

# **DE INVLOED VAN DE OGENBLIKKELIJKE ENERGIEMIX VOOR ELEKTRICITEITSPRODUCTIE OP DE OVEREENKOMSTIGE EMISSIES**

Kris Voorspools, Steven Keijers, William D'haeseleer

Katholieke Universiteit Leuven  
Afdeling Toegepaste Mechanica en Energieconversie  
Celestijnenlaan 300A / B-3001 Heverlee  
Kris.Voorspools@mech.KULeuven.ac.be  
William.Dhaeseleer@mech.KULeuven.ac.be

## **ABSTRACT**

Alvorens een energetische of ecologische maatregel te treffen is het nuttig en aan te raden vooraf de impact ervan af te schatten. Alhoewel voor verschillende gevallen dikwijls vuistregels gebruikt worden, is het aan te raden een eenduidige methodologie te volgen. In voorliggend artikel wordt een methodologie en een concreet simulatiemodel besproken waarmee scenario's rond de vraag- en aanbodzijde van elektriciteitsproductie kwalitatief en kwantitatief kunnen geëvalueerd worden. Dit model is nodig omdat a-priori lineaire schattingen niet altijd geldig zijn. Resultaten van elektrische maatregelen hangen sterk af van het elektrisch systeem en de dynamische werking ervan.

Om elektriciteit te leveren, verandert de samenstelling van het aangesproken gedeelte van het centralepark met variaties in de vraag naar elektriciteit. Deze ogenblikkelijke productiemix is bepalend voor de ogenblikkelijke emissies en het ogenblikkelijk energiegebruik. Wat deze ogenblikkelijke en geïntegreerde productiemix precies is hangt in eerste instantie af van de opstartvolgorde van de centrales die op haar beurt bepaald wordt door het gekozen opstartcriterium (bv. minimale kost). Daarnaast zijn er nog andere voorwaarden waaraan het model moet voldoen om de werking van het centralepark accuraat in kaart te brengen, zoals de werking van pompcentrales, de onzekerheid rond revisieplanning, het unit-commitment probleem, betrouwbaarheid van centrales, gascontracten, enzovoort.

Indien evolutieve scenario's worden uitgewerkt moet niet alleen de verandering van de vraag, maar tevens de variatie van het centralepark beschouwd worden. Zo kunnen uitdienstnames van oudere centrales en indienstname van nieuwe eenheden (enerzijds ter vervanging van de uitdienstgenomen eenheden en anderzijds om aan de stijging van de vraag te voldoen) de evolutie van het energiegebruik en de broeikasgasemissies zeer sterk beïnvloeden.

## **1. INLEIDING**

De ogenblikkelijke emissies verbonden aan elektriciteitsproductie variëren met de vraag naar elektriciteit. Afhankelijk van het vraagpeil verandert immers het aantal en de soort centrales die worden aangesproken voor elektriciteitsproductie. Vraagschommelingen tussen dag/nacht, weekdag/weekenddag en winter/zomer geven derhalve aanleiding tot fluctuaties in de ogenblikkelijke emissies. Naast de wijzigingen in emissies tengevolge van een veranderlijke vraag, is ook het wijzigend park oorzaak van veranderingen in emissies. Deze wijzigingen in het park gebeuren zowel op korte termijn (revisies) als op middellange en lange termijn (nieuwe investeringen). Om hiervan een gedetailleerde tijdsafhankelijke evaluatie te maken wordt een programma PROMIX ontwikkeld dat de elektriciteitsproductie op uurbasis modelleert. De input van dit programma bestaat uit het centralepark en het vraagpatroon naar elektriciteit. De output bestaat uit de elektriciteitsproductie, het primair energiegebruik en de emissies voor elk uur en voor elk centraletype.

Dit programma kan gebruikt worden om de impact van mogelijke maatregelen te kwantificeren vooraleer de maatregel daadwerkelijk wordt geïmplementeerd. Ook a-priori "lineaire" schattingen of uitspraken (zoals bv. "elektrische verwarming is niet gunstig", of "oude steenkoolcentrales moeten zo snel mogelijk uit dienst genomen worden") kunnen met dit model gecontroleerd en gekwantificeerd worden.

## **2. METHODOLOGIE VOOR DE MODELLERING VAN DE ELEKTRICITEITSPRODUCTIE : MODEL PROMIX**

### **2.1 Doelstellingen**

Het doel van dit artikel is een methodologie uit te werken met dewelke op een eenvoudige en doorzichtige wijze een correct inzicht verworven kan worden in de invloed van het elektrisch productiesysteem en het vraagpatroon op het energiegebruik en de emissies.

Hierbij komen verschillende aspecten aan bod. Aan de vraagzijde zijn variaties in de vraag naar elektriciteit van belang: een stijging of daling van de vraag of een verschuiving van de vraag van normale naar stille uren die allen het gevolg kunnen zijn van maatregelen of van substitutie tussen technologieën. Aan de aanbodzijde worden wijzigingen in het centralepark onderzocht: uitdienstname van oudere centrales en indienstname van nieuwe investeringen. Naast deze enkelvoudige maatregelen treden ook combinaties van beiden op; namelijk vraagvariaties die een aanpassing van het centralepark induceren.

Hoewel in de studie voorbeelden worden uitgewerkt om de methodologie te "demonstreren", maken deze geen deel uit van de uiteindelijke doelstelling waarin enkel een sluitende methodologie wordt voorop gesteld.

### **2.2 Randvoorwaarden en hypothesen**

- België wordt gesimuleerd als een punt waar alle elektriciteit wordt geproduceerd en gebruikt. Het is immers onmogelijk te achterhalen welke elektriciteit precies van welke centrale komt. Door dit puntmodel wordt gerekend in "verantwoordelijkheid". Elke gebruiker draagt een gedeelde verantwoordelijkheid in de totale elektriciteitsproductie. De verliezen ten gevolge van transmissie en distributie kunnen achteraf in rekening gebracht worden met behulp van correctiefactoren, afhankelijk van de aard van de klant (hoog- of laagspanning).

- Het vraagpatroon wordt ingegeven op basis van uurgemiddelden van de vraag voor een heel jaar. Het centralepark is eveneens een invoerbestand dat bestaat uit de samenstellende productie-eenheden. Zowel het centralepark als het vraagpatroon zijn voor PROMIX *exogene variabelen*. Dit is een bewuste keuze geweest om het inzicht in de optredende fenomenen gemakkelijk te kunnen isoleren en gerichte parameterstudies mogelijk te maken.
- De gascontracten worden voldaan met de nieuwste STEG eenheden.
- De emissies en het energiegebruik van warmtekrachtkoppeling wordt ingerekend op basis van een allocatie die de emissies "eerlijk" verdeeld over de geproduceerde warmte en elektriciteit (zie Lhomme et al., [1]).
- Er worden alleen directe emissies in rekening gebracht. Indirecte bronnen van emissies verbonden aan investeringsgoederen en de brandstofcyclus zijn bewust niet opgenomen teneinde de oorsprong van de emissies gemakkelijker te kunnen achterhalen. (Rekening houden met de indirecte emissies zou slechts een kleine ingreep in het programma vergen.)

### 2.3 Noodzakelijk input model

Voor een nauwgezette simulatie van de elektriciteitsproductie zijn gedetailleerde gegevens nodig over de vraag en het geheel van centrales.

Voor de vraag worden de gemiddelde uurwaarden van 1996 gebruikt. Dit patroon wordt gebruikt om de "vorm" van de vraag te kennen. Voor andere jaren wordt dit patroon vermenigvuldigd met een factor om de evolutie van de vraag in rekening te brengen. Voor historische vraagprofielen kunnen hiervoor de gekende jaartotalen in acht genomen worden. Voor toekomstige profielen moet een schatting gemaakt worden van de groei van de vraag. Deze groei kan gevarieerd worden in de vorm van scenario's.

Voor het centralepark worden gedetailleerde gegevens van alle afzonderlijke centrales gebruikt. Deze gegevens bestaan uit de werkingskarakteristiek van de centrale, de gebruikte energiebron (met de daaraan verbonden kostprijs en emissies), de betrouwbaarheid van de centrale en de tijd die jaarlijks nodig is voor revisie. De werkingskarakteristiek van een centrale, of het energiegebruik in functie van de activeringsgraad van de centrale, wordt schematisch weergegeven in Figuur 1. De nodige gegevens zijn het nullastverbruik en voor elke "schijf" het marginaal energiegebruik.

### 2.4 Criteria voor de modellering van de productiemix

#### 2.4.1 OPSTARTCRITERIA

Om te bepalen welke centrales op welk ogenblik best geactiveerd worden teneinde aan de opgelegde vraag naar elektriciteit te voldoen, zijn opstartcriteria nodig. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden zoals minimale brandstofkost, minimale broeikasgasemissies, minimaal energiegebruik, enzovoort.

Belangrijk is echter dat een specifiek productiesysteem zelf ook reeds ontworpen is volgens een bepaald criterium en dat een uitbating volgens een ander criterium vaak niet realistisch is.

#### 2.4.2 BIJKOMENDE CRITERIA

Naast het gekozen opstartcriterium zijn er nog een aantal bijkomende criteria waaraan het centralepark en dus ook het model moeten voldoen. De belangrijkste criteria worden hieronder besproken.

- Sommige centrales werken vrijwel continu in basislast. Dit kan zijn omwille van lage werkingskosten of contractuele overeenkomsten. In de Belgische context zijn nucleaire centrales typische centrales voor

basislast. Daarnaast kunnen STEG's onder gascontract ook als basislast beschouwd worden. Bronnen waarvan de energie hoe dan ook door het net moet opgenomen worden (hernieuwbare bronnen, WKK, hoogovengas en cokesovengas), kunnen ook als basislast beschouwd worden.

- Het elektrisch systeem is in realiteit geen computermodel maar een verzameling machines met elk zijn technologische beperkingen.

Vele centrales hebben een minimaal werkingspunt waaronder ze niet gebruikt worden. Dit betekent dat wanneer een centrale dit punt bereikt een keuze moet gemaakt worden: ofwel wordt de centrale afgeschakeld voor een zekere tijd, ofwel blijft ze op dit punt werken en wordt gemoduleerd met andere eenheden. Grote steenkoolcentrales bijvoorbeeld hebben een minimaal werkingspunt van ongeveer 30% van vollast en worden enkel stilgelegd voor periodes groter dan 24 uur.

Nog een beperking is de dynamische respons van de centrales. Deze wordt niet in rekening gebracht in ons model omdat het op uurbasis werkt en de geïntegreerde responstijd van netgekoppelde eenheden in de meeste gevallen kleiner is dan een uur.

## 2.5 Modelling van de elektriciteitsproductie

De concrete modellering van de elektriciteitsproductie werd uitgewerkt voor de Belgische context. De samenstelling van het Belgische centralepark wordt weergegeven in Tabel 1 voor 1997 en 2005. Voor 2005 wordt het uitrustingsplan gebruikt. In de huidige context weten we weliswaar dat dit uitrustingsplan wellicht niet meer strikt zal gevolgd worden (vooral in het licht van de liberalisering van de markt), maar als voorbeeld wordt toch dit plan gevolgd.

Naast de eenvoudige sortering van alle schijven volgens het eerder besproken sorteringcriterium moet er in het model met bijkomende fenomenen rekening gehouden worden. Deze worden nu kort besproken.

### 2.5.1 POMPCENTRALES

Pompcentrales zijn bedoeld om de vraag naar de centrales toe af te vlakken. Bij lagere vraag naar elektriciteit (bv. 's nachts) pompen de pompcentrales water naar grotere hoogte (potentiële energie). De pompen worden aangedreven door elektriciteit van andere centrales. Bij periodes van hogere vraag wordt dit water terug naar lagere hoogtes geturbineerd (omzetten van potentiële energie in elektriciteit). Dit betekent dat de pompcentrales zowel klant (tijdens pompen) als leverancier (tijdens turbineren) zijn. Hierdoor is het moeilijk om de pompcentrales te modelleren als "centrale" en wordt ervoor geopteerd de pompcentrales te simuleren als een correctie van de vraag voor de andere centrales. Deze ingreep wordt *schematisch* weergegeven in Figuur 2. In het model PROMIX wordt deze correctie, of afvlakking van de vraag, voor elke dag berekend aan de hand van de grootte en de vorm van het vraagprofiel, de hoeveelheid energie die gebruikt wordt om op te pompen en de overeenkomstige hoeveelheid energie die kan geturbineerd worden (aan de hand van het rendement van de pompcentrale).

### 2.5.2 REVISIE

Hoewel de geplande revisie van centrales gemakkelijk kan gemodelleerd worden, zijn hier toch enkele problemen aan verbonden.

Ten eerste zijn de revisies, ondanks de vooraf opgestelde planning, vrij onvoorspelbaar. Omwille van onvoorziene omstandigheden kan de revisie van een bepaalde centrale enkele weken worden vervroegd of uitgesteld, waardoor de daarop volgende planning herzien moet worden. Ten tweede is het niet wenselijk dat de resultaten sterk afhankelijk zijn van deze revisieplanning. Bij vergelijking van twee scenario's met verschillende revisieplanning is het niet altijd mogelijk de invloed van de revisieplanning en die van het scenario zelf nog te isoleren. De invloed van de revisieplanning zelf kan heel groot zijn. Het al dan niet in revisie zijn van een grote nucleaire centrale bijvoorbeeld heeft een enorme impact op de ogenblikkelijke

emissies: in het geval van een nucleaire revisie moet die productie immers overgenomen worden door fossiel gestookte centrales.

Om deze problemen tegemoet te komen is PROMIX in staat een gemiddelde revisieplanning te berekenen, waarbij de resultaten onafhankelijk zijn van één specifieke planning. Alhoewel PROMIX eveneens een willekeurige revisieplanning kan opstellen of zelfs met een door de gebruiker ingegeven planning kan rekenen, worden deze opties afgeraden omwille van de hoger opgetekende bezwaren. Om toch de invloed van de revisieplanning mee in rekening te brengen wordt de spreiding ten opzichte van de gemiddelde planning opgenomen in de analyse van de onzekerheden (zie §2.5.4).

### 2.5.3 UNIT COMMITMENT

Eerder werd reeds bij de technische beperkingen (zie §2.4.2) van de centrales besproken dat er, wanneer een centrale zijn minimaal werkingpunt bereikt, een keuze moet gemaakt worden of deze centrale al dan niet wordt afgeschakeld. In de praktijk gebeurt deze beslissing op basis van ervaring. Indien verwacht wordt dat de vraag weldra terug zal toenemen, dan wordt de centrale verder gebruikt op dit minimale werkingpunt. Als verwacht wordt dat de vraag gedurende een iets langere periode laag zal blijven, dan kan de centrale uitgeschakeld worden. Dergelijke randvoorwaarden worden doorgaans "unit commitment" genoemd.

In België heeft unit commitment vooral impact op grote steenkoolcentrales die ook wel "semi-basislast" centrales zouden kunnen genoemd worden. Omdat in PROMIX de vraag naar elektriciteit gekend is (exogene input) kan dit probleem eenvoudig gemodelleerd worden. De parameters die hiervoor beschouwd moeten worden zijn het minimaal werkingpunt van de beschouwde centrale, de minimale periode waarover een centrale niet terug opgestart zal worden na afschakeling en het vraagprofiel. Omdat in realiteit de voorkennis van de vraag niet aanwezig is, wordt niet noodzakelijk dezelfde beslissing genomen. De onzekerheid die hieromtrent heerst wordt opgenomen in de bespreking van de onzekerheden (zie §2.5.4).

### 2.5.4 ONZEKERHEDEN EN SPREIDING

Omdat resultaten weinig betekenis hebben zonder onzekerheidsmarges, worden verschillende bronnen van onzekerheid gekwantificeerd. Deze bronnen van onzekerheid zijn ofwel inherent aan elektriciteitsproductie zelf, ofwel veroorzaakt door de modellering. Hieronder worden de belangrijkste bronnen van onzekerheid besproken.

Omwille van de onvoorspelbaarheid van de *revisieplanning* (zie hoger in §2.5.2) en omdat in PROMIX best met de gemiddelde revisieplanning wordt gerekend, wordt de onzekerheid ten gevolge van deze revisieplanning opgenomen in de spreiding op de resultaten. Hiervoor wordt een groot aantal mogelijke revisieplanningen ingevuld in PROMIX. Dit resulteert in een waaier van oplossingen, waaruit een gemiddelde waarde en een spreiding op dat gemiddelde kunnen berekend worden. Voor de totale CO<sub>2</sub>-emissies vinden we zo op jaarbasis (voor 1997) een standaarddeviatie ten gevolge van de revisieplanning van 2 tot 3%.

Een andere oncontroleerbare parameter is de *onvoorspelbare uitval van een centrale*. In PROMIX wordt deze onvoorspelbare uitval uitgesmeerd over het hele jaar. In de praktijk is de uitval natuurlijk sterk gelokaliseerd. De onzekerheid op deze uitval wordt eveneens berekend als een spreiding rond de gemiddelde waarde. Voor 1997 vinden we hiervoor een standaarddeviatie op de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van 2%.

Naast deze twee bronnen van onzekerheid die onlosmakelijk verbonden zijn aan elektriciteitsproductie zelf worden ook andere bronnen van onzekerheid in rekening gebracht die door het model worden veroorzaakt. Omdat het model op uurbasis werkt, kunnen *kleine fluctuaties binnen het uur* niet gesimuleerd worden. Ook het verschil tussen de berekende *unit commitment* en de praktisch uitgevoerde (zie hoger in §2.5.3) kan niet gemodelleerd worden. Tenslotte is er ook nog de onzekerheid op de *werking van de WKK*. In de praktijk is er centraal geen controle over de werking van de WKK eenheden omdat deze warmte gedreven en procesgebonden is. Al deze bronnen van onzekerheden worden statistisch bekeken en gekwantificeerd.

Voor 1997 resulteren ze samen in een standaarddeviatie van minder dan 1% op de totale CO<sub>2</sub>-emissies, hetgeen beduidend kleiner is dan de onzekerheden die inherent zijn aan elektriciteitsproductie.

Samenvattend bedraagt de globale gemiddelde onzekerheid voor 1997 (uigedrukt in een standaarddeviatie  $\sigma$ ) 3 tot 4% die bijna volledig (meer dan 90%) veroorzaakt wordt door onzekerheden die inherent zijn aan elektriciteitsproductie.

### 2.5.5 MARGINAAL VERSUS INCREMENTEEL

Onder een "marginale" grootheid wordt de verandering van de betreffende grootheid (bijvoorbeeld energiegebruik of emissies) verstaan bij een toename van een eenheid geproduceerde energie (wiskundig is dit de afgeleide naar de geproduceerde energie). Deze marginale grootheid verloopt erg grillig in de tijd en is daardoor niet bruikbaar als beslissingscriterium.

Wanneer gesproken wordt over "incrementele" veranderingen worden wijzigingen bedoeld over een schaal van enkele schijfgroottes (ordegrootte 100 MW). Het betreft dus substantiële veranderingen ten opzichte van een referentietoestand. In de incrementele grootheden worden de fluctuaties van de marginale grootheden uitgemiddeld.

## 2.6 Typische output van PROMIX

PROMIX berekent hoe een gegeven centralepark reageert op een gegeven vraagprofiel. Voor elk type van centrale wordt hieruit voor elk uur van het jaar (dus 8760 waarden) berekend wat de geleverde elektriciteit is en hoeveel energiegebruik en emissies hiermee overeenkomen. Om deze output visueel aanschouwelijk te maken wordt de voorstellingswijze van Figuur 3 gebruikt, waarop de resultaten voor de volledige elektriciteitsproductie worden getoond. De bovenste figuur stelt de elektriciteitsproductie voor, de middelste het totaal centralerendement en de onderste de specifieke broeikasgasemissies. Elk van de figuren geeft eigenlijk een 365\*24 matrix weer. Vertikaal wordt van boven naar onder het jaar doorlopen (van 1 januari tot 31 december) en horizontaal van links naar rechts de week (van maandag 06:00h tot maandag 05:00h). Het voorbeeld dat hier wordt gegeven komt uit een simulatie voor 1997.

Op deze visuele weergave van de output blijkt duidelijk hoe het rendement en de broeikasgasemissies variëren met de elektriciteitsproductie doorheen het jaar.

Het geïntegreerd centralerendement is lager naarmate het relatief aandeel van de nucleaire centrales groter is, hetgeen voornamelijk in de weekends voorkomt. Doorheen de seizoenen zijn de fluctuaties kleiner. Dit komt omdat de globale daling van de vraag 's zomers gepaard gaat met revisies van grote nucleaire centrales. Deze daling van de vraag gaat bijgevolg gepaard met een daling van de productie vanwege de nucleaire eenheden waardoor hun totale relatieve aandeel in de productiemix niet sterk wijzigt.

De broeikasgasemissies blijken vooral sterk te variëren doorheen de week, waarbij vooral het contrast tussen de dag en de nacht opvalt. Het is dan immers dat sterk gemoduleerd wordt op grote steenkooleenheden die gepaard gaan met hoge emissies.

Output zoals weergegeven in Figuur 3 wordt gegenereerd voor alle types van centrales. Figuur 4, bijvoorbeeld, geeft de visuele weergave van de werking van de steenkoolcentrales. Hieruit blijkt inderdaad, zoals reeds hierboven vermeld, dat bij de overgang tussen dag en nacht sterk wordt gemoduleerd op steenkoolcentrales. Bij deze modulatie daalt het centralerendement met enkel procentpunten waardoor de specifieke emissies toenemen.

Figuur 5 toont welke verantwoordelijk elke energiedrager heeft in de elektriciteitsproductie, het primair energiegebruik en de broeikasgasemissies. Uit dit voorbeeld voor 1997 blijkt dat de nucleaire centrales 57%, de steenkoolcentrales 21% en de STEG's 12% van de elektriciteitsproductie voor hun rekening nemen. Voor het gebruik in primaire energie wordt dit respectievelijk 60%, 22% en 9%. Bij de emissies van broeikasgassen komen de nucleaire centrales niet meer voor. De steenkoolcentrales zijn verantwoordelijk voor 60% van de broeikasgassen en de STEG's voor 15%. Hoogovengas, dat in de productie nauwelijks

voorkomt (minder dan 4%) zorgt toch voor behoorlijk wat broeikasgassen (meer dan 10%) door de hoge emissiecoëfficiënt van hoogovensgas.

### **3. PRAKTISCH GEBRUIK VAN HET MODEL PROMIX; ENKELE TOEPASSINGSVOORBEELDEN**

Om het gebruik en het nut van PROMIX in praktische toepassingen en reële vraagstukken te demonstreren worden twee toepassingsvoorbeelden besproken. Het eerste voorbeeld *ontrafelt* de evolutie van 2003 naar 2004; het tweede voorbeeld bespreekt de evaluatie van specifieke elektrische toepassingen.

#### **3.1 Overgang 2003 → 2004**

Bij de overgang van 2003 naar 2004 verandert de elektrische context. Enerzijds evolueert de vraag en anderzijds wordt het centralepark aangepast (de belangrijkste veranderingen zijn dat twee oudere steenkoolcentrales uit dienst worden genomen en dat er een nieuwe STEG wordt gebouwd). Door deze evolutie veranderen eveneens het energiegebruik en de broeikasgasemissies. Met PROMIX kan worden nagegaan wat de invloed is van de verschillende parameters door ze afzonderlijk te laten variëren. Het "beginscenario" is dat van 2003, namelijk met het centralepark en de vraag van 2003. Het "eindscenario" is dat van 2004, dus met het centralepark en de vraag van 2004. Daartussen worden enkele tussenstappen gesimuleerd. In twee scenario's wordt de vraag invariant verondersteld, maar evolueert het park wel. In het eerste scenario wordt alleen een nieuwe STEG bijgebouwd, in het tweede worden ook de oudere centrales uit dienst genomen. Aan de hand van deze twee scenario's kan achterhaald worden wat de invloed van de evolutie van het centralepark is. In nog een ander scenario wordt de vraagstijging van 2003 naar 2004 enkel beantwoord met de bouw van een nieuwe STEG, zonder uitdienstname van oudere eenheden. De resultaten voor al deze scenario's worden weergegeven in Tabel 2 (voor gedetailleerde beschrijving en uitwerking van deze scenario's wordt verwezen naar Keijers et al. [3]). De uitleg die bij deze scenario's hoort wordt schematisch en sterk vereenvoudigd voorgesteld in Figuur 6. Deze figuur stelt de vraagmonotoon voor en geeft weer hoe deze met de beschikbare centrales wordt *opgevuld*. In realiteit, en ook in de simulaties, is de opvulling veel complexer dan wordt voorgesteld in Figuur 6, maar om de optredende trends te verklaren is deze figuur een duidelijk en overzichtelijk hulpmiddel.

Uit Tabel 2 blijkt dat in het scenario met de vraag van 2003 en het centralepark van 2003 waaraan een STEG wordt toegevoegd minder CO<sub>2</sub> uitgestoten dan in het geval was in 2003. Op de schets van Figuur 6a wordt duidelijk dat dit komt doordat deze nieuwe STEG erg laag komt in de opstartvolgorde en daardoor de hoger gelegen centrales "verdringt". Hierdoor verdwijnt een gedeelte van de hoger gelegen centrales uit de productiemix. Deze centrales (grotendeels klassieke steenkool-, gas- en oliecentrales) hebben een hogere CO<sub>2</sub>-uitstoot dan de nieuwe STEG die hen verdringt zodat de totale CO<sub>2</sub>-emissies dalen.

Indien ook nog oudere klassieke steenkoolcentrales mee uit dienst worden genomen (dit is het geval in het scenario met de vraag van 2003 en het centralepark van 2004), dan blijkt de daling in emissies zelfs nog groter. Uit Figuur 6b blijkt dat dit komt doordat een gedeelte van de door de STEG verdrongen centrales terug in de productiemix worden opgenomen om het verdwijnen van die steenkoolcentrales te compenseren. In de praktijk is dit een mengeling van klassieke centrales en piekcentrales die steenkool-, olie of gasgestookt zijn en globaal lagere emissies hebben dan de uit dienst genomen steenkoolcentrales.

Indien we dezelfde twee scenario's uitvoeren, maar ditmaal gecombineerd met de evolutie van de vraag, dan wordt op de voorgaande beschouwingen rond verdringing het effect van de vraagstijging gesuperponeerd. Door de stijging van de vraag is tevens meer productie nodig die voor bijkomende emissies zal zorgen. Indien echter deze vraagstijging gecombineerd wordt met de indienstname van een STEG, dan wordt dit effect gemilderd door het eerder besproken verdringingseffect. Dit blijkt uit het scenario met de vraag van 2004 en het centralepark van 2003 dat uitgebreid wordt met een STEG. Er is weliswaar een stijging in

emissies, maar deze is zeer beperkt (ongeveer 100 kg<sub>CO2</sub> per bijkomende MWh). Indien ook nog oudere steenkoolcentrales mee uit dienst genomen worden (dus met het centralepark van 2004), dalen de emissies netto zelfs ten opzichte van 2003 (daling met ongeveer 160 kg<sub>CO2</sub> per bijkomende MWh). Deze effecten worden eveneens visueel weergegeven in Figuur 6c en Figuur 6d.

Voor de voorgestelde evolutie van 2003 naar 2004 kan bijgevolg gesteld worden dat ten gevolge van de evolutie van de vraag de emissies toenemen, en dat ten gevolge van de indienstname van een STEG en de uitdienstname van oudere steenkoolcentrales de emissies afnemen. In dit concrete voorbeeld haalt de laatste gunstige invloed de bovenhand.

### 3.2 Evaluatie van elektrische toepassingen

Bij de evaluatie van elektrische toepassingen kunnen twee vragen gesteld worden. "Wat zijn de emissies van een bestaande elektrische toepassing", en "Wat is de impact van een verandering in het gebruik van die toepassing".

#### 3.2.1 GEWOGEN GEMIDDELDE UITSTOOT

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van een elektrische toepassing op een bepaald moment is de uitstoot van het gemiddelde centralepark op datzelfde moment. Het is immers onmogelijk te achterhalen welke gebruiker verantwoordelijk is voor de activering van elke productieschijf, zodat best gerekend kan worden in een *gedeelde verantwoordelijkheid* in de totale productie. Om de volledige uitstoot van die toepassing te kennen over het hele jaar wordt een gewogen gemiddelde genomen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het centralepark doorheen het jaar. De weging gebeurt volgens het onmiddellijk afgenomen vermogen van de toepassing als functie van de tijd:

$$C = \frac{\sum_h^{8760} C_h \cdot P_h}{\sum_h^{8760} P_h}$$

Met  $C$  : CO<sub>2</sub>-eq. uitstoot toegeschreven aan de vraag van de toepassing (g/kWh<sub>toepassing</sub>)  
 $C_h$  : de ogenblikkelijke CO<sub>2</sub>-eq. uitstoot van het centralepark op uur  $h$  (g/kWh<sub>elektrisch</sub>)  
 $P_h$  : de ogenblikkelijke vraag van de toepassing op uur  $h$  (kW<sub>toepassing</sub>)

Bij een gegeven elektrische toepassing, met een gegeven gebruiksprofiel  $P_h$ , kan met de resultaten van PROMIX (waaronder alle waarden voor de ogenblikkelijke emissies  $C_h$ ) de gewogen gemiddelde uitstoot  $C$  berekend worden.

#### 3.2.2 INCREMENTELE UITSTOOT

Als men twee opties met elkaar vergelijkt (bv. toestand met en zonder weerstandsverwarming) moet men ten volle rekening houden met alle verschillen tussen beide opties. In eerste instantie verandert uiteraard het totale elektrische vraagpatroon. Indien een toepassing gepromoot, verboden of gesubstitueerd wordt, dan manifesteert deze verandering zich in het vraagpatroon. Indien de wijziging van de vraag groot genoeg is, zal bovendien een bijsturing van het centralepark mogelijk of noodzakelijk zijn.

Hoewel het theoretisch mogelijk is een *ogenblikkelijke* substitutie, promotie of verbod van elektrische toepassingen door te rekenen, is het in de praktijk niet mogelijk deze actie door te voeren. Daarom wordt enkel een *substitutie op termijn* besproken. Voor de substitutie op termijn zijn drie toestanden van belang: de basistoestand, de referentietoestand en de alternatieve toestand. De basistoestand stelt het vertrekpunt voor. Het referentiescenario geeft de evolutie weer zoals die verwacht mag worden zonder ingreep (evolutie van de basistoestand naar de referentietoestand). Het alternatieve scenario tot slot beschrijft de evolutie

waarbij de promotie, het verbod of de substitutie van de elektrische toepassing wordt doorgevoerd (van de basistoestand naar de alternatieve toestand). Om de invloed van de actie na te gaan kunnen het referentie- en het alternatieve scenario onderling vergeleken worden. De methodologie van de substitutie op termijn wordt schematisch weergegeven in Figuur 7. Alle scenario's kunnen volledig met PROMIX worden doorgerekend.

### 3.2.3 TOEPASSINGSVOORBEELD : DIRECTE ELEKTRISCHE VERWARMING

Om de methodiek ter evaluatie van elektrische toepassingen te demonstreren wordt directe elektrische weerstandsverwarming als toepassingsvoorbeeld gekozen. Eerst wordt de gewogen gemiddelde uitstoot van de huidige weerstandsverwarming berekend, daarna worden scenario's besproken waar deze vorm van verwarming verboden of verder gepromoot wordt. Voor gedetailleerde beschrijving en uitwerking van deze scenario's wordt verwezen naar Voorspools et al. [4].

#### 3.2.3.1 Emissies verbonden aan klassieke vormen van fossiel gestookte centrale verwarming

Om de volgende resultaten in de juiste context te kunnen plaatsen worden in Tabel 3 de emissies geschat die verbonden zijn aan klassieke centrale verwarmingssystemen. Alhoewel bij dergelijke systemen de ketelrendementen vrij hoog kunnen zijn (ordegrootte 90%), is het totaal systeemrendement lager ten gevolge van allerhande verliezen (stilstandverliezen van de ketel, leidingverliezen, ...).

Deze klassieke systemen maken echter geen deel uit van deze studie waar alleen elektrische opties worden bekeken. De waarden van Tabel 3 worden enkel gebruikt om een ruwe grootteorde te kennen. We onthouden emissies van 300 tot 600 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>warmtevraag</sub>.

#### 3.2.3.2 Gewogen gemiddelde uitstoot directe weerstandsverwarming

De vraag naar elektriciteit voor directe weerstandsverwarming wordt geschetst vanuit de profielen van de buitentemperatuur. De elektriciteitsvraag vanwege directe weerstandsverwarming wordt weergegeven in Figuur 8. Ook op deze figuur staan 8760 punten. De bovenste punten stellen de dagvraag voor; de onderste de vraag 's nachts.

Voor het jaar 1997, en voor de veronderstellingen hierboven omschreven, berekent PROMIX een gewogen gemiddelde CO<sub>2</sub>-uitstoot van de vraag vanwege directe weerstandsverwarming van 336 g/kWh<sub>el</sub>. Dit is hoger dan de globale jaargemiddelde uitstoot van het volledige centralepark (327 g/kWh<sub>el</sub>) omdat de weerstandsverwarming voornamelijk overdag actief is en er dan een groter fossiel gestookt vermogen actief is dan 's nachts. We veronderstellen dat de weerstandskachels zelf een omzettingsrendement van 100% hebben zodat de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de bestaande weerstandsverwarming eveneens 336 g/kWh<sub>warmte</sub> bedraagt.

In vergelijking met fossiel gestookte centrale verwarming (zie Tabel 3) blijkt dat alleen zeer efficiënte systemen (aardgas  $\eta_{\text{systeem}} > 60\%$  en stookolie  $\eta_{\text{systeem}} > 80\%$ ) gepaard gaan met lagere emissies.

#### 3.2.3.3 Verbod weerstandsverwarming

Omdat het niet realistisch is om alle directe weerstandsverwarming plotseling te vervangen door niet-elektrische verwarming, wordt voor het verbod op weerstandsverwarming een substitutie op termijn gesimuleerd. We nemen hierbij aan dat weerstandsverwarming vanaf nu wordt ontmoedigd of verboden.

Het referentiescenario verloopt zoals verwacht mag worden als de weerstandsverwarming niet wordt verboden of ontmoedigd. Voor de alternatieve evoluties wordt aangenomen dat er in 2005 minder elektrische weerstandsverwarming is opgesteld dan in het referentiescenario. Wij veronderstellen dat alle elektrische vraag vanwege weerstandsverwarming (welke weergegeven wordt in Figuur 8) verdwijnt.

Door deze tragere evolutie van de vraag tegenover die van het referentiescenario (in 2005 goed voor een reductie van de absolute vraagpiek met 330 MW) zal ook het centralepark trager uitgebouwd worden. Hierdoor kan een nieuwe investering, een STEG of een ultra-super-kritische steenkoolcentrale (USK) vermeden worden. Ter vergelijking wordt ook een scenario uitgewerkt dat het uitrustingsplan toch volgt qua investeringsstrategie. De resultaten van de verschillende scenario's worden weergegeven in Tabel 4.

Uit Tabel 4 blijkt dat als dit verbod beantwoordt wordt met het niet bouwen van een nieuwe steenkoolcentrale aan elektrische kant een reductie van ordegrrootte 1000 gCO<sub>2</sub> per verdwenen kWh<sub>el</sub> wordt verwezenlijkt. Deze impact is groot omdat de verandering van de vraag ( $\Delta$ Vraag) enkel tijdens het stookseizoen optreedt (gebruiksduur minder dan 3000 h/a) terwijl de verandering van het centralepark (en de winst in CO<sub>2</sub>-uitstoot) het hele jaar aanwezig is. Deze reductie is beduidend groter dan de emissies van de fossiele alternatieven zodat deze in dit geval duidelijk de voorkeur genieten.

Indien de vraagsturing wordt opgevangen door het niet bouwen van een STEG, stellen we vast dat deze maatregel ongunstig zou zijn met betrekking tot de CO<sub>2</sub>-uitstoot. De totale CO<sub>2</sub>-uitstoot ten gevolge van elektriciteitsproductie stijgt zelfs licht indien we de directe weerstandsverwarming wegnemen. De reden hiervoor is dat het wegvallen van de STEG ook gevolgen heeft op de momenten waarop de weerstandsverwarming niet actief was. Indien we hierbij ook nog de emissies van de vervangende fossiel gestookte verwarming optellen, veroorzaakt dit scenario een duidelijk stijging van de emissies.

Indien toch het uitrustingsplan gevolgd wordt, betekent het verbod op weerstandsverwarming een reductie in emissies van ordegrrootte 500 gCO<sub>2</sub> per verdwenen kWh<sub>el</sub>. Als we hierbij nog de emissies van de fossiel gestookte vervanger optellen kan het netto resultaat positief of negatief zijn, afhankelijk van het rendement van de gekozen fossiele optie.

#### 3.2.3.4 Promotie weerstandsverwarming

Om de promotie van weerstandsverwarming te simuleren veronderstellen we dat weerstandsverwarming vanaf nu wordt aangemoedigd zodat tegen 2005 de elektrische vraag vanwege weerstandsverwarming verdubbelt. Het referentiescenario verloopt zoals verwacht mag worden als de weerstandsverwarming niet wordt gepromoot.

Indien er een groter vermogen nodig is ten gevolge van deze bijkomende vraag vanwege weerstandsverwarming, moet ook het centralepark uitgebreid worden om aan deze extra vraag te kunnen voldoen. We nemen aan dat dit kan gebeuren met een extra STEG of een extra USK. Ter vergelijking wordt ook een scenario uitgewerkt dat het uitrustingsplan toch volgt qua investeringsstrategie. De resultaten van de verschillende scenario's worden weergegeven in Tabel 5.

Uit Tabel 5 blijkt dat de promotie van weerstandsverwarming, indien gecombineerd met het bouwen van een bijkomende STEG, aan elektrische kant de totale emissies nauwelijks toenemen. Deze impact is te verklaren omdat de stijging van de vraag (die een stijging van de emissies veroorzaakt) enkel tijdens het stookseizoen optreedt terwijl de nieuwe STEG het hele jaar present is (en hierdoor oudere centrales verdringt uit de opstartvolgorde). Rekening houdend met de vermeden fossiel gestookt installatie (zie Tabel 3) gaat dit scenario steeds gepaard met een daling van de emissies, en is dus de promotie van weerstandsverwarming gunstig.

Als de promotie van weerstandsverwarming beantwoordt wordt met de bouw van een nieuwe steenkoolcentrale, dan wordt aan elektrische kant een stijging van bijna 1000 gCO<sub>2</sub> per bijkomende kWh<sub>el</sub> veroorzaakt. Rekening houdend met de vermeden fossiel gestookt installatie (zie Tabel 3) gaat dit scenario steeds gepaard met een stijging van de emissies.

Zonder aanpassing van het uitrustingsplan gaat de promotie van weerstandsverwarming gepaard met een toename in emissies van bijna 600 gCO<sub>2</sub> per bijkomende kWh<sub>el</sub>. Het netto resultaat hangt hier ook weer af van het rendement van de vermeden fossiel gestookte installatie.

## 4. BESLUIT

In dit artikel wordt de denkwijze toegelicht die aan de basis ligt voor de ontwikkeling van een model en een methodologie voor de evaluatie van elektriciteitsproductie. Het rekenmodel, PROMIX, zelf berekent met een gegeven elektrische context (productiesysteem en vraag naar elektriciteit) de overeenkomstige

elektriciteitsproductie, het primaire energiegebruik en de emissies voor alle types van centrales. In dit model wordt getracht de werkelijke elektriciteitsproductie nauwgezet te simuleren, waarbij alle randvoorwaarden in de mate van het mogelijke in acht genomen worden (parameters die niet kunnen gesimuleerd worden, worden opgenomen in de onzekerheidsanalyse).

Met dit model kunnen de herkomst van het energiegebruik en de emissies precies aangeduid worden. Ook de impact van de evolutie van het productiepark (de in- en uitdienstname van centrales), al dan niet onder invloed van specifieke maatregelen aan de vraagkant, kan correct geëvalueerd worden.

Om het model te testen en te demonstreren worden twee gevalsstudies uitgewerkt.

In de eerste gevalsstudie wordt de *natuurlijke* overgang van 2003 naar 2004 *ontrafeld*. Hierbij worden de invloeden van de evolutie van de vraag en de aanpassing van het centralepark apart beschouwd om hun afzonderlijke invloed na te gaan teneinde hun gezamenlijke impact te verklaren.

In de tweede gevalsstudie wordt directe elektrische weerstandsverwarming bekeken. Naast de ogenblikkelijke verantwoordelijkheid in broeikasgasemissies worden ook scenario's beschouwd waar elektrische verwarming enerzijds gepromoot en anderzijds verboden wordt. Simulatie van deze scenario's en analyse van de resultaten toont aan dat de invloed van de evolutie van het centralepark, die kan wijzigen ten gevolge van de ingreep aan de kant van de elektrische vraag, erg groot is.

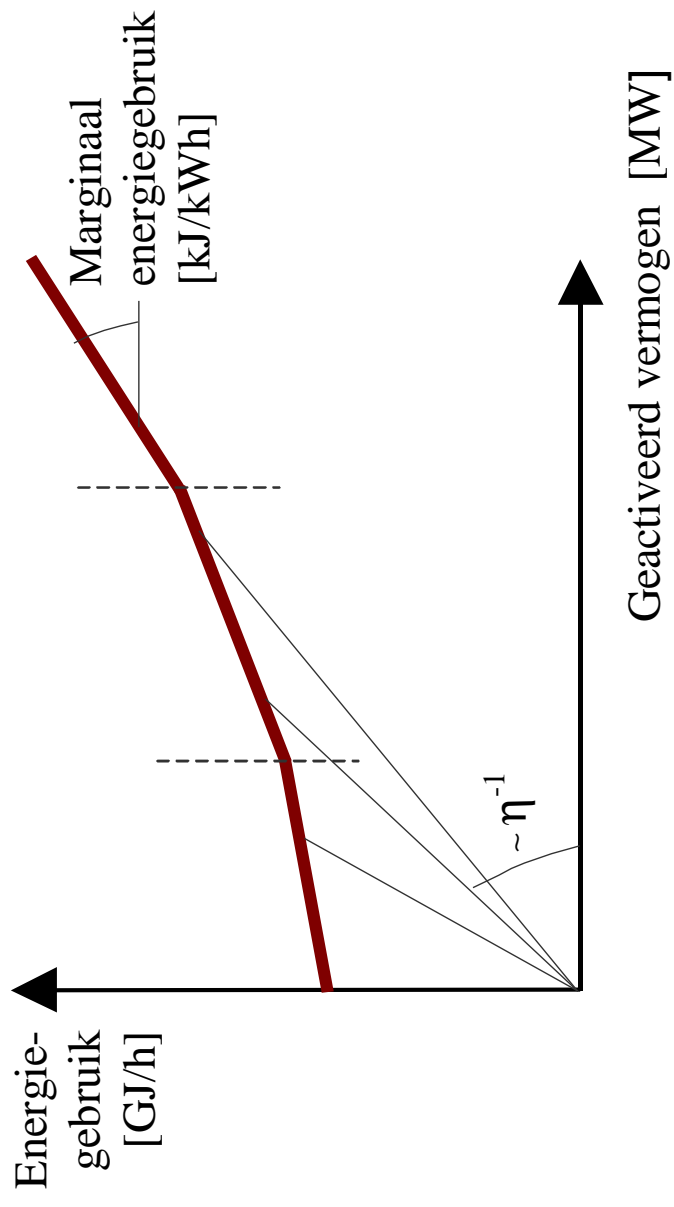


## **REFERENTIES**

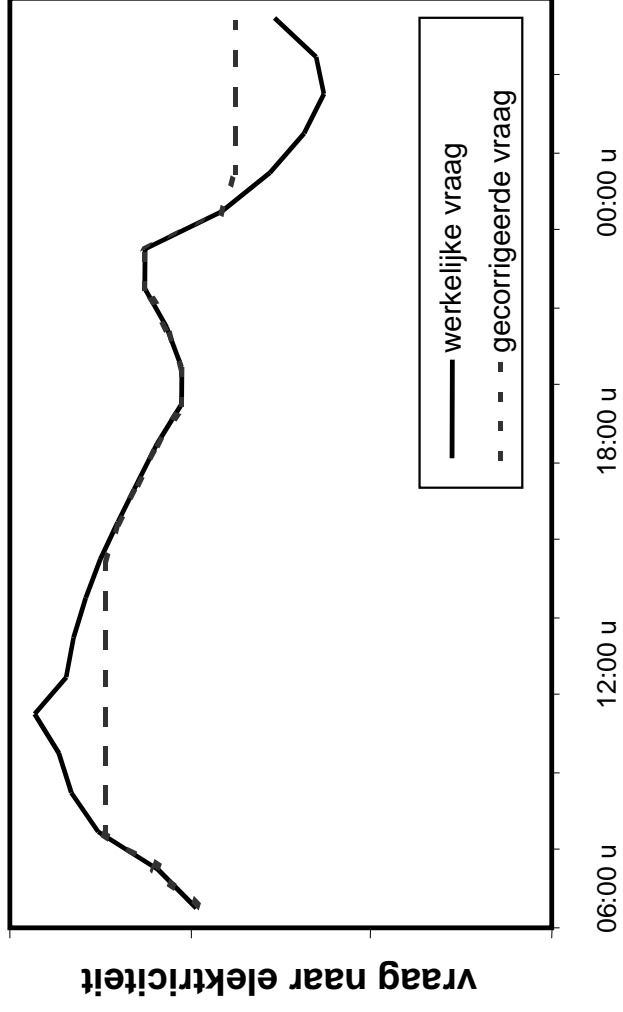
- [1] Lhomme R., Nguyen V., Mathieu Ph., Rapport final dans le cadre du Projet CO<sub>2</sub>, Sous projet 1, Phase 1bis. Université de Liège, Liège, 1997.
- [2] Beheerscomité der elektriciteitsondernemingen, Nationaal uitrustingsprogramma inzake de middelen voor productie en transport van elektrische energie 1995-2005, oktober 1995.
- [3] Keijers S., D'haeseleer W., Invloed van de Belgische productiemix voor elektriciteitsproductie op de CO<sub>2</sub>-uitstoot, TME/WDH/97-10/FIN, eindrapport ingediend in het kader van het EBL-SPE CO<sub>2</sub>-project, Fase 1, 1997.
- [4] Voorspools K., D'haeseleer W., Invloed van de Belgische productiemix voor elektriciteitsproductie op de erdoor veroorzaakte emissies, TME/WDH/98-09/FIN, eindrapport ingediend in het kader van het EBL-SPE CO<sub>2</sub>-project, Fase 1 bis, 1998.



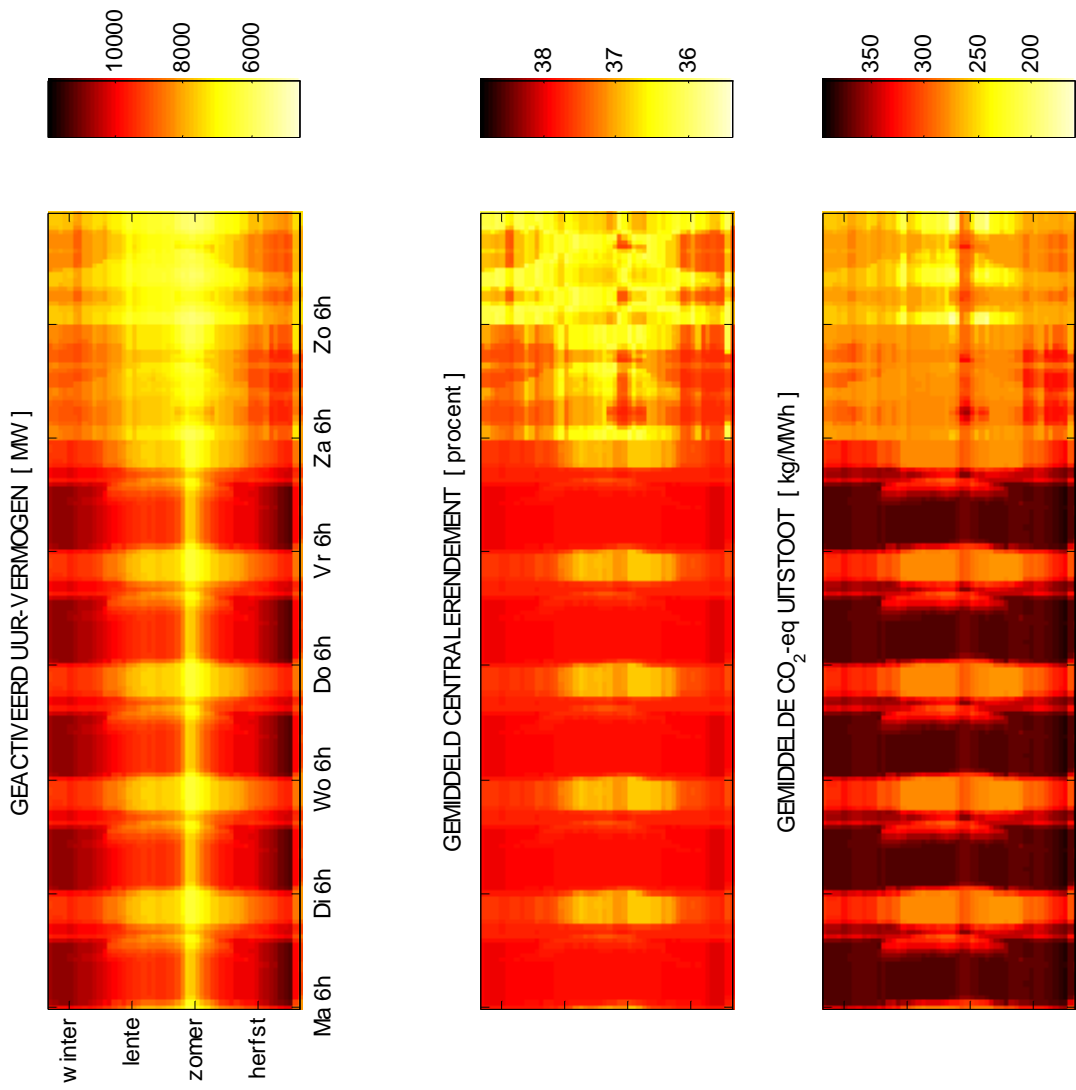
## **TABELLEN & FIGUREN**



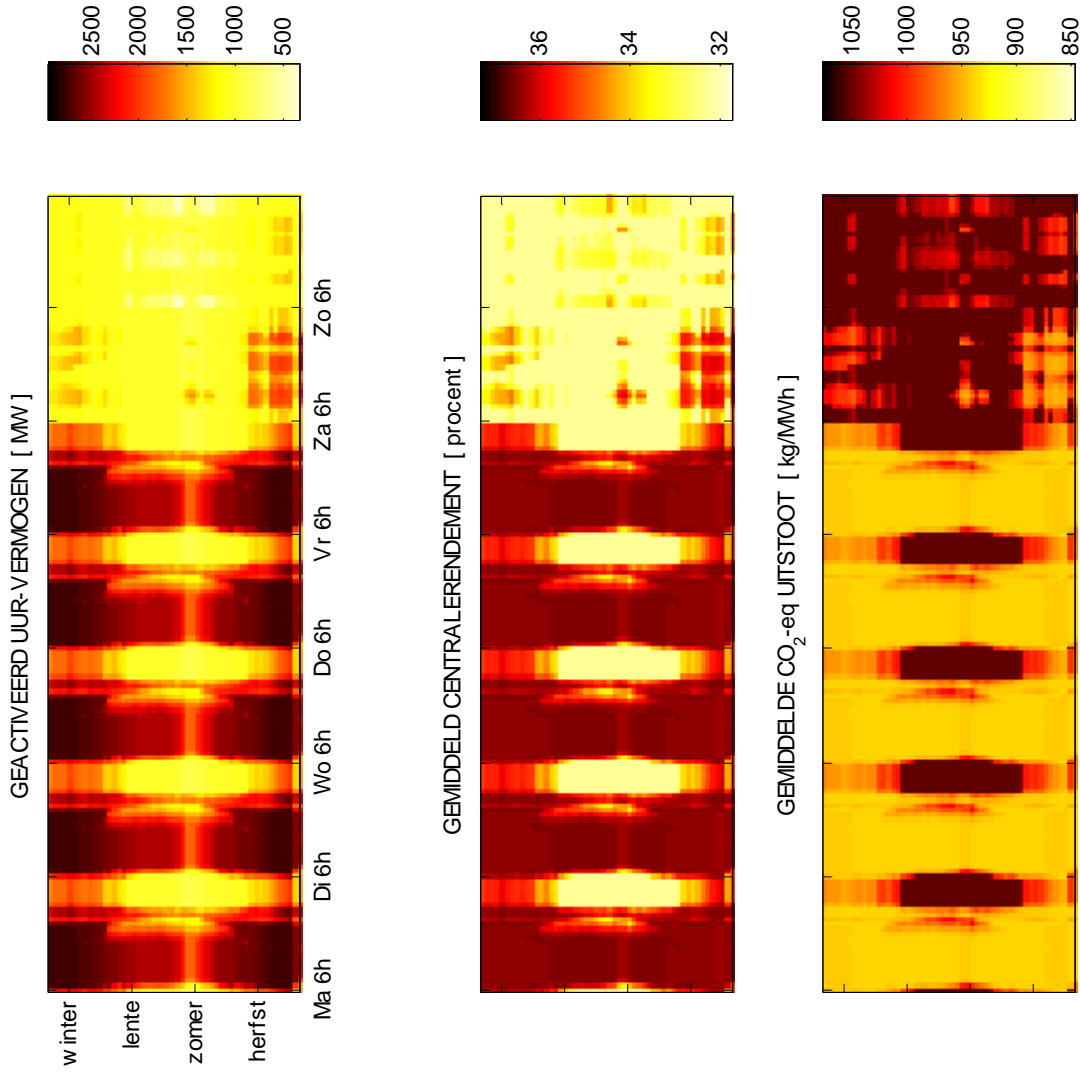
Figuur 1 : Schematische voorstelling van de werkingskarakteristiek van een centrale



Figuur 2 : Simulatie van de pompcentrales aan de hand van een "correctie" aan de vraagzijde

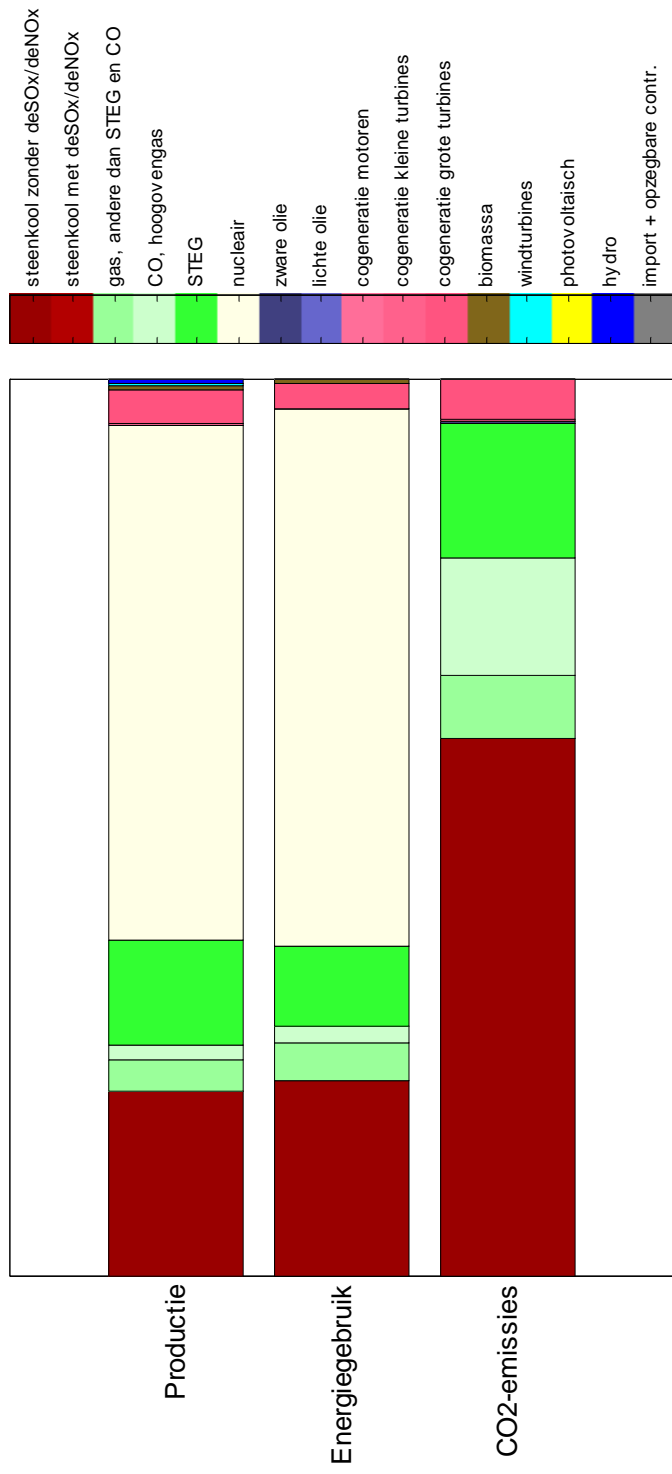


Figuur 3 : Voorbeeld visuele weergave output PROMIX; totale elektriciteitsproductie

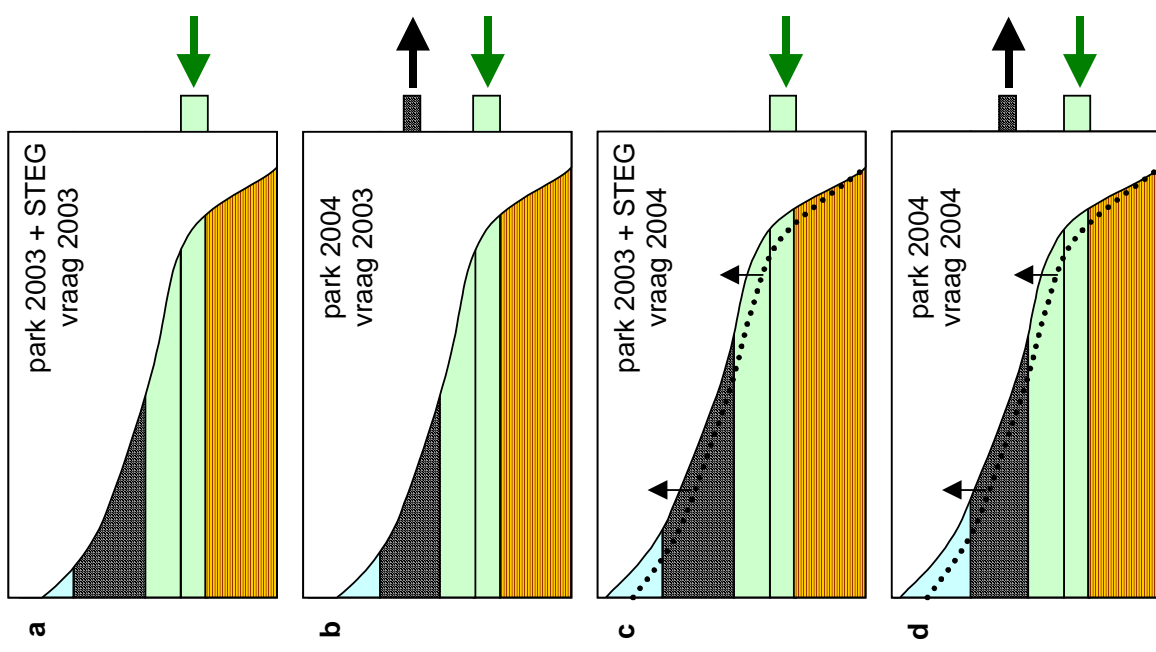
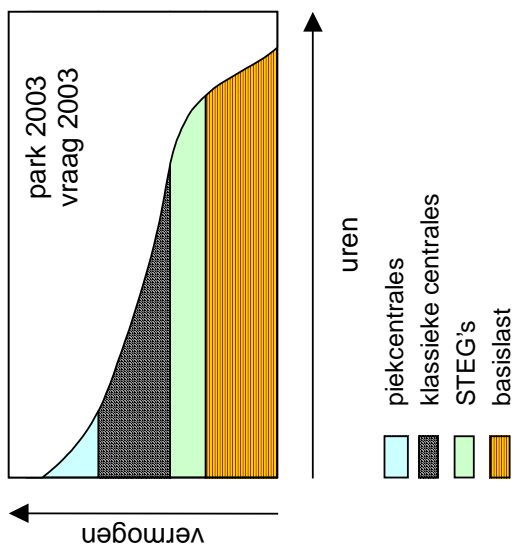


Figuur 4 : Voorbeeld visuele weergave output PROMIX; steenkoolcentrales

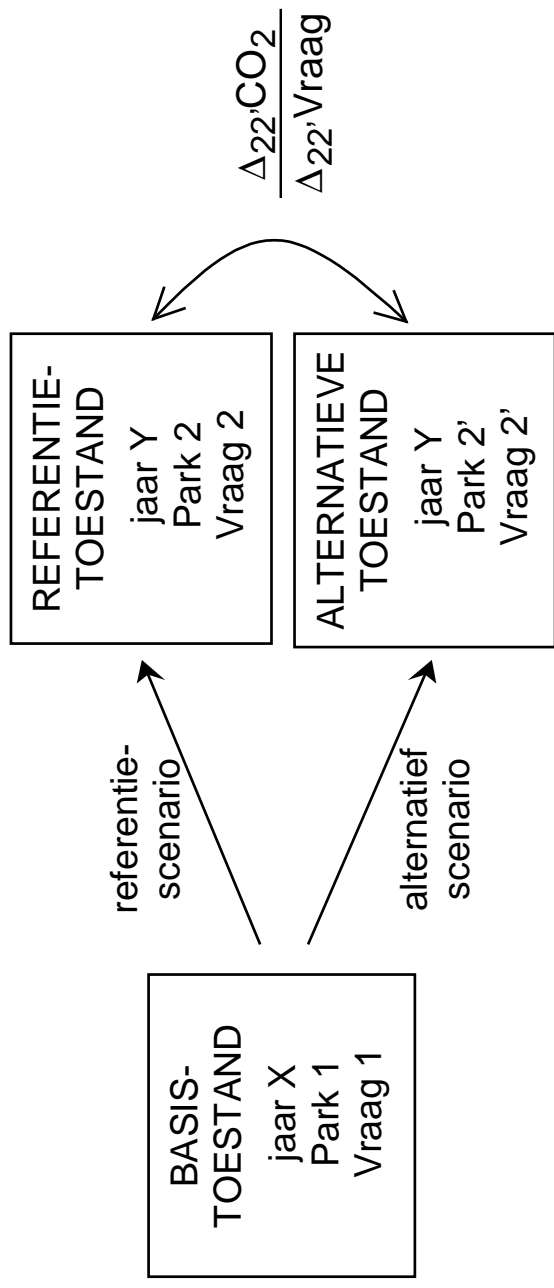
## VERDELING VAN DE RESULTATEN OVER DE CENTRALETYPES



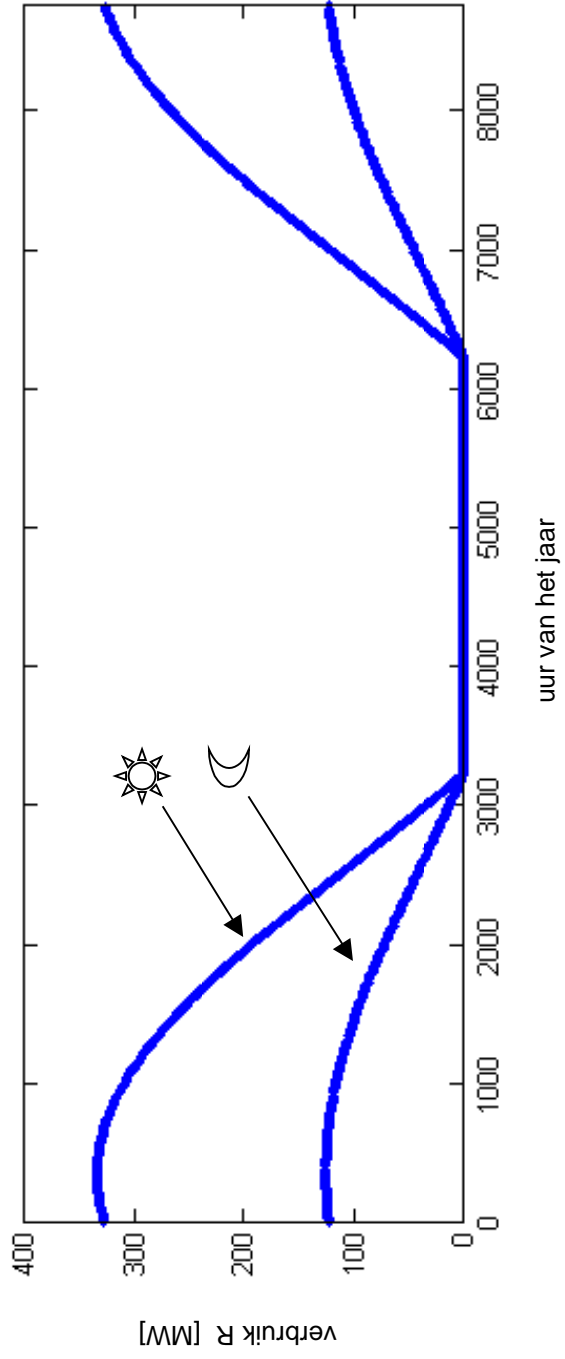
Figuur 5 : Output PROMIX: Verdeling van de elektriciteitsproductie, het primair energiegebruik en de broeikasgasemissies over de verschillende types van centrales



Figuur 6 : Schematische weergaven van de evolutie van 2003 naar 2004



Figuur 7 : Schematische voorstelling van de scenario's voor de substitutie, de promotie of het verbod van elektrische toepassingen



Figuur 8 : Elektriciteitsvraag vanwege directe elektrische verwarming in België

	<b>1997</b>	<b>2005</b> volgens uitrustingsplan
<b>Centralepark</b>	<b>13 970 MW</b>	<b>15 330 MW</b>
nucleair	5 950 MW	5 950 MW
steenkool	3 000 MW	2 170 MW
gas, STEG	1 380 MW	3 130 MW
gas, klassiek	1 650 MW	1 420 MW
olie	840 MW	770 MW
hoogovengas	150 MW	150 MW
WKK	470 MW	1 200 MW
hernieuwbaren	120 MW	130 MW

*Tabel 1 : Samenstelling van het Belgisch centralepark*

Scenario	Centralepark		2003 + STEG		2004		2003 + STEG		2004	
	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2004	2004	2004
Vraagpatroon	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2004	2004	2004
Vraag [TWh/a]	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	88.3	88.3	88.3
CO <sub>2</sub> -uitstoot [Mton]	23.3	23.3	22.3	22.3	22.0	22.0	23.5	23.5	23.1	23.1

*Tabel 2 : Parameteranalyse van de evolutie van 2003 naar 2004; resultaten van PROMIX*

	$\eta = 100\%$	$\eta = 80\%$	$\eta = 60\%$	$\eta = 40\%$
aardgas	56 gCO <sub>2</sub> /MJ <sub>i</sub>	200	250	340
stookolie	74 gCO <sub>2</sub> /MJ <sub>i</sub>	270	330	440
				510
				670

*Tabel 3 : Uitstoot van klassieke verwarmingssystemen [gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>th</sub>]  
als functie van het rendement*

2005		Referentie	Verbod 1 Vraag - $\Omega$ Park - USK	Verbod 2 Vraag - $\Omega$ Park - STEG	Verbod 3 Vraag - $\Omega$ Park plan
Vraag	[GWh]	89 970	- 890	- 890	- 890
CO <sub>2</sub> -eq.	[kton]	24 460	- 870	+ 6	- 480
$\frac{\Delta\text{CO}_2}{ \Delta\text{vraag} _{\text{REF}\leftrightarrow\text{SCE}}}$	[g/kWh <sub>e</sub> ]	—	- 980	+ 7	- 540

Referentie 2005 : vraag 2005 : verwachte vraagtoename

park 2005 : parkevolutie zoals in uitrustingsplan

Verbod 1 : vraag 2005 -  $\Omega$ -verwarming / bouw USK uitgesteld

Verbod 2 : vraag 2005 -  $\Omega$ -verwarming / bouw STEG uitgesteld

Verbod 3 : vraag 2005 -  $\Omega$ -verwarming / park 2005 : geen aanpassing uitrustingsplan

*Tabel 4 : Verbod van directe weerstandsverwarming op termijn (1997 → 2005); incrementeel*

2005		Referentie	Promotie 1 Vraag + $\Omega$ Park + USK	Promotie 2 Vraag + $\Omega$ Park + STEG	Promotie 3 Vraag + $\Omega$ geen $\Delta$ Park
Vraag	[GWh]	89 970	+ 890	+ 890	+ 890
CO <sub>2</sub> -eq.	[kton]	24 460	+ 850	+ 15	+ 500
$\frac{\Delta\text{CO}_2}{ \Delta\text{vraag} }_{\text{REF} \leftrightarrow \text{SCEN}}$	[g/kWh <sub>el</sub> ]	—	+ 950	+ 16	+ 570

Referentie 2005 : vraag 2005 : verwachte vraagtoename

park 2005 : parkevolutie zoals in uitrustingsplan

Promotie 1 : vraag 2005 + extra  $\Omega$ -verwarming / bouw extra USK

Promotie 2 : vraag 2005 + extra  $\Omega$ -verwarming / bouw extra STEG

Promotie 4 : vraag 2005 + extra  $\Omega$ -verwarming / park 2005 : geen aanpassing uitrustingsplan

Tabel 5 : Promotie van directe weerstandsverwarming op termijn (1997 → 2005); *incrementeel*