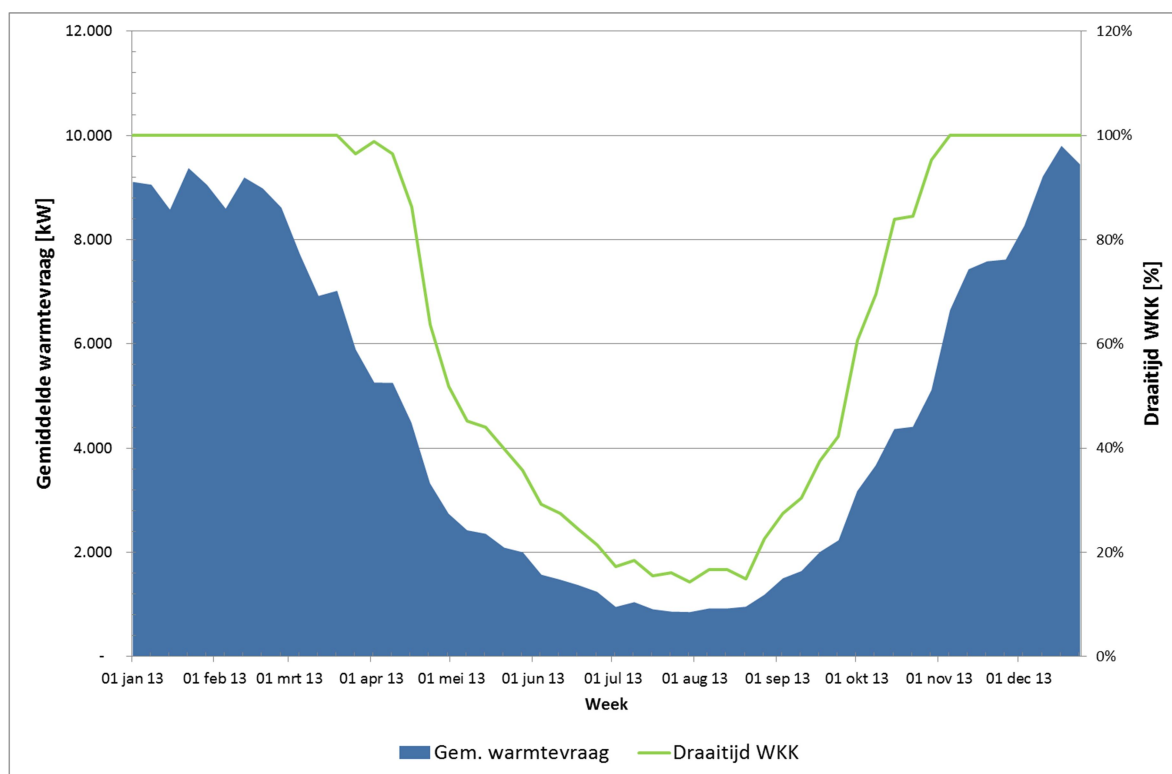
De jaarbelastingsduurcurve (JBDC) van de warmtevraag staat in Figuur 20 afgebeeld in het blauw. In de figuur kan men ook de JBDC terug vinden van een WKK gedimensioneerd op de elektriciteitsvraag (rode curve), de warmtevraag zonder buffer (paarse curve) en de warmtevraag met buffering (groene curve).



Figuur 20: JBDC van warmtevraag en warmteproductie

Eenzijds zal de grotere WKK (met buffering) een groter deel van de warmtevraag kunnen invullen en bijgevolg een grotere warmtekrachtbesparing kunnen leveren. Anderzijds zal deze WKK in combinatie met buffer er voor zorgen dat de WKK veel minder moet draaien in perioden met een kleinere warmtevraag. In Figuur 21 kan men zien dat de WKK gedurende de maanden mei – oktober niet volcontinu moet draaien. Ten gevolge van de buffer wordt de warmteproductie van de WKK – en

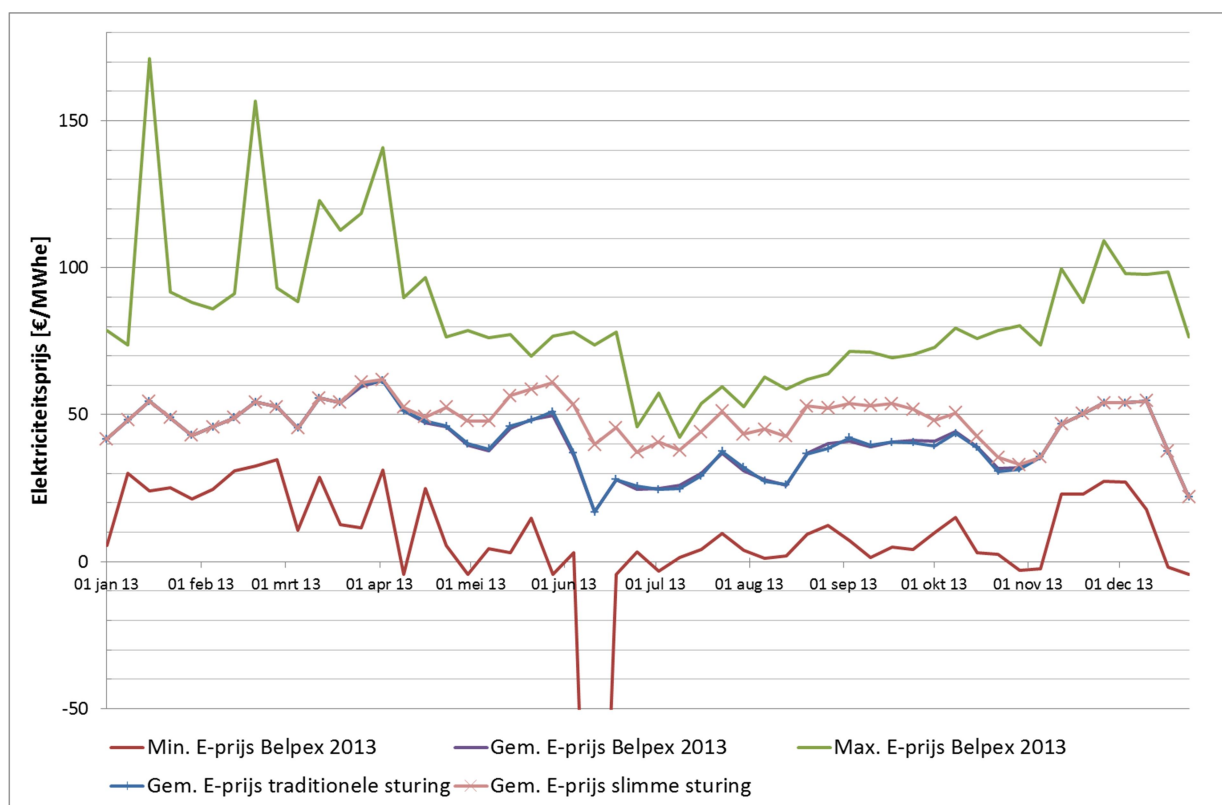
bijgevolg ook de elektriciteitsproductie – in bepaalde mate losgekoppeld van de warmtevraag. De flexibiliteit die hieruit volgt kan men gebruiken om de WKK te laten draaien op de momenten waarop de elektriciteitsprijs het hoogst is. Hoe groter de WKK en de buffer zijn in functie van de warmtevraag hoe meer flexibiliteit men heeft.



**Figuur 21: De gemiddelde warmtevraag en de draaitijd van de WKK op weekbasis**

Dankzij een sturing op basis van de verwachte warmteproductie en de elektriciteitsprijzen kan men de inkomsten van de WKK en buffer financieel optimaliseren door de WKK voornamelijk te laten draaien op momenten dat de elektriciteitsprijs hoog is. In Figuur 22 wordt het effect hiervan duidelijk gemaakt. Het minimum, gemiddelde en maximum van de elektriciteitsprijzen op weekbasis worden getoond. Eveneens zijn de weekgemiddelden van de elektriciteitsprijzen die een WKK verkrijgt met en zonder sturing in functie van de elektriciteitsprijzen afgebeeld. Tijdens de periode dat WKK niet volcontinue moet produceren, nl. maanden april – oktober, slaagt de WKK met de sturing in functie van de elektriciteitsprijs erin om een gemiddeld hogere elektriciteitsprijs te verkrijgen ten opzichte van een sturing onafhankelijk van de elektriciteitsprijzen.

Bij de WKK zonder sturing in functie van de elektriciteitsprijzen is er een beperkt verschil merkbaar met de gemiddelde elektriciteitsvraag. Dit verschil is te verklaren door de synchroniciteit tussen de warmtevraag en de elektriciteitsvraag – en bijgevolg de elektriciteitsprijs - op jaarbasis. (COGEN Vlaanderen, 2014)



Figuur 22: Elektriciteitsprijzen op weekbasis

## 7.2 Impact van flexibele inzetstrategieën bij een GT-WKK

Een studie van (Energy Matters, 2015) onderzocht de technische en financiële mogelijkheden van operationele flexibiliteit van industriële WKK-installaties. In de studie worden vijf verschillende operationele inzet-strategieën van GT-WKK-installaties besproken, nl.:

- WKK baseload
- WKK in deellast bedrijf
- WKK in dag/nacht cycli – start/stop cycli
- WKK flex: toekomstige pieken en dalen - onbalans - WKK als noodvermogen
- Ketelbedrijf: overgaan op volledige levering met stoomketels

De meeste scenario's spreken waarschijnlijk voor zich. In het scenario 'WKK flex' kan de WKK ook als flexibel regelvermogen ingezet worden. Een GT-WKK met een bypasstack en optie koudluchtbedrijf kan hierbij ingezet worden op de day-ahead en intraday markt of onbalansmarkt. Bijkomend is het wellicht mogelijk de WKK bijvoorbeeld als (afregeld) noodvermogen aan te bieden.

De rendabiliteit wordt berekend voor bestaande WKK-installaties met een kleine gasturbine (<10 MWe aeroderivative GT), een middelgrote gasturbine (10-25 MWe aeroderivative GT) en een grote gasturbine (> 25 MWe landbased GT). Het uitgangspunt van de studie is dat deze installaties op het punt zijn waar een grote revisie vereist is en de uitbater voor de beslissing staat om al dan niet verder te investeren in de WKK-installatie.

De gehanteerde elektriciteitsprijs in de rendabiliteitsberekening wordt er uitgegaan van drie scenario's:

- “Business as usual (BAU)” scenario op basis van de prijzen van 2014
- “SER EA 2020” scenario waarbij de geplande HE productiecapaciteit wordt gerealiseerd zoals overeengekomen in het Nederlands Energie Akkoord. Hierbij wordt de elektriciteitsprijs berekend door het Energy Market Forecast model van Energy Matters. Dit model houdt rekening met de geplande elektriciteitsproductie uit HEB en de bijhorende elektriciteitsproductieprofielen, de samenstelling van het conventionele productiepark en de marginale kost en flexibiliteit van de verschillend productiecentrales.
- “Herstel elektriciteitsmarkt” scenario waarbij de gascentrales prijsbepalend zijn.

In het scenario van de herstellende elektriciteitsmarkt is elk inzet-scenario van WKK gunstiger ten op zichte van stoomproductie uit ketels. In het scenario 2020 zijn in de eerste plaats het scenario ‘WKK flex’ en op de tweede plaats het scenario ‘WKK in cyclisch bedrijf’ de meest interessante opties. In het BAU scenario is geen enkel uitbatingsscenario rendabel zonder ondersteuning.

Hoewel grote revisies van GT-WKK installaties in de Nederlandse marktsituatie nog rendabel kunnen zijn indien flexibiliteit benut wordt, geldt voor nieuwe installaties een ander verhaal. Het investeren in een nieuwe WKK in de Nederlandse context, komt pas in beeld bij een volledig herstel van elektriciteitsprijzen zoals in 2008 het geval was.

### 7.3 Virtual powerplants

Een onderwerp dat een steeds prominentere rol opneemt in het energiesysteem zijn de ‘*virtual powerplants*’: aggregaten van decentrale-productie-eenheden. Door vele kleinere installaties in één grote *pool* te combineren, en rekening te houden met de gemiddelde beschikbaarheden van de verschillende installaties, verkrijgt met een geheel waarmee een bepaalde capaciteit met een zeer grote betrouwbaarheid aangeboden kan worden.

Het concept werd bijvoorbeeld sterk uitgewerkt door het Duitse ‘Lichtblick’-project, dat ambiëerde om 100.000 installaties van ca. 20 kW te plaatsen bij Duitse gezinnen (meergezinswoningen). Het project heeft deze ambitie niet kunnen realiseren, maar ondertussen zijn er – ook in België – heel wat spelers die dit type van aggregatie toepassen op WKK-installaties om producten aan te bieden op bijvoorbeeld de balancing-markt. Op vandaag mikken deze spelers nog voornamelijk op de grotere installaties (vanaf enkele 100en kW), maar niets belet hen om in de toekomst, wanneer de kleinere installaties er door de producent reeds op voorzien worden, deze mee te nemen in hun concept.



## 8 Besluit

Sinds enkele jaren worden heel wat installaties geconfronteerd met de nood tot een flexibelere uitbating. De energiemarkten nopen industriële installaties al regelmatig tot stilleggen, hoewel de energetische meerwaarde van die installaties op die momenten nog niet in vraag gesteld kan worden (de elektriciteitsvraag wordt immers nog nooit volledig gedekt door enkel hernieuwbare energie). Dit weegt sterk op de rentabiliteit van deze installaties, waardoor bepaalde van deze installaties dreigen stilgelegd te worden zonder vervanging. Dit zou een aderlating betekenen voor de energie-efficiëntie in Vlaanderen, met daaraan gekoppeld een belangrijke impact op primaire-energieverbruik en CO<sub>2</sub>-emissies.

Anderzijds zien we ook dat andere installaties al op deze flexibiliteitsbehoefte kunnen inspelen. Met name de glastuinbouwsector heeft zich de afgelopen meer en meer ontpopt als aanbieder van flexibel vermogen, en levert ons energiesysteem op die manier een belangrijke dienst: duurzaam betrouwbaar en stuurbaar vermogen.

Indien we naar de verdere toekomst kijken, kan het belang van flexibiliteit enkel toenemen. Groeiende aandelen intermitterende hernieuwbare bronnen verhogen de nood aan flexibele aanvulling. Om een referentiekader te hebben, hebben we voor deze nota teruggesproken naar de scenario's die VITO in haar scenariostudie voor 2030 opnam (VITO, 2014). Zelfs in de scenario's met een hoog aandeel aan hernieuwbare energie, blijft een belangrijk deel van de energievraag in te vullen met stuurbare productie op basis van brandstof – in grote mate fossiele brandstoffen. Het is uiteraard belangrijk dat – om gerealiseerde baten niet verloren te laten gaan – deze invulling op een duurzame en efficiënte manier gebeurt. In die zin zal de rol van WKK bijgevolg niet in het gedrang komt.

Het is op zich echter niet evident om WKK-installaties op een flexibele manier te concipiëren. De investeringskosten zijn immers hoger om bedrijfscontinuïteit te garanderen, en het aantal uren waarop de investering terugverdiend kan worden neemt af. Het is dan ook belangrijk te noteren dat zelfs in de groeiscenario's naar hoge aandelen hernieuwbare energie, er in principe plaats is voor baseload-WKK: zowel op vlak van primaire-energiebesparing als op gebied van economische optimalisatie. In dat opzicht is het van belang dat – zeker waar flexibiliseren niet onmiddellijk op een kostenefficiënte manier of zonder te zware impact op de bedrijfsprocessen gerealiseerd kan worden – de levensvatbaarheid van minder flexibele installaties gevrijwaard blijft.

Anderzijds wil dat ook niet zeggen dat een verdere flexibilisering van het WKK-park niet mogelijk is. Hoewel er een spanningsveld bestaat tussen primaire energiebesparing en flexibiliteit, hoeft het ene het andere niet uit te sluiten. WKK kan een bijdrage leveren voor beide, hiervan getuigen de verschillende cases die gegeven worden in hoofdstuk 4. Om deze mogelijkheden naar de toekomst verder uit te breiden, is het van belang dat enerzijds de valorisatie van deze mogelijkheden uitgewerkt wordt (zoals bijvoorbeeld gebeurde via R3DP), en dat anderzijds de mogelijkheden die vanuit de markt ontstaan niet tegengehouden worden.

De afweging van flexibilisering van WKK t.o.v. een baseload-exploitatie wordt uiteraard op niveau van de investeerder genomen. Anderzijds is het duidelijk dat hier ook op systeemniveau een belangrijke afweging gemaakt kan worden. En net zo zeer, blijkt uit Addendum A, dient ook een

optimalisatie plaats te vinden van intermitterende productietechnologieën, zodanig dat de nood aan flexibel vermogen beperkt kan worden en de rendabiliteit van flexibiliteitsoplossingen maximaal wordt.

## 9 Bibliografie

- Akber Pasha, T. D. (2010, januari 7). *HRSGs for Next Generation Combined Cycle Plants*. Opgehaald van Power Engineering: <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-114/issue-7/Features/hrsgs-for-next-generation-combined-cycle-plants.html>
- Alstom Power. (2011). *Combined Cycle Power Plants as ideal solution to balance grid fluctuations*.
- Alstom Power. (2011). *The Next Generation KA24/GT24 From Alstom, The Pioneer In Operational Flexibility - Technical Paper*.
- COGEN Vlaanderen. (2014). *Flexibele WKK: de rol van WKK binnen een systeem met een groot aandeel hernieuwbare energie*. Leuven.
- COGEN Vlaanderen. (2014). *Nota warmtenetten*.
- CREG. (2015). *Nota over de opvallende evoluties op de Belgische groothandelsmarkten elektriciteit en gas in 2014*.
- CREG. (2015). *Studie over de werking van en de prijsevolutie op de Belgische groothandelsmarkt voor elektriciteit – monitoringrapport 2014*.
- David S. Moelling, P. a. (2012, januari 6). *Startup Purge Credit Benefits Combined Cycle Operations*. Opgehaald van POWER: <http://www.powermag.com/startup-purge-credit-benefits-combined-cycle-operations>
- ECN. (2014). *Quantifying flexibility markets*. ECN.
- Electrabel. (2013). *Challenges for gas fired cogeneration in current market*. Gent: Electrabel.
- Elia. (sd). *Productiepark*. Opgeroepen op juli 29, 2015, van <http://www.elia.be/nl/grid-data/productie/productiepark>
- Energy Matters. (2015). *Flexibilisering industriële WKK: Technische en financiële mogelijkheden van operationele flexibiliteit*.
- European Commission. (2015, May 8). *European Commission*. Opgeroepen op May 18, 2015, van 2030 framework for climate and energy policies: [http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm)
- Eurostat. (2015, april 27). *Supply, transformation and consumption of electricity - Final Energy Consumption*. Opgehaald van [http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nrg\\_105a](http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nrg_105a)
- Federaal Planbureau. (2015). *2030 Climate and Energy Framework for Belgium Impact assessment of a selection of policy scenarios up to 2050*.
- Federaal Planbureau. (2015). *Studie over de perspectieven van elektriciteitsbevoorrading tegen 2030*.
- GE. (2014). *GE J920 Flextra Flexible and efficient distributed power - white paper*. GE.

GE. (2015). *Brochure GE LMS100 flexible power*. GE.

Het laatste nieuws. (2016, januari 13). *Vlaanderen steekt Wallonië voorbij voor windenergie*.

Opgehaald van Het laatste nieuws:

<http://www.hln.be/hln/nl/2764/milieu/article/detail/2583765/2016/01/13/Vlaanderen-steekt-Wallonie-voorbij-voor-windenergie.dhtml>

Klimstra, J. (2014). *Power supply challenges: Solution for integrating renewables*. Wärtsilä Finland Oy.

Siemens. (2010). *Fast cycling and rapid start-up: new generation of plants achieves impressive results*. Erlange, Germany.

Turbomach. (2012). *Flexible combined cycle power plants are an efficient solution to balance stochastic energy from renewables*. Switzerland: Turbomach S.A.

VITO. (2014). *Inventaris warmte-krachtkoppeling Vlaanderen 1990-2013*. VITO.

VITO. (2014). *Potentieel studie hernieuwbare energie 2030 in Vlaanderen*.

VREG. (2015). *Lijst met de warmtekrachtinstallaties waaraan warmtekrachtcertificaten en/of WKK garanties van oorsprong worden toegekend*.

VREG. (2015, juli 7). *Productie-installaties in Vlaanderen waarvoor groenestroomcertificaten en/of garanties van oorsprong worden toegekend*. Opgehaald van VREG:  
[www.vreg.be/sites/default/files/statistieken/groenestroom/20150707-gsc\\_-\\_productie\\_installaties\\_1.doc](http://www.vreg.be/sites/default/files/statistieken/groenestroom/20150707-gsc_-_productie_installaties_1.doc)

Wärtsilä. (sd). *Opgeroepen op May 26, 2015, van Combustion Engine vs Gas Turbine: Startup Time*:  
<http://www.wartsila.be/power-plants/learning-center/technical-comparisons/combustion-engine-vs-gas-turbine-startup-time>

Wärtsilä. (sd). *Combustion Engine vs. Gas Turbine: Part Load Efficiency and Flexibility*. Opgeroepen op juli 8, 2015, van <http://www.wartsila.be/power-plants/learning-center/technical-comparisons/combustion-engine-vs-gas-turbine-part-load-efficiency-and-flexibility>

Wärtsilä Power Plants . (2014). *Features and parameters of various power plant technologies*.

## A Addendum: Flexibiliteit: WKK vs wind (en zon)

### A.1 Inleiding

In haar memorandum naar aanleiding van de verkiezingen in 2014 schreef COGEN Vlaanderen heel duidelijk: **na** de zuiver hernieuwbare energiebronnen is WKK de meest duurzame methode om elektriciteit op te wekken.

Een MWh elektriciteit die opgewekt wordt door een windturbine of een zonnepaneel produceert minder CO<sub>2</sub> en andere emissies dan dezelfde MWh elektriciteit die opgewekt wordt door een WKK-installatie. Daarover bestaat geen twijfel. Het is dus logisch dat een WKK-installatie die eenvoudig aan- en afgeschakeld kan worden wordt stilgelegd op een moment dat er voldoende (of teveel) elektriciteit geproduceerd wordt via bijvoorbeeld wind en PV. Een aantal installaties is daar vandaag reeds volledig klaar voor: bij hoge marktprijzen zullen zij meer elektriciteit produceren en warmte stockeren in hun buffers, bij lagere marktprijzen zullen zij minder elektriciteit produceren en warmte onttrekken aan de buffers.

Anders wordt het verhaal voor installaties die minder of niet flexibel zijn. In de industrie hebben we zo ook installaties die helemaal niet voorzien zijn op het reageren op marktomstandigheden, maar zuiver geconcipeerd zijn voor het voorzien van een lokale stoomvraag (al dan niet in combinatie met het dekken van een lokaal elektriciteitsverbruik). Deze zijn dus (theoretisch) bedoeld om 8760 uren in het jaar te draaien. Ombouwen tot een flexibelere installatie vraagt relatief veel geld, en ook nieuwe installaties op een flexibele wijze bouwen verhoogt de totale investeringskost.

Het is dus mogelijk dat, indien een dergelijke installatie (al dan niet door de markt) verplicht wordt om af en toe te stoppen met draaien, de installatie helemaal uit circuit wordt genomen (of niet wordt gebouwd). Tegenover een aantal uren (X) waar de zuiver hernieuwbare elektriciteit voorrang heeft op de WKK (die op dat moment meer uitstoot creëert), staan dus (8760 – X) uren waarop de installatie geen primaire-energiebesparing meer realiseert. Het is dus pas op het moment waarop de winst van hernieuwbaar boven WKK gedurende X uren groter wordt dan het verlies aan primaire energiebesparing gedurende (8760 – X), dat het effectief interessant is om ook deze installaties stil te leggen. Hiervoor moet X voldoende groot zijn.

Dit is een erg vereenvoudigde berekening die een aantal sterk versimpelde aannames maakt betreffende de inzet van WKK-centrales. Toch geeft ze aan dat – naast de flexibele inzet die voor heel wat WKK's mogelijk is – er misschien ook ruimte is voor baseload-WKK, zeker in een overgangssituatie. Anderzijds hoeft dit niet per se nadelig te zijn, gezien de huidige dimensionering van windturbines en PV-installaties ook verre van optimaal is. Een betere dimensionering van deze installaties zou automatisch gedurende een langere tijd ruimte laten voor baseload-WKK, en anderzijds zou het moment waarop ook in deze baseload-band hernieuwbare energie opduikt automatisch een hoge X met zich meebrengen. We lichten dit hieronder toe.

### A.2 Dimensionering wind-turbines

*We lichten onze redenering hieronder toe voor windprojecten, waar het vermogen van de generator geoptimaliseerd wordt t.a.v. de wiekdiameter, maar een gelijkaardige redenering kan opgebouwd*

worden voor PV-installaties, waar het omvormer-vermogen geoptimaliseerd wordt t.a.v. het piekvermogen van de panelen<sup>10</sup>.

De elektriciteitsproductie van een windturbine wordt – voor een gegeven locatie – bepaald door de diameter van de wieken en door het vermogen van de generator.

### A.2.1 Wiekdiameter

De diameter van de wieken bepaalt hoeveel energie er op jaarbasis maximaal door de turbine gecapteerd kan worden: eenvoudig gesteld de hoeveelheid wind die op een jaar tijd door de cirkel gevormd door de wieken passeert. Door een kleine cirkel passeert relatief weinig wind, met toenemende diameter stijgt de energie die opgevangen kan worden (kwadratisch t.a.v. de diameter).

De wiekdiameter bepaalt het potentieel aan energie dat opgevangen kan worden. Of het maximaal vermogen in werkelijkheid beschikbaar is hangt uiteraard af van de windsnelheid: bij een windsnelheid van 0 m/s (windstil) kan zelfs de grootste installatie geen elektriciteit opwekken. Bij grote windsnelheden heeft de turbine het hoogste vermogen, en bij zeer hoge windsnelheden (bijvoorbeeld stormweer) zullen maatregelen genomen worden om de turbine te beschermen tegen de erg grote krachten die kunnen ontstaan: de installatie wordt 'uit de wind gezet'.

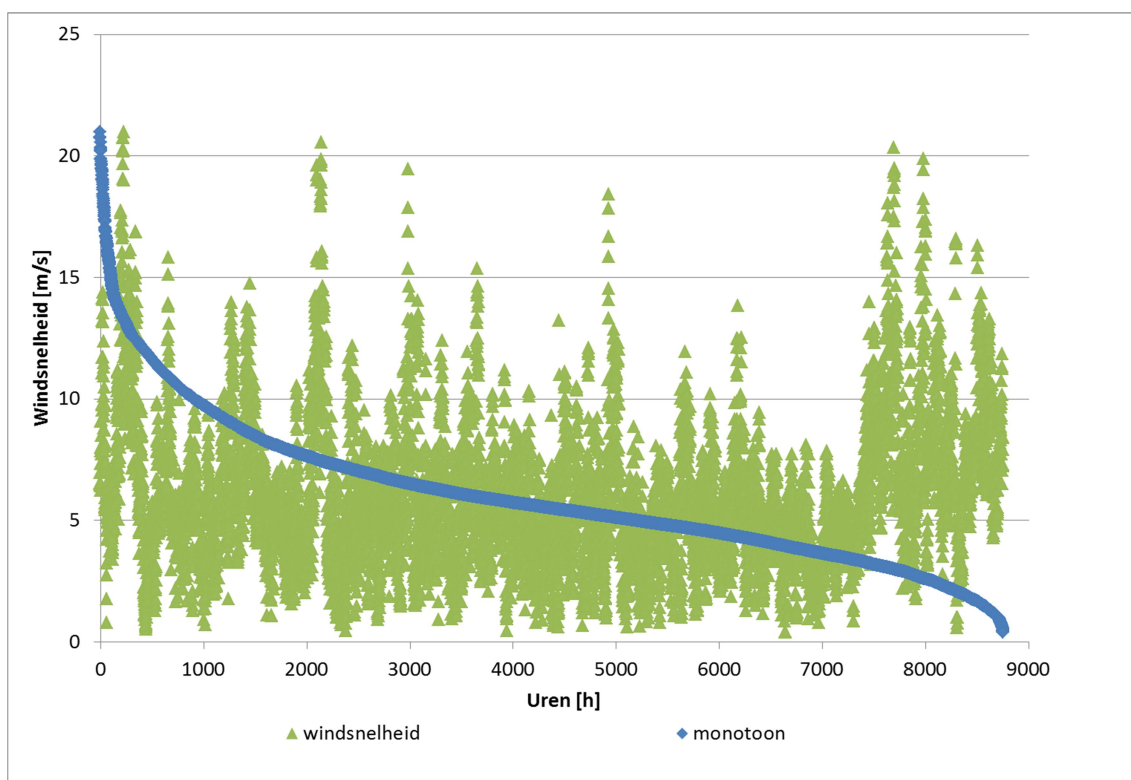
De windsnelheid op een bepaalde locatie is variabel doorheen het jaar. Onderstaande grafiek geeft hiervan een voorbeeld. Hierop wordt duidelijk dat de windsnelheden doorheen het jaar sterk variëren, en dat pieksnelheden slechts een beperkt aantal uren per jaar voorkomen.

Op basis van bovenstaande windsnelheden kan berekend worden welk vermogen een turbine theoretisch kan realiseren. Uit de windsnelheid kan de kinetische energie die voorhanden is berekend worden, en mits een omrekenfactor<sup>11</sup> kan men dan berekenen wat het theoretisch maximaal vermogen is dat per m<sup>2</sup> omgezet kan worden, uiteraard op een sterk vereenvoudigde manier. Dit wordt in onderstaande figuur weergegeven. Men ziet hierop dat gedurende een beperkt aantal uren per jaar een zeer groot vermogen beschikbaar is.

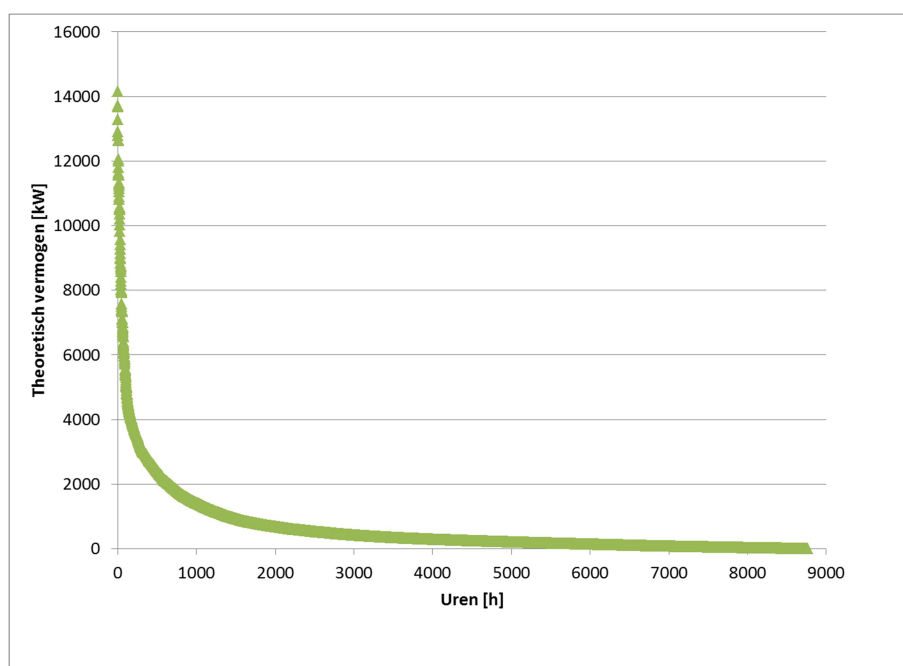
---

<sup>10</sup> Dit principe wordt bijvoorbeeld ook al toegepast in regio's waar het totale PV-piekvermogen per woning gelimiteerd is: automatisch gaat men investeren in een grotere verhouding piekvermogen van de panelen vs piekvermogen van de omvormer.

<sup>11</sup> De Betz-factor geeft aan hoeveel van de kinetische energie maximaal omgezet kan worden. Bij een omzetting van 100% wordt alle kinetische energie omgezet, en valt de lucht achter de turbine stil. Dit kan uiteraard niet gezien er dan geen nieuwe lucht aangevoerd kan worden. De maximale omzetting bedraagt 59,3%. Daarnaast is de efficiëntie van de installatie zelf ook geen 100%, dus ook hiervoor wordt een correctiefactor toegepast.



Figuur 23: gemeten windsnelheden op hoogte, in groen in functie van de tijd en in blauw als monotoon gesorteerd

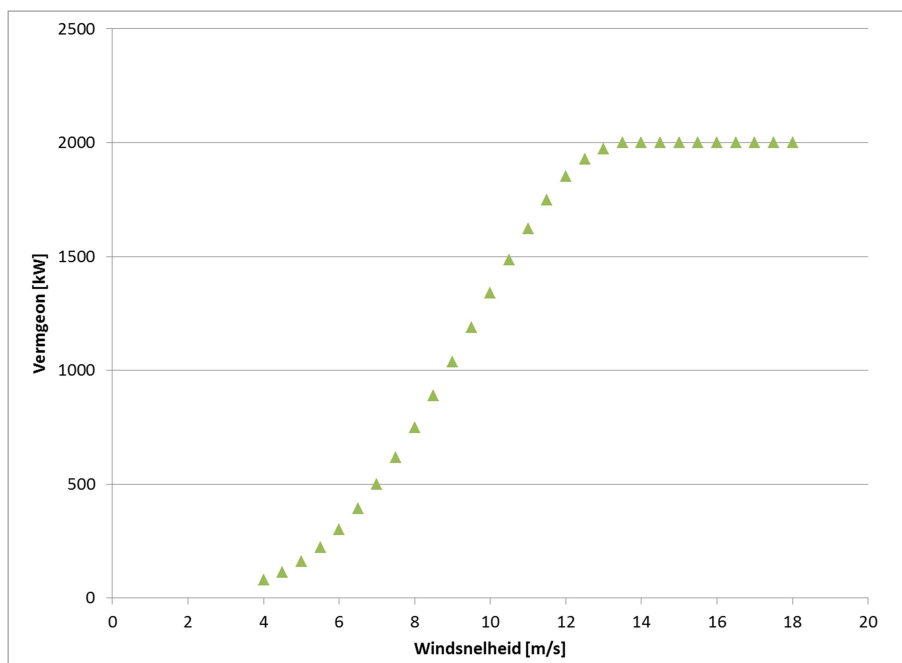


Figuur 24: Theoretische inschatting beschikbaar vermogen op basis van hogervermelde windsnelheden

### A.2.2 Het vermogen van de generator

De rotordiameter bepaalt de maximale hoeveelheid energie die gecaptureerd kan worden, maar het vermogen van de generator in de turbine bepaalt hoeveel hiervan ook effectief wordt omgezet in elektriciteit: het vermogen van de generator is steeds kleiner dan het maximaal theoretisch vermogen van de rotor.

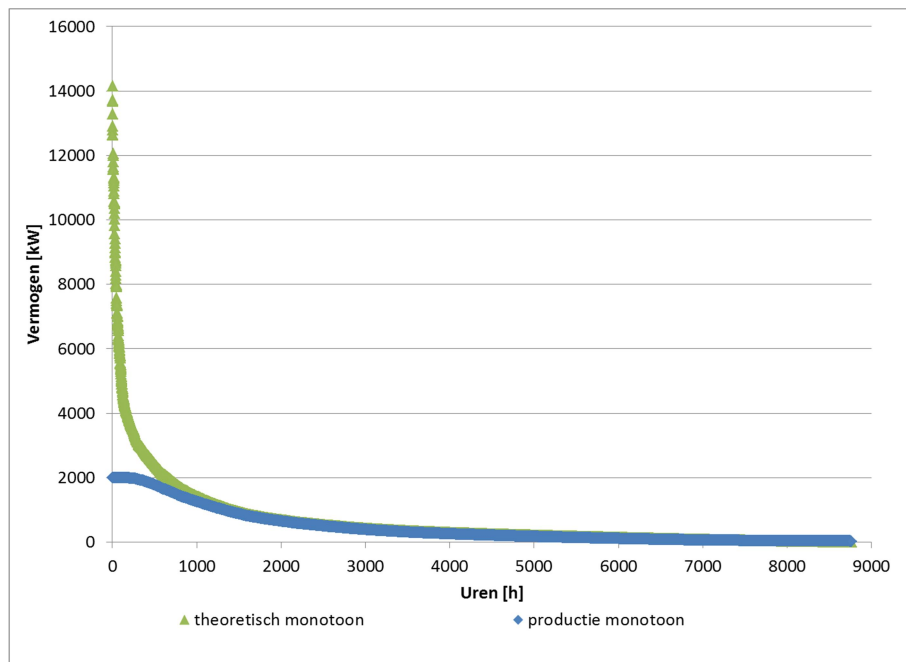
Dit wordt getoond in Figuur 25, die voor een reële turbine toont welk vermogen hij ontwikkelt in functie van de windsnelheid. Vanaf een bepaalde windsnelheid wordt het maximaal generatorvermogen bereikt, en zal het geleverd vermogen niet verder stijgen. Men zou een grotere generator kunnen plaatsen, maar deze zou slechts gedurende een aantal uren per jaar meer kunnen produceren. De extra kost is dan niet te verantwoorden t.o.v. de beperkte bijkomende opbrengsten.



**Figuur 25: Vermogen in functie van de gemiddelde windsnelheid voor een reële windturbine**

Het spreekt voor zich dat hier ergens een optimum gezocht moet worden: een generator die haar vol vermogen naar verwachting slechts gedurende één uur per jaar zal kunnen aanspreken zal waarschijnlijk haar meerkost niet waard zijn t.o.v. het eerst volgende kleinere exemplaar dat gedurende 8759 uren per jaar evenveel kan produceren, en één uur slechts een beetje minder. Dat deze afweging op vandaag al gemaakt wordt, volgt tevens uit Figuur 26, die een theoretisch maximaal en een werkelijke productieprofiel toont voor de windgegevens uit Figuur 23 en de turbinegegevens uit Figuur 25.





**Figuur 26: Vergelijking tussen theoretisch maximaal vermogen en werkelijk vermogen van de installatie**

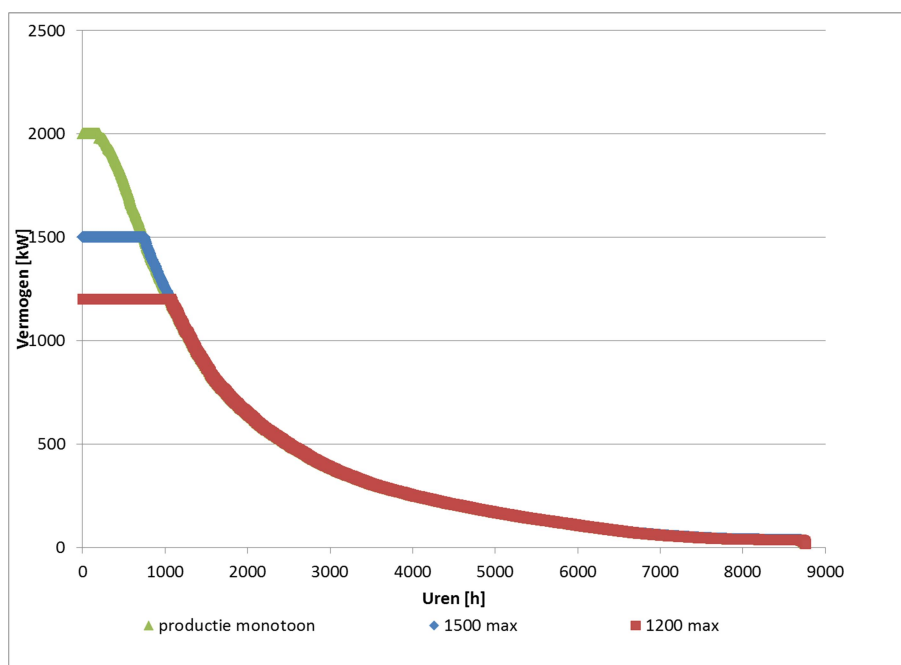
Hierbij moet rekening gehouden worden met verschillende factoren: enerzijds is er de kost van de generator zelf: het produceren van een kleinere generator gaat steeds gepaard met een lagere productiekost omwille van een lager materiaalverbruik (bijvoorbeeld hoeveelheid koper)<sup>12</sup>. Daarnaast zijn heel wat componenten automatisch goedkoper omdat lagere vermogens minder zware uitvoeringen vragen: minder zware bekabeling, minder zware transformatoren ... En ook de aansluitkost is uiteraard lager: op dezelfde netinfrastructuur kunnen ofwel twee installaties van 1,1 MW ofwel drie van 0,7 MW geïnstalleerd worden.

Als voorbeeld grijpen we hiervoor even terug naar de bovenstaande gegevens. Met de voorgestelde configuratie – op basis van de turbinespecificaties getoond in Figuur 25 – realiseert deze installatie ca. 2000 vollasturen<sup>13</sup>, wat in de buurt ligt van de veronderstellingen van VEA voor nieuwe installaties. Maar toch kan hier de vraag gesteld worden of dit de optimale installatie is: indien het generatorvermogen tot 1500 kW beperkt wordt (een reductie van 25%), wordt slechts 6% groene stroom minder geproduceerd. Een beperking tot 1200 kW (een reductie van 40%) betekent een verlies aan groenestroomproductie van 13%. Qua netaansluiting en -impact kunnen in plaats van 1 installatie van 2000 kW even goed 2 installaties van 1000 kW geplaatst worden. Deze produceren tezamen echter maar liefst 60% meer groene stroom. Een ander punt dat in rekening gebracht moet worden is de verloren opbrengst van de elektriciteit bij een kleinere generator. Daar deze elektriciteit

<sup>12</sup> Dit wil niet automatisch zeggen dat een kleinere generator steeds goedkoper is om aan te kopen: dit wordt door de producenten en de markt bepaald: een generator die veel geproduceerd wordt kan goedkoper zijn dan een kleinere generator die ‘on demand’ wordt geproduceerd. Ook (markt)strategische overwegingen spelen hierbij mee.

<sup>13</sup> Vollasturen: de totale elektriciteitsproductie op jaarbasis gedeeld door het nominaal maximaal vermogen van de installatie. Indien de installatie gedurende zoveel uren op haar nominaal vermogen zou draaien, zou ze evenveel elektriciteit produceren. VEA rekent op vandaag met 2050 vollasturen.

verloren gaat op momenten dat er veel wind is, en gezien de elektriciteitsprijs relatief gezien lager is bij een groter aanbod aan hernieuwbare elektriciteit, is de marktwaarde van de elektriciteit die verloren gaat relatief beperkt. Qua inkomst (of qua economische waarde voor de maatschappij) is het verlies dus nog kleiner dan de hierboven vermelde percentages.



**Figuur 27: Vergelijking van de originele productie-monotoon met die van een installatie die afgetopt wordt op respectievelijk 75% en 60% van het oorspronkelijke piekvermogen**

### A.2.3 Voordeel vlakker profiel

Zoals in punt 45 aangegeven is het voor het flexibiliseren van WKK's en het investeren in alternatieven (bijvoorbeeld power-to-heat) interessant dat deze investeringen voldoende renderen, i.e. dat zij eenmaal geplaatst voldoende uren per jaar benut kunnen worden. Dit wordt in sterke mate bepaald door het productieprofiel van intermitterende productie-eenheden. Hoe vlakker hun profiel, hoe sneller de benutting van alternatieven zoals flexibele WKK, power-to-heat, opslag ... toeneemt met een stijgend aandeel aan hernieuwbare energie. Dit wordt getoond in Figuur 28: het verloop van de 'vollasturen' van de overproductie uit zon en wind, in functie van een toenemend aandeel aan hernieuwbare energie. Dit vraagt wellicht enige uitleg.

Om een voldoende groot aandeel aan hernieuwbare elektriciteit op te wekken, is een voldoende grote capaciteit (opgesteld vermogen) aan hernieuwbare bronnen nodig. Daarbij dienen we ook in rekening te brengen dat we met huidige technologieën ook een zekere baseloadcapaciteit<sup>14</sup> nodig hebben om het evenwicht van het net te verzekeren. In het 'High-scenario' dat VITO in haar

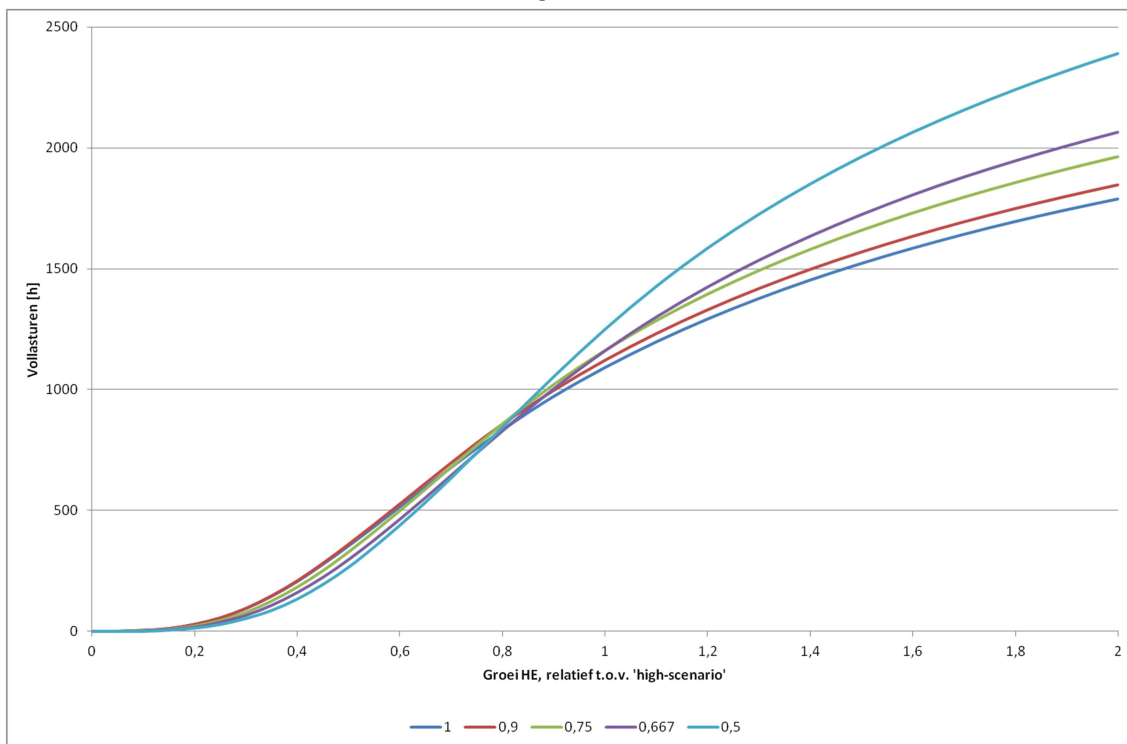
<sup>14</sup> Om te verzekeren dat, indien de zon of wind plots wegvalt, deze productie opgevangen kan worden door stuurbare productie, dienen deze eenheden 'klaar' te staan. Hiervoor moeten zij een minimaal vermogen leveren om in geval van nood snel over te kunnen nemen.

potentieelstudie hanteerde, is het totaal opgesteld vermogen al beduidend hoger dan de gemiddelde vraag. Regelmatig zijn er dan ook momenten waarop de productie de vraag overstijgt, en maatregelen getroffen moeten worden om het net in evenwicht te houden: terugmoduleren van WKK's, vraag verschuiven, opslag,... Al deze zaken vragen bijkomende investeringen, die voor hun rentabiliteit sterk afhangen van hoeveel uren per jaar zij effectief benut kunnen worden. Een batterij kan bijvoorbeeld gebruikt worden om elektriciteit op te slaan wanneer er teveel elektriciteit geproduceerd wordt, maar indien dit maar enkele malen per jaar gebeurt, zal zij zichzelf nooit kunnen terugverdienen.

Daarom passen we het principe van de vollasturen toe op de overproductie: hoe hoger deze vollasturen, hoe groter de benutting van de investeringen voor flexibiliteit. En dit wordt in sterke mate beïnvloed door het productieprofiel van de intermitterende bronnen. Dit wordt weergegeven in Figuur 28. Deze figuur toont de vollasturen van de overproductie (dus de totale overproductie op jaarbasis gedeeld door het maximaal vermogen dat teveel geproduceerd werd) in functie van een toenemend aandeel hernieuwbare energie. De waarden op de X-as geven de evolutie aan tussen de huidige situatie en het 'high-scenario' van VITO, dat bereikt wordt bij de waarde 1, en waarbij de aangroei nog eens verdubbeld is bij waarde 2. De verschillende curves tonen het effect van het vlakker maken van het productieprofiel (kleinere generator voor zelfde wiekdiameter bij een windturbine, kleinere omvormer voor een zelfde hoeveelheid panelen bij een PV-installatie). De donkerblauwe curve toont het verloop bij de huidige stand van de technologieën, de lichtblauwe curve toont het resultaat wanneer de technologieën qua piekvermogen tot 50% beperkt worden. Hierbij is er telkens voor gezorgd dat het verlies aan groenestroomproductie wordt gecompenseerd door bijkomende installaties te plaatsen, dus de totale hoeveelheid groene stroom wordt niet geïmpacteerd door de aftopping.

Deze figuur toont dat wanneer gebruik gemaakt wordt van installaties met een vlakker productieprofiel dat dit een positieve invloed heeft op de vollasturen van de flexibiliteitsoplossingen. Enerzijds zorgt de aftopping ervoor dat – voor een zelfde hoeveelheid groenestroomproductie – minder vaak overproductie optreedt. Dit wordt duidelijker weergegeven in Tabel 4, die een detail van Figuur 28 weergeeft bij de lagere aandelen hernieuwbare productie. Bij een aangroei van HE van 0,1 zien we bijvoorbeeld dat voor een zelfde hoeveelheid groenestroomproductie, overproductie optreedt bij de huidige stand van de technologie, terwijl er bij een aftopping van 50% geen overproductie is. Tabel 5 toont dan weer de nodige capaciteit aan flexibiliteit die hiermee overeenkomt, en vertelt hetzelfde verhaal: bij vlakkere productieprofielen is er minder nood aan flexibele capaciteit, dus minder nood aan investeringen in batterijen, DSM, power-to-gas ...

Figuur 28



Figuur 28: het verloop van de 'vollasturen' van de overproductie uit zon en wind, in functie van een toenemend aandeel aan hernieuwbare energie

Tabel 4: Detail van Figuur 28 bij lagere aandelen hernieuwbare energie; vollasturen in functie van aandeel HE en aftopping

[h]	Aftopping productie				
Groeï HE	0%	10%	25%	33%	50%
0	0	0	0	0	0
0,05	0	0	0	0	0
0,1	5	4	3	2	0
0,15	12	12	9	8	5
0,2	29	29	22	18	13
0,25	56	56	45	38	28

Tabel 5: Benodigde capaciteit aan flexibiliteit in functie van aandeel HE en aftopping bij lagere aandelen aan HE; in GW

[GW]	Aftopping productie				
Groeï HE	0%	10%	25%	33%	50%
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0,05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0,1	0.6	0.5	0.4	0.3	0.0
0,15	1.2	1.1	0.9	0.9	0.4
0,2	1.8	1.6	1.5	1.4	0.8
0,25	2.4	2.2	2.0	1.9	1.3

Indien we bij hogere aandelen aan hernieuwbare productie kijken, dan zien we dat deze trend zich doorzet: de benodigde capaciteit aan flexibele oplossingen blijft lager, máár het aantal vollasturen van deze capaciteit is wel groter. Dit wordt getoond in Tabel 6 en Tabel 7. Flexibiliteitsoplossingen zijn dus later nodig, en in mindere mate, maar wanneer ze geïnstalleerd worden zullen ze sneller rendabel zijn door een grotere benutting.

Tabel 6: Detail van Figuur 5 bij hogere aandelen hernieuwbare energie; vollasturen in functie van aandeel HE en aftopping

Vollasturen [h]	Aftopping productie					
	Groei HE	0%	10%	25%	33%	50%
<b>1</b>		1091	1121	1162	1160	1249
<b>1,05</b>		1146	1177	1225	1232	1340
<b>1,1</b>		1197	1231	1285	1300	1426
<b>1,15</b>		1246	1281	1342	1363	1508
<b>1,2</b>		1291	1329	1395	1424	1584
<b>1,25</b>		1335	1374	1445	1480	1656

Tabel 7: Benodigde capaciteit aan flexibiliteit in functie van aandeel HE en aftopping bij hogere aandelen aan HE; in GW

Vermogen [GW]	Aftopping productie					
	Groei HE	0%	10%	25%	33%	50%
<b>1</b>		11.4	11.1	10.3	9.9	8.2
<b>1,05</b>		12.1	11.7	10.8	10.4	8.7
<b>1,1</b>		12.7	12.3	11.4	11.0	9.1
<b>1,15</b>		13.3	12.9	12.0	11.5	9.6
<b>1,2</b>		14.0	13.5	12.6	12.0	10.1
<b>1,25</b>		14.6	14.1	13.1	12.6	10.5

### A.2.3.1 Optimum

Het spreekt voor zich dat de lagere kost voor flexibiliteitsoplossingen vergeleken moet worden met de hogere kost om bijkomende wind- en PV-installaties te plaatsen. Anderzijds is het verlies aan productie van groene stroom bij aftoppen bij de huidige stand van de technologieën erg beperkt. Bij een halvering van het vermogen gaat minder dan 20% productie verloren, dus voor dezelfde geïnstalleerde capaciteit kan 60% meer groene stroom geproduceerd worden. Of dezelfde hoeveelheid groene stroom geproduceerd worden met een beduidend lagere systeemkost. En zoals aangehaald is de waarde van de verloren groene stroom in de markt lager dan deze van de overblijvende productie omwille van de gelijktijdigheid van wind- en PV-productie.