

## Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling met

Titel: Economische analyse van de inspanningen die nodig zijn om de Kyoto-normen te halen en ons voor te bereiden op post-Kyoto

Richting: master in de toegepaste economische wetenschappen - beleidsmanagement

Jaar: 2009

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

HAEGDORENS, Andy

Datum: 14.12.2009

# ***Economische analyse van de inspanningen die nodig zijn om de Kyoto-normen te halen en ons voor te bereiden op post-Kyoto***

**Andy Haegdorens**

promotor :  
Prof.dr.ir Frans LEMEIRE

## Woord vooraf

---

Deze eindverhandeling vormt het sluitstuk van mijn masteropleiding Beleidsmanagement in de Toegepaste Economische Wetenschappen aan de Universiteit Hasselt. De eindverhandeling bestudeert de inspanningen die nodig zijn om aan de Kyoto-normen te voldoen en ons voor te bereiden op Post-Kyoto, met speciale aandacht voor de elektriciteitsproductie.

Tijdens de voltooiing van dit werk kon ik rekenen op de steun van verschillende mensen. Graag zou ik van deze gelegenheid gebruik willen maken om hen te bedanken.

Eerst en vooral zou ik graag mijn promotor, Professor Dr. Ir. Frans Lemeire, willen bedanken voor zijn professionele steun en advies tijdens de verwezenlijking van deze belangrijke opdracht. Verder wil ik Dhr. Tom Kuppens bedanken voor zijn advies bij het verbeteren van deze masterproef. Tenslotte wil ik graag mijn ouders, zus en vrienden bedanken voor hun steun in alle mogelijke vormen tijdens mijn opleiding aan de universiteit Hasselt en tijdens het schrijven van deze eindverhandeling. Zonder hen zou ik nooit geraakt zijn waar ik nu sta.

Andy Haegdorens

Beringen, Augustus 2009

## Samenvatting

---

De strijd tegen de opwarming van de aarde wordt één van de grootste uitdagingen voor de mensheid in de 21<sup>e</sup> eeuw. In 1997 werden reeds de eerste stappen gezet naar een ambitieus internationaal klimaatbeleid met het opstellen van het Kyoto-protocol. In dit protocol verbinden alle industrielanden zich ertoe om hun gezamenlijke uitstoot van broeikasgassen tegen 2008-2012 met 5,2% te verminderen ten opzichte van 1990. België kreeg daarbij een reductiedoelstelling van 7,5% opgelegd. Het Kyoto-protocol is slechts een eerste bescheiden stap in de goede richting. Er wordt reeds hard gewerkt aan een opvolger. Deze zal veel ambitieuzer moeten zijn indien men gevaarlijke veranderingen van het klimaat wil voorkomen.

In *hoofdstuk één* worden de probleemstelling en het onderzoeksopzet uiteengezet. Deze masterproef analyseert de inspanningen die nodig zijn in België om aan de Kyoto-normen te voldoen en ons voor te bereiden op post-Kyoto. In deze masterproef wordt ervoor gekozen om enkel dieper in te gaan op de inspanningen die mogelijk zijn in de elektriciteitsproductie. Uiteindelijk leidt dit tot de volgende onderzoeksvraag:

*"Welke inspanningen op het vlak van elektriciteitsproductie zijn uit maatschappelijk standpunt wenselijk in België met het oog op het behalen van de Kyoto-normen en de voorbereiding op post-Kyoto?"*

*Hoofdstuk twee* gaat dieper in op de klimaatverandering zelf. Hierbij wordt er aandacht besteed aan de oorzaken en gevolgen van de opwarming van de aarde. Er wordt eerst onderzocht of de menselijke uitstoot van broeikasgassen als de oorzaak voor het klimaatprobleem kan worden beschouwd. Vervolgens worden de mogelijke gevolgen van de klimaatverandering besproken indien er geen maatregelen worden getroffen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een overzicht van verschillende studies die de maatschappelijke kost van de klimaatverandering proberen in te schatten.

In *hoofdstuk drie* wordt besproken waarom het de taak is van de overheid om de strijd aan te gaan tegen de klimaatverandering en op welke manier de overheid dit kan doen. Na een algemene inleiding wordt er aangetoond dat de uitstoot van broeikasgassen een oorzaak kan zijn voor het falen van de vrije markt en dat een weloverwogen overheidsoptreden in zo'n geval wenselijk is. Verder worden de beleidsinstrumenten die de overheid ter beschikking heeft om in te grijpen in zo'n situatie besproken en met elkaar vergeleken.

*Hoofdstuk vier* bespreekt het internationale beleidskader rond de klimaatverandering. Na een korte schets van de geschiedenis wordt het Kyoto-protocol meer in detail behandeld. Hierbij wordt extra aandacht geschonken aan de flexibele mechanismen waarin het Kyoto-protocol voorziet, in het bijzonder de internationale emissiehandel. Ook het Europese beleidskader wordt besproken, omdat dit in grote mate mee het Belgische klimaatbeleid bepaalt. Het hoofdstuk schetst verder een beeld van de vooruitgang die men al geboekt heeft en van de weg die men nog moet afleggen indien men de opwarming van de aarde wil beperken op een ongevaarlijk niveau.

In *hoofdstuk vijf* worden de verschillende mogelijke vormen van elektriciteitsproductie grondig geanalyseerd, rekening houdende met de Kyoto- en Post-Kyotodoelstellingen. Het hoofdstuk vangt aan met een korte bespreking van de elektriciteitsmarkt waaruit blijkt dat de elektriciteitsproductie in België op een belangrijk keerpunt staat. Tussen 2010 en 2030 zal een aanzienlijk deel van het huidige productiepark moeten worden vervangen en moet de capaciteit sterk worden uitgebreid. Vervolgens wordt er aandacht besteed aan de energievoorziening voor België om tenslotte over te gaan tot een kosten-effectiviteitanalyse van de verschillende alternatieven

Tot slot wordt er in hoofdstuk 6 een antwoord geformuleerd op de verschillende onderzoeksvragen, worden er aanbevelingen gedaan voor de toekomst van de elektriciteitsproductie en worden enkele bedenkingen bij deze eindverhandeling opgeworpen.

# Inhoudsopgave

---

WOORD VOORAF

SAMENVATTING

INHOUDSOPGAVE

AFKORTINGEN

LIJST VAN FIGUREN

LIJST VAN TABELLEN

HOOFDSTUK 1: INLEIDING.....	1
1.1. Recente ontwikkelingen in de strijd tegen de klimaatverandering.....	1
1.2. Onderzoeksvragen.....	2
1.2.1. Centrale onderzoeksvraag.....	3
1.2.2. Deelvragen.....	4
1.3. Onderzoeksmethoden.....	4
HOOFDSTUK 2: KLIMAATVERANDERING EN HET BROEIKASEFFECT.....	5
2.1. Inleiding.....	5
2.2. Recente opwarming van de aarde.....	6
2.3. Het natuurlijke broeikaseffect.....	8
2.4. De broeikasgassen.....	9
2.4.1. Koolstofdioxide (CO <sub>2</sub> ).....	9
2.4.2. Methaan (CH <sub>4</sub> ).....	10
2.4.3. Distikstofoxide/Lachgas (N <sub>2</sub> O).....	11
2.4.4. Overige broeikasgassen.....	11
2.4.5. Global Warming Potential (GWP).....	12
2.5. Versterking van het natuurlijke broeikaseffect.....	13
2.6. Kritiek/Onzekerheid.....	17
2.7. Toekomstprojecties.....	17
2.8. Gevolgen klimaatverandering.....	18
2.8.1. Neerslag en extreme weersomstandigheden.....	18

2.8.2. Impact op ijskappen en gletsjers.....	19
2.8.3. Oceanen.....	19
2.8.4. Impact op de ecosystemen.....	20
2.8.5. Impact op de voedselvoorziening.....	20
2.8.6. Impact op de gezondheid.....	21
2.9. Geschatte maatschappelijke kost van klimaatverandering.....	21
HOOFDSTUK 3: ROL VAN DE OVERHEID.....	23
3.1. Verschillende ideologieën.....	23
3.2. Falen van de vrije markt.....	27
3.3. Klimaatverandering als extern effect.....	28
3.4. Beleidsinstrumenten.....	30
3.4.1. Informeren.....	30
3.4.2. Milieubelastingen.....	31
3.4.3. Uitstootnormen.....	32
3.4.4. Verhandelbare emissierechten.....	32
3.4.5. Benchmarking.....	33
3.4.6. Technische normen.....	33
3.4.7. Subsidies.....	34
HOOFDSTUK 4: BELEIDSKADER.....	36
4.1. Een korte geschiedenis.....	36
4.2. Het Kyoto-protocol.....	37
4.3. Flexibele mechanismen.....	39
4.3.1. Internationale emissiehandel (artikel 17).....	39
4.3.2. Joint Implementation (artikel 6).....	41
4.3.3. Clean Development Mechanism (artikel 12).....	41
4.4. Sancties.....	42
4.5. Europees Beleidskader.....	43
4.5.1. Emissiehandel tussen bedrijven.....	43
4.5.2. Projectgebonden flexibiliteitsmechanismen.....	44
4.6. Belgische Beleidskader.....	44
4.7. Evolutie broeikasgassen.....	46

4.7.1. EU-15 en België.....	46
4.7.2. Annex-I landen.....	47
4.7.3. Globale uitstoot.....	47
4.8. Post-Kyoto.....	48
4.8.1. Langetermijndoelstellingen.....	48
4.8.2. Opvolger Kyoto-protocol.....	50
4.8.3. EU 2020-doelstelling.....	50
4.8.4. Technisch-economische haalbaarheid.....	51
HOOFDSTUK 5: ANALYSE VAN DE ELEKTRICITEITSPRODUCTIE.....	53
5.1. Aanpak.....	53
5.2. Evoluties op de elektriciteitsmarkt.....	54
5.3. Energievoorziening.....	59
5.3.1. Gebruikte energiebronnen in België.....	59
5.3.2. Wereldwijde voorraden en reserves.....	61
5.3.3. Geopolitieke afhankelijkheid.....	63
5.3.4. Grondstofprijzen.....	69
5.4. Bespreking verschillende vormen elektriciteitsproductie.....	72
5.4.1. Klassieke thermische centrales.....	73
5.4.2. Steenkoolcentrales.....	75
5.4.3. Gascentrales.....	79
5.4.5. Warmtekrachtkoppeling (WKK).....	83
5.4.6. Kernenergie.....	85
5.4.7. Kernfusie.....	92
5.4.8. Elektriciteitsproductie met hernieuwbare energiebronnen.....	93
5.4.9. Windenergie.....	96
5.4.10. Zonne-energie.....	99
5.4.11. Waterkracht.....	101
5.4.12. Biomassa.....	103
5.4.13. Brandstofcel.....	104
HOOFDSTUK 6: CONCLUSIES.....	106
6.1. Bespreking van de onderzoeksvragen.....	106



6.2. Bedenkingen.....	117
LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN.....	119
BIJLAGEN.....	140

## Afkortingen

---

AMPERE	: Commissie voor de Analyse van de Middelen voor Productie van Elektriciteit en de Reëvaluatie van de Energievectoren
ASC	: Geavanceerde superkritische
Bar	: Natuurkundige eenheid van druk
BBP	: Bruto Binnenlands Product
CEESE	: Centre for Economic and Social Studies on the Environment
CFK's	: Chloorfluorwaterstoffen
CH <sub>4</sub>	: Methaan
CO <sub>2</sub>	: Koolstofdioxide
CO <sub>2</sub> -eq.	: CO <sub>2</sub> -equivalent (zie hoofdstuk 2)
CREG	: Commissie voor de regulering van de elektriciteit en het gas
E	: Exa (10 <sup>18</sup> )
ECN	: Energy Research Centre of the Netherlands
EEA	: European Environment Agency
EPA	: Environmental Protection Agency
EUR	: Europese munt
FBC	: Wervelbedcentrale
FOD VVVL	: De Federale Overheidsdienst voor Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu
FORATOM	: European Atomic Forum
G	: Giga (10 <sup>9</sup> )
g	: Gram
GWP	: Global warming potential (zie hoofdstuk 2)
H	: Uur
HFK's	: Fluorkoolwaterstoffen
IEA	: International Energy Agency
IGCC	: Steenkoolvergassingscentrale
IMF	: Internationaal Monetair Fonds
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change

ITER	: International Thermonuclear Experimental Reactor
J	: Joule
kg	: Kilogram ( $10^3$ g)
KMI	: Koninklijk Meteorologisch Instituut
kWh	: Kilowattuur
LNE	: Departement Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse overheid
M	: Mega ( $10^6$ )
m	: Meter
m <sup>3</sup>	: Kubieke meter
N <sub>2</sub> O	: Lachgas
NDACC	: Network for the Detection of Atmospheric Composition Change
NH <sub>3</sub>	: Ammoniak
Nm <sup>3</sup>	: De hoeveelheid gas die, bij een temperatuur van nul graden Celsius en onder absolute druk van 1,01325 bar, een volume van één kubieke meter inneemt.
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NO <sub>x</sub>	: Stikstofoxides
O <sub>3</sub>	: Ozon
OPEC	: Organization of the Petroleum Exporting Countries
PFK	: Perfluorkoolwaterstoffen
PM <sub>10</sub>	: Stofdeeltjes met een deeltjesgrootte kleiner of gelijk aan 10 m.
Pond	: 0,454kg
Ppm	: Parts per million
Ppb	: Parts per billion (miljard)
PV	: Photovoltaïsch
PV-trac	: Photovoltaic Technology Research Advisory Council
PWR	: Pressurized water reactor
SC	: Superkritische
SF <sub>6</sub>	: Zwavelhexafluoride
Si	: Silicoon
SO <sub>2</sub>	: Zwaveldioxide

STEG	: Stoom en gas
Toe	: Ton olie equivalent (1 toe = 42 GJ)
Ton	: $10^3$ kg
TWh	: Terrawattuur, $10^{12}$
UNEP	: United Nations Environmental Programma
UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change
USC	: Ultrasuperkritische
USD	: Amerikaanse dollar
Vat olie	: 159l
VITO	: Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek
VMM	: Vlaamse Milieumaatschappij
VROM	: Nederlands ministerie van wonen, ruimte en milieu
W	: Watt, $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
WKK	: Warmtekrachtkoppeling
WMO	: World Meteorological Organisation

## Lijst van figuren

---

<u>Figuur 2.1:</u> Evolutie van de globale jaargemiddelde temperatuur (1850-2007).....	7
<u>Figuur 2.2:</u> Illustratie ter verduidelijking van de werking van het broeikaseffect.....	9
<u>Figuur 2.3:</u> Evolutie in atmosferische concentratie van CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O tijdens de laatste 650 000 jaar.....	13
<u>Figuur 2.4:</u> Atmosferische concentratie van CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O voor de afgelopen 10000 jaar en sinds 1750 (ingevoegde figuren) tot 2005.....	15
<u>Figuur 2.5:</u> Gemiddelde totale radiatieve forcering in de periode 1750-2005.....	16
<u>Lijst 3.1:</u> Negatieve externe effecten in de elektriciteitsmarkt.....	29
<u>Figuur 5.1:</u> Geschatte productiecapaciteit (in GW) voor België (2000-2030).....	56
<u>Figuur 5.2:</u> Elektriciteitsprijzen in de EU in EUR/kWh (1e semester 2008).....	59
<u>Figuur 5.3:</u> Evolutie van de energiebronnen die gebruikt worden voor de opwekking van elektriciteit.....	61
<u>Figuur 5.4:</u> Evolutie van de wereldwijde vraag naar energie.....	63
<u>Figuur 5.5:</u> Uraniumbronnen in 2007.....	64
<u>Figuur 5.6:</u> Verdeling aardgasreserves (2007).....	65
<u>Figuur 5.7:</u> Bronnen van aardgas voor de EU (2007).....	66
<u>Figuur 5.8:</u> Verdeling steenkoolreserves (2007).....	67
<u>Figuur 5.9:</u> Verdeling oliereserves (2007).....	68
<u>Figuur 5.10:</u> Gevoeligheid productiekosten voor grondstofprijzen.....	69
<u>Figuur 5.11:</u> De opwekking van elektriciteit in centrales.....	72
<u>Figuur 5.12:</u> Overzichtsschema van een klassieke thermische centrale.....	74
<u>Figuur 5.13:</u> Vooruitgang fusieonderzoek.....	93
<u>Figuur 5.14:</u> Illustratie diverse potentiële niveaus.....	95
<u>Figuur 5.15:</u> Evolutie van de productiekosten voor PV.....	100

## Lijst van tabellen

---

<u>Tabel 4.1:</u> Bevoegdheidsverdeling in België.....	45
<u>Tabel 5.1:</u> Elektriciteitsintensiteit Belgische economie (2003).....	58
<u>Tabel 5.2:</u> Energiebronnen elektriciteitproductie België (2006).....	60
<u>Tabel 5.3:</u> Wereldwijde reserves en voorraden van energiebronnen (2005).....	62
<u>Tabel 5.4:</u> Vergelijking grondstofprijzen per eenheid potentiële energie.....	71
<u>Tabel 5.5:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met steenkool.....	77
<u>Tabel 5.6:</u> Kosten van verschillende steenkoolcentrales.....	78
<u>Tabel 5.7:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met gasturbines.....	80
<u>Tabel 5.8:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met STEG-centrales.....	82
<u>Tabel 5.9:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met WKK-centrales.....	84
<u>Tabel 5.10:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met PWR-kerncentrales .....	85
<u>Tabel 5.11:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met windenergie.....	97
<u>Tabel 5.12:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met zonne-energie.....	99
<u>Tabel 5.13:</u> Kosten van elektriciteitsproductie met waterkracht .....	102
<u>Tabel 6.1:</u> Overzicht van de verschillende vormen van elektriciteitsproductie.....	110

## **Hoofdstuk 1: Inleiding**

---

### **1.1. Recente ontwikkelingen in de strijd tegen de klimaatverandering**

In 1992 werd tijdens een conferentie van de Verenigde Naties in Brazilië het *Raamverdrag inzake Klimaatverandering* afgesloten. Dit verdrag dient als een internationaal kader waarbinnen maatregelen kunnen worden getroffen om de klimaatveranderingen tegen te gaan die worden veroorzaakt door de menselijke uitstoot van broeikasgassen. Het doel van het verdrag is om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren zodat gevaarlijke veranderingen van het klimaat kunnen worden voorkomen. In het verdrag is er echter geen sprake van bindende reductiedoelstellingen.

Op 11 december 1997 werd het klimaatverdrag daarom aangevuld met het Kyoto-protocol. Met het ondertekenen van dit protocol verbinden alle industrielanden zich ertoe om hun gezamenlijke uitstoot van broeikasgassen met 5,2% te verminderen ten opzichte van het niveau van 1990 tegen 2008-2012. Het Kyoto-protocol werd tot op heden door 179 landen geratificeerd en is van kracht gegaan op 16 februari 2005.

Voor elk deelnemend land werden er specifieke doelstellingen vastgelegd in het Kyoto-protocol. De Europese Unie, die toen nog bestond uit 15 lidstaten, geldt als één deelnemende partij binnen het protocol. Zo moet de EU-15 haar uitstoot van broeikasgassen met 8% terugdringen. De Europese lidstaten hebben de reductie achteraf onderling verdeeld. Daarbij kreeg België een reductiedoelstelling van 7,5% opgelegd tegen 2008-2012 ten opzichte van 1990. Indien de emissiereductiedoelstellingen voor Europa niet gehaald worden, kunnen individuele lidstaten hiervoor aansprakelijk worden gesteld.

Het Kyoto-protocol is een belangrijke eerste stap in de strijd tegen de klimaatverandering maar het is zeker geen eindpunt. Indien men een gevaarlijke opwarming van de aarde wil voorkomen moet de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen minstens halveren tegen 2050. In december 2009 zal er een nieuwe klimaatconferentie plaatsvinden in Kopenhagen waar er zal onderhandeld worden over een opvolger voor het Kyoto-protocol. De Europese Unie wil het goede voorbeeld geven en heeft niet gewacht op een nieuw klimaatverdrag. Op 8 en 9 maart 2007 beslisten de Europese lidstaten reeds dat de Europese Unie haar broeikasgasuitstoot tegen 2020 met 20% zal verminderen ten opzichte van 1990. In het kader van een internationaal akkoord is de Europese Unie zelfs bereid om deze doelstelling te verhogen naar 30%, met het oog op een verdere reductie van 60-80% tegen 2050 (Europese Commissie, 2008).

## **1.2. Onderzoeksvragen**

Uit het vorige blijkt duidelijk dat de Belgische bevolking inspanningen zal moeten leveren om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen opdat deze zal voldoen aan de opgelegde reductiedoelstellingen en om te anticiperen op de toekomst.

Verschillende sectoren zijn verantwoordelijk voor de uitstoot van broeikasgassen. In elke sector bestaan er maatregelen om de uitstoot te reduceren. Het is voor de overheid belangrijk om te weten welke (combinatie van) maatregelen vanuit maatschappelijk standpunt wenselijk zijn. De overheid kan er immers voor zorgen dat bepaalde maatregelen worden bevorderd. Om te bepalen welke maatregelen maatschappelijk wenselijk zijn moet er voor elke maatregel een economische analyse gebeuren waarbij rekening moet worden gehouden met verschillende aspecten zoals de private kosten, de externe kosten, de technologische toekomstvisie, het technologische multiplicatoreffect, de transgenerationele solidariteit, de



transnationale solidariteit, het socio-economisch multiplicatoreffect, de energetische toekomstvisie en de handelsbalans.

De 4 sectoren die in België het meest bijdragen aan de uitstoot van broeikasgassen zijn het vervoer (18,4%), de verwarming van gebouwen (21,8%), de industrie (19,4%) en tenslotte de elektriciteitsproductie (17,1%) (Nationale Klimaatcommissie, 2007). In deze masterproef wordt ervoor gekozen om enkel dieper in te gaan op de belangrijkste maatregelen die mogelijk zijn in de elektriciteitsproductie. Het zich beperken tot de belangrijkste maatregelen in één sector maakt het mogelijk om deze maatregelen grondiger te bestuderen. Het is wel belangrijk dat men niet uit het oog verliest dat de maatregelen die mogelijk zijn in de elektriciteitsproductie uiteindelijk ook nog moeten worden afgewogen tegen maatregelen die mogelijk zijn in andere sectoren. Er werd gekozen voor de elektriciteitsproductie omdat deze sector het meest flexibele is. Elektriciteit kan worden opgewekt door alle mogelijke energiedragers en kan op termijn volledig worden opgewekt zonder enige uitstoot van broeikasgassen.

### **1.2.1. Centrale onderzoeksvraag**

Voor deze masterproef wordt dan ook de volgende centrale onderzoeksvraag vooropgesteld:

*"Welke inspanningen op het vlak van elektriciteitsproductie zijn uit maatschappelijk standpunt wenselijk in België met het oog op het behalen van de Kyoto-normen en de voorbereiding op post-Kyoto?"*

### **1.2.2. Deelvragen**

De centrale onderzoeksvraag wordt verder uitgewerkt in de volgende deelvragen:

- Wat zijn de gevolgen van de uitstoot van broeikasgassen door de mens voor het klimaat en voor de maatschappij?
- Waarom moet de overheid ingrijpen?
- Welke beleidsinstrumenten heeft de overheid tot haar beschikking om in te grijpen op een private markt?
- Wat houdt het Kyoto-protocol in en welke beleidsinitiatieven om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren mag men in de toekomst nog verwachten?
- Welke vormen van elektriciteitsproductie zijn uit maatschappelijk standpunt wenselijk in België om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren?

### **1.3. Onderzoeksmethoden**

Het onderzoek voor deze eindverhandeling zal voor alle deelvragen voornamelijk bestaan uit een literatuurstudie, aangevuld met eigen inzichten en voorstellen. Het gekozen thema is zeer actueel en er zijn talloze studies, boeken en publicaties waarop het onderzoek kan gebaseerd worden. Er zal telkens getracht worden de meest recente informatie te gebruiken. Daarom zal er veelvuldig beroep gedaan worden op internetbronnen, aangezien deze vaak de meest recente informatie bevatten. Hierbij zal er voornamelijk gebruik gemaakt worden van publicaties van overheden en gezaghebbende instanties op het gebied van klimaat en energie. Met deze bronnen zal zorgvuldig worden omgesprongen om de wetenschappelijke correctheid van de informatie te kunnen garanderen.

## **Hoofdstuk 2: Klimaatverandering en het broeikaseffect**

---

### **2.1. Inleiding**

Sinds het ontstaan van de aarde is het klimaat voortdurend aan verandering onderhevig geweest. Koudere periodes waarbij de aarde voor een groot deel bedekt werd door ijskappen werden afgewisseld door warmere periodes waarbij de ijskappen zich terugtrokken tot de polen of zelfs helemaal wegsmolten (Scotese, 2008). In bijlage 1 is een figuur terug te vinden die de variabiliteit van het klimaatsysteem doorheen de geschiedenis van de planeet illustreert.

De laatste 10 000 jaar is het klimaat op aarde relatief stabiel gebleven met een gematigde temperatuur. Deze stabiele periode heeft de mensheid de kans gegeven om zich te ontwikkelen. Toch mag men volgens Kennedy en Hanson (2006) er niet op rekenen dat het klimaat stabiel zal blijven. Kennedy en Hanson bestudeerden het klimaatverleden om een beter beeld te krijgen van hoe het klimaat verder zou kunnen evolueren. Volgens hen zou de relatie tussen de atmosferische concentraties van broeikasgassen en de waargenomen temperatuur hiervoor een goede indicator kunnen zijn. Uit ijskernen blijkt namelijk duidelijk dat er doorheen de geschiedenis van de aarde een sterke relatie bestaat tussen deze twee factoren. Dit wordt vervolgens geïllustreerd.

50 miljoen jaar geleden piekte de atmosferische concentratie van CO<sub>2</sub> tot 1000 parts per million (ppm) en lag het zeeniveau bijna 50 meter hoger dan vandaag. De atmosferische concentratie van CO<sub>2</sub> begon daarna langzaam te dalen omdat organismen steeds meer koolstof aan de atmosfeer onttrokken door fotosynthese. Deze daling liep gelijkopgaand met een daling van de temperatuur en deed de ijskap op Antarctica ontstaan. 3 tot 4 miljoen jaar geleden daalde de CO<sub>2</sub> concentratie verder tot 290 ppm waardoor er ook

permanente ijskappen ontstonden op het noordelijk halfrond. In de laatste 10 miljoen jaar is de concentratie van CO<sub>2</sub> nooit boven het huidige niveau van 386 ppm uitgekomen. De laatste keer dat het huidige CO<sub>2</sub>-niveau werd bereikt had Groenland geen ijskap, stond het zeeniveau meters hoger en was het enkele graden warmer dan nu het geval was (Kennedy & Hanson, 2006). Deze gegevens zijn zeer verontrustend en kunnen een indicatie zijn van wat ons te wachten staat.

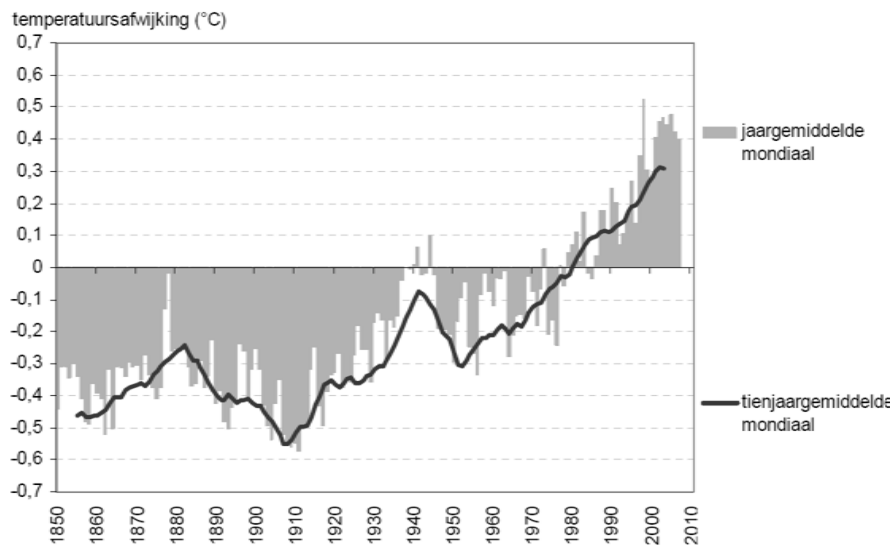
In het vervolg van dit hoofdstuk wordt eerst besproken op welke manier het klimaat aan het veranderen is. Vervolgens wordt de rol van de menselijke uitstoot van broeikasgassen in deze veranderingen geschetst en wordt er een kort overzicht gegeven van de verschillende broeikasgassen. Tenslotte worden de toekomstprojecties voor het klimaat besproken en worden de belangrijkste gevolgen van de klimaatverandering op een rijtje gezet.

Klimaatverandering is een actueel probleem en hier is dan ook veel literatuur over terug te vinden. In dit hoofdstuk zal er regelmatig verwezen worden naar de assessment reports van het Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2007). Deze rapporten gelden als de meest gezaghebbende referentiewerken inzake klimaatverandering.

## **2.2. Recente opwarming van de aarde**

Op basis van alle beschikbare wetenschappelijke kennis stelt het IPCC in haar meest recente rapport (2007) vast dat de aarde onmiskenbaar aan het opwarmen is sinds het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw. De globale gemiddelde oppervlaktetemperatuur op aarde is de afgelopen 100 jaar (1906-2005) met ongeveer 0,74°C gestegen. Het grootste deel van deze stijging heeft zich voorgedaan na 1950. De gemiddelde stijging van de temperatuur was in de laatste 50 jaar zelfs bijna dubbel zo groot als de gemiddelde stijging van de laatste 100 jaar (IPCC, 2007). De evolutie van de gemiddelde temperatuur op aarde wordt geïllustreerd in figuur 2.1.

*Figuur 2.1 : Evolutie van de globale jaargemiddelde temperatuur (1850-2007)\**



\* Uitgedrukt t.o.v. de gemiddelde temperatuur tijdens de referentieperiode 1961-1990.

Bron: VMM (2008), gebaseerd op University of East Anglia (2008)

Het opwarmen van de aarde gebeurt niet overal even snel. Regionale veranderingen kunnen substantieel afwijken van de globale gemiddelden. Hansen et al. (2006) hebben aangetoond dat de temperatuurstoename groter is op het noordelijk halfrond en dat de toename groter is op het land dan boven de oceanen. Volgens het European Environment Agency [EEA] (2008) nam de temperatuur in Europa zelfs toe met 1,3°C sinds het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw. Ook België blijft niet gespaard van de opwarming van de aarde. Volgens metingen van het Koninklijk Meteorologisch Instituut [KMI] (2009) lag de gemiddelde temperatuur in België in 2008 al bijna 2°C hoger dan in het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw.

Deze temperatuurstijgingen overtreffen volgens het IPCC (2007) zowel in omvang als in snelheid de natuurlijke klimaatfluctuaties van het laatste millennium en waarschijnlijk zelfs van de laatste 12000 jaren. Wetenschappelijke modellen tonen aan dat deze veranderingen niet alleen kunnen worden verklaard door natuurlijke fenomenen. Het IPCC (2007) acht het in zijn meest recente rapport dan ook zeer waarschijnlijk (kans > 90%)

dat de geobserveerde opwarming van de laatste 50 jaar (mede) veroorzaakt wordt door de mensheid.

### **2.3. Het natuurlijke broeikaseffect**

De zon is de drijvende kracht achter het klimaatsysteem. Ze levert elk jaar energie aan de aarde onder de vorm van kortgolvlige straling. Iets minder dan één derde van deze straling wordt onmiddellijk teruggekaatst naar de ruimte door de dampkring en het aardoppervlak. De overgebleven straling wordt geabsorbeerd door het aardoppervlak en omgezet in warmte. De aarde geeft deze warmte vervolgens weer vrij in de vorm van infrarode straling (UNEP, 2005).

In de atmosfeer zijn er echter zogenaamde 'broeikasgassen' aanwezig die het vrijgeven van deze warmte bemoeilijken. Deze broeikasgassen absorberen namelijk de infrarode straling die door de aarde wordt vrijgegeven. Vervolgens geven ze deze warmte weer vrij in alle richtingen. Zo wordt ongeveer de helft van de geabsorbeerde warmte weer teruggekaatst naar de aarde. Het aardoppervlak en de lagere delen van de atmosfeer worden hierdoor opgewarmd. Dit natuurlijke fenomeen heet het broeikaseffect naar analogie met de werking van glas in een serre. Zonder dit broeikaseffect zou de temperatuur op aarde gemiddeld  $-19^{\circ}\text{C}$  bedragen, in plaats van de huidige  $+15^{\circ}\text{C}$ , en zou het leven dat de aarde nu kent onmogelijk geweest zijn (VMM, 2008). In figuur 2.2 op de volgende pagina wordt de werking van het broeikaseffect geïllustreerd.

Figuur 2.2. Illustratie ter verduidelijking van de werking van het broeikaseffect



Bron: Milieuloket (z.d.), gebaseerd op GRID-Arendal (2001)

## 2.4. De broeikasgassen

Broeikasgassen komen zowel door menselijke activiteiten als door natuurlijke processen in de atmosfeer terecht. De voornaamste natuurlijke broeikasgassen zijn waterdamp ( $H_2O$ ), koolstofdioxide ( $CO_2$ ), methaan ( $CH_4$ ), lachgas ( $N_2O$ ) en troposferische ozon ( $O_3$ ). Andere gassen zoals gehalogeneerde koolwaterstoffen (CFK's, HFK's, PFK's) en zwavelhexafluoride ( $SF_6$ ) dragen eveneens bij tot het broeikaseffect (VMM, 2006). De uitstoot van broeikasgassen door de mens bestaat voornamelijk uit de emissie van de broeikasgassen  $CO_2$ ,  $CH_4$  en  $N_2O$  (IPCC, 2007). Elk van deze broeikasgassen worden vervolgens kort besproken.

### 2.4.1. Koolstofdioxide ( $CO_2$ )

Koolstofdioxide ( $CO_2$ ) is een kleurloos en reukloos gas. Hoewel  $CO_2$  niet giftig is kan het in hoge concentraties wel verstikkend zijn doordat het de zuurstof

verdringt. CO<sub>2</sub> absorbeert slechts een deel van het infrarode spectrum. Hierdoor zal het in vergelijking met andere broeikasgassen een minder sterk opwarmend effect hebben. CO<sub>2</sub> maakt slechts een zeer klein deel (ongeveer 0,038%) uit van de atmosfeer. Het heeft een atmosferische verblijftijd van 5 tot 200 jaar. Een meer precieze waarde is moeilijk te bepalen door de complexe CO<sub>2</sub>-absorptiemechanismen in de biosfeer en de oceanen (Greenfacts, 2009; VMM, 2008; NDACC, 2009).

CO<sub>2</sub> komt voornamelijk via natuurlijke bronnen in de atmosfeer terecht. De belangrijkste natuurlijke bronnen van CO<sub>2</sub> zijn de ademhaling van dieren en vegetatie en de uitwisseling van CO<sub>2</sub> tussen de atmosfeer en de oceanen. De uitstoot van broeikasgassen door menselijke activiteiten bedraagt maar een fractie hiervan en wordt geschat op ongeveer 3,3% van de totale uitstoot. Het verbranden van fossiele brandstoffen is de belangrijkste menselijke activiteit die bijdraagt tot deze uitstoot (Brahic, 2007).

#### **2.4.2. Methaan (CH<sub>4</sub>)**

Methaan (chemische formule CH<sub>4</sub>) is een kleurloos, ontvlambaar en niet-toxisch gas. Methaan is als broeikasgas meer dan 20 keer sterker als CO<sub>2</sub>. De atmosfeer bestaat slechts voor 0,0002 % uit CH<sub>4</sub>. De atmosferische verblijftijd van CH<sub>4</sub> bedraagt ongeveer 12 jaar. Dit is beduidend minder dan de meeste broeikasgassen (Greenfacts, 2009; VMM, 2008; NDACC, 2009).

Methaan kan zowel op natuurlijke wijze als door menselijke activiteiten in de atmosfeer terecht komen. Volgens het IPCC (2007) is 60% van de globale CH<sub>4</sub>-uitstoot afkomstig van menselijke activiteiten. De antropogene uitstoot van CH<sub>4</sub> is voornamelijk te wijten aan landbouw, de behandeling van huishoudelijk afval en de exploitatie en distributie van aardgas. Dit gas wordt op natuurlijke wijze gevormd door de ontbinding van organische stoffen. De belangrijkste natuurlijke bronnen van CH<sub>4</sub> zijn de moerassen (Greenfacts, 2009; IPCC, 2007)



### **2.4.3. Distikstofoxide/Lachgas (N<sub>2</sub>O)**

Distikstofoxide (N<sub>2</sub>O), ook wel lachgas genoemd, is een kleurloos gas met een licht-zoete smaak en geur. Het gas is niet giftig maar bij inademing veroorzaakt het bij een persoon een verdovende toestand die vergelijkbaar is met dronkenschap. De atmosfeer bestaat slechts voor 0,00005 % uit N<sub>2</sub>O. Het gas heeft een opwarmend vermogen dat ongeveer 310 keer groter is als dat van CO<sub>2</sub> en het heeft een relatief lange atmosferische verblijftijd van gemiddeld 114 jaar (Greenfacts, 2009; VMM, 2008; NDACC, 2009).

Ook N<sub>2</sub>O kan zowel op natuurlijke wijze als door menselijke activiteiten in de atmosfeer terecht komen. De antropogene uitstoot van N<sub>2</sub>O is voornamelijk te wijten aan landbouw en in mindere mate aan de chemische industrie en de verbranding van fossiele brandstoffen. Ongeveer 44% van de totale uitstoot van N<sub>2</sub>O is afkomstig van menselijke activiteiten (IPCC, 2007).

### **2.4.4. Overige broeikasgassen**

Zoals eerder vermeld bestaat de uitstoot van broeikasgassen volgens het IPCC (2007) door de mens voornamelijk uit de emissie van CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O. Men mag echter de andere broeikasgassen ook niet uit het oog verliezen.

*Chloorfluorkoolstofverbindingen (CFK's)* werden in de 20e eeuw ontwikkeld en o.a. gebruikt als koelmiddel en als drijfgas voor spuitbussen. CFK's bleken echter de ozonlaag aan te tasten en werden sinds het ondertekenen van het Montreal-protocol (1987) ter bescherming van de ozonlaag vervangen door *hydrofluorkoolstoffen (HFK's)*, *perfluorkoolstoffen (PFK's)* en *zwavelhexafluoride (SF<sub>6</sub>)*. De atmosferische concentraties van deze gassen is in vergelijking met die van bijvoorbeeld CO<sub>2</sub> zeer klein maar gegevens van het IPCC (2007) tonen aan dat deze concentraties zeer snel toenemen. Wanneer dit wordt gecombineerd met het feit dat de meeste van deze gassen een enorm groot opwarmend vermogen en een zeer lange atmosferische

verblijftijd hebben, wordt het duidelijk dat de antropogene uitstoot van deze gassen niet mogen worden genegeerd (EPA, 2008).

*Troposferische ozon* ( $O_3$ ) is een vorm van luchtverontreiniging die op grondniveau schadelijk kan zijn voor mensen met ademhalingsproblemen en mensen die actief zijn in de buitenlucht.  $O_3$  draagt in de hogere troposfeer echter ook bij aan het broeikas effect.  $O_3$  heeft geen lange levensduur maar het broeikas effect van een  $O_3$  is wel vergelijkbaar met dat van de CFK's.  $O_3$  komt in de natuur voor maar kan ook door de mens worden gecreëerd bij chemische reacties tijdens verschillende industriële processen (EPA, 2008; WMO, 2008).

*Waterdamp* ( $H_2O$ ) is het belangrijkste van nature aanwezige broeikasgas. Het ontstaat door verdamping van water op het aardoppervlak. Menselijke activiteiten kunnen niet voor een significante toename van de concentratie  $H_2O$  in de atmosfeer zorgen (VMM, 2008; FOD VVVL, 2009).

#### **2.4.5. Global Warming Potential (GWP)**

Global Warming Potential (GWP) is een index die het mogelijk maakt om de bijdrage van de verschillende broeikasgassen aan het broeikas effect ten opzichte van elkaar af te wegen. De index maakt het mogelijk om het opwarmende vermogen van een gas relatief uit te drukken in  $CO_2$ -equivalenten (IPCC, 2007).

De GWP van een gas is afhankelijk van 4 factoren (VMM, 2008):

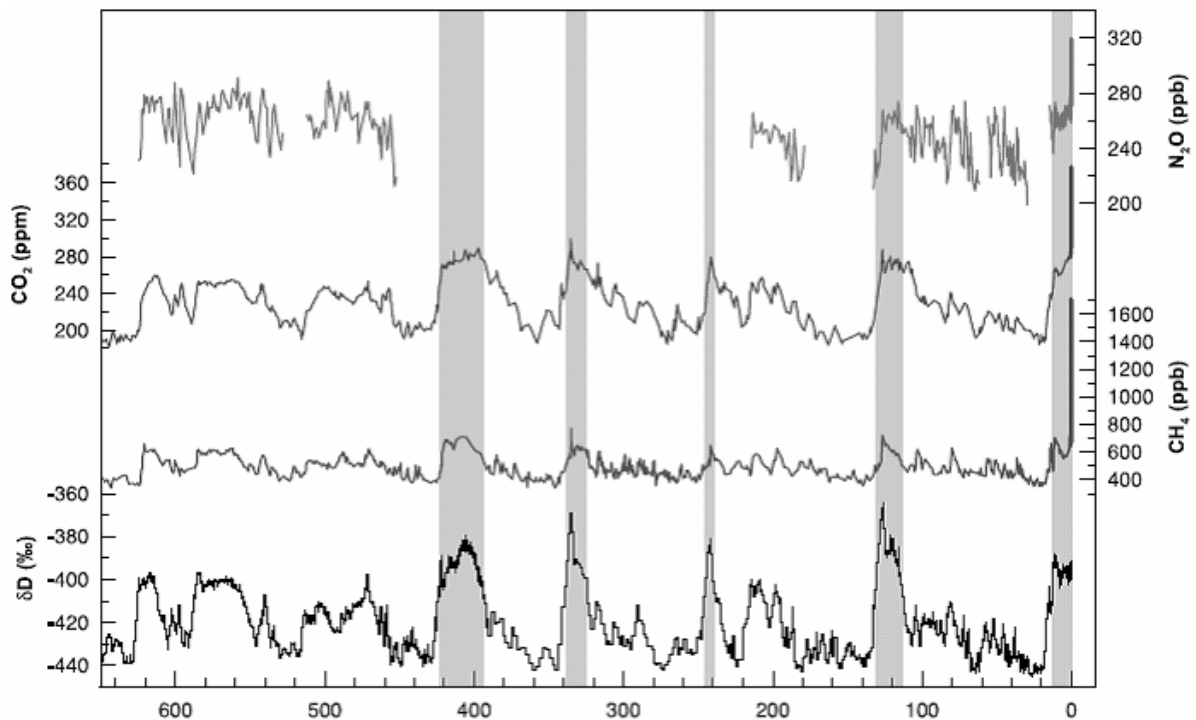
- de mate waarin het gas infrarode straling absorbeert of uitstraalt.
- de atmosferische verblijftijd
- de tijdshorizon waarover het opwarmende effect berekend wordt.
- het indirecte GWP.

De tabel in bijlage 2 geeft een overzicht van de GWP-waarden voor de belangrijkste broeikasgassen.

## 2.5. Versterking van het natuurlijke broeikaseffect

Reconstructies tonen aan dat de atmosferische concentraties van koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ), methaan ( $\text{CH}_4$ ) en lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) buitengewoon snel zijn gestegen sinds het begin van de industriële revolutie rond het jaar 1750. Het IPCC (2007) stelt dat de stijgende concentraties duidelijk het gevolg zijn van de menselijke activiteiten sinds 1750. De huidige concentraties van  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  en  $\text{CH}_4$  overschrijden ruimschoots alle pre-industriële waarden tijdens de laatste 650 000 jaar (IPCC, 2007). Dit wordt geïllustreerd in figuur 2.3.

*Figuur 2.3: Evolutie in atmosferische concentratie van  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  en  $\text{N}_2\text{O}$  tijdens de laatste 650 000 jaar\**



\*De x-as geeft in duizendtallen het aantal jaren voor het heden aan. De grijze verticale zones geven de interglacialeperiodes aan. Deuterium ( $\delta\text{D}$ ) is een indicator voor de temperatuur.

Bron: VMM (2008), gebaseerd op IPCC (2007)

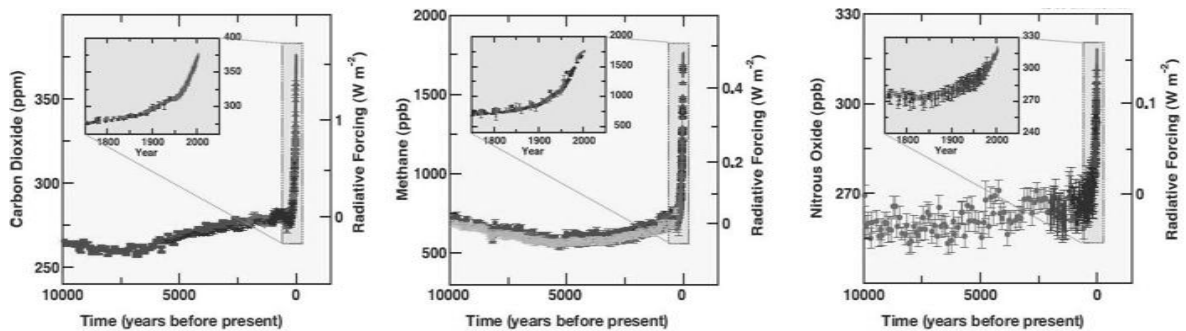
De concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer is toegenomen van 280 ppm (parts per million) in 1750 tot ongeveer 385 ppm in 2008. Dit vertegenwoordigt een stijging van 37,5%. De CO<sub>2</sub> concentratie steeg de laatste 10 jaar (1999-2008) gemiddeld met 1,878 ppm per jaar. De CO<sub>2</sub>-toename vertoont geen afvlakking. De gemiddelde snelheid waarmee de CO<sub>2</sub>-concentratie de laatste jaren aangroeit ligt zelfs een stuk hoger dan in de begin jaren jaren 90 en in de jaren 80 en is zelfs verdubbeld t.o.v. 30 jaar geleden (NOAA, 2009).

Zoals eerder gezegd bedraagt de menselijke uitstoot van CO<sub>2</sub> slechts een fractie van de natuurlijke uitstoot. Toch wordt de mens beschouwd als de oorzaak van de toename in de atmosferische concentraties. De CO<sub>2</sub> die door de natuur wordt uitgestoten werd de laatste 10 000 jaar immers ongeveer in evenwicht gehouden door natuurlijke processen die ongeveer evenveel CO<sub>2</sub> onttrokken aan de atmosfeer. De menselijke uitstoot doorbrak echter dit evenwicht waardoor de atmosferische concentraties zijn beginnen toenemen (Brahic, 2007). De buitengewone toename in atmosferische concentraties van CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O kunnen analoog worden toegeschreven aan de mens.

De concentratie van CH<sub>4</sub> is meer dan verdubbeld tussen 1750 en 2007. De concentratie steeg van ongeveer 700 ppb (parts per billion) in 1750 met +156% tot 1789 ppb in 2007. In tegenstelling tot de CO<sub>2</sub>-concentratie vertoont CH<sub>4</sub> wel een afvlakking. De toename per jaar is sinds 1993 volgens het WMO (2008) duidelijk afgezwakt.

De pre-industriële atmosferische concentratie van N<sub>2</sub>O bedroeg 270 ppb. In 2007 was de concentratie van N<sub>2</sub>O toegenomen tot 320,9 ppb. Dit komt overeen met een totale stijging van ongeveer 18%. Sinds 1988 neemt de concentratie vrij constant toe met 0,8 ppb per jaar. De evoluties van de atmosferische concentraties van CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O voor de afgelopen 10000 (tot 2005) jaar worden geïllustreerd in figuur 2.4 en tonen duidelijk aan dat de concentraties sterk zijn toegenomen sinds 1750.

Figuur 2.4. Atmosferische concentratie van  $CO_2$ ,  $CH_4$  en  $N_2O$  voor de afgelopen 10000 jaar en sinds 1750 (ingevoegde figuren) tot 2005.



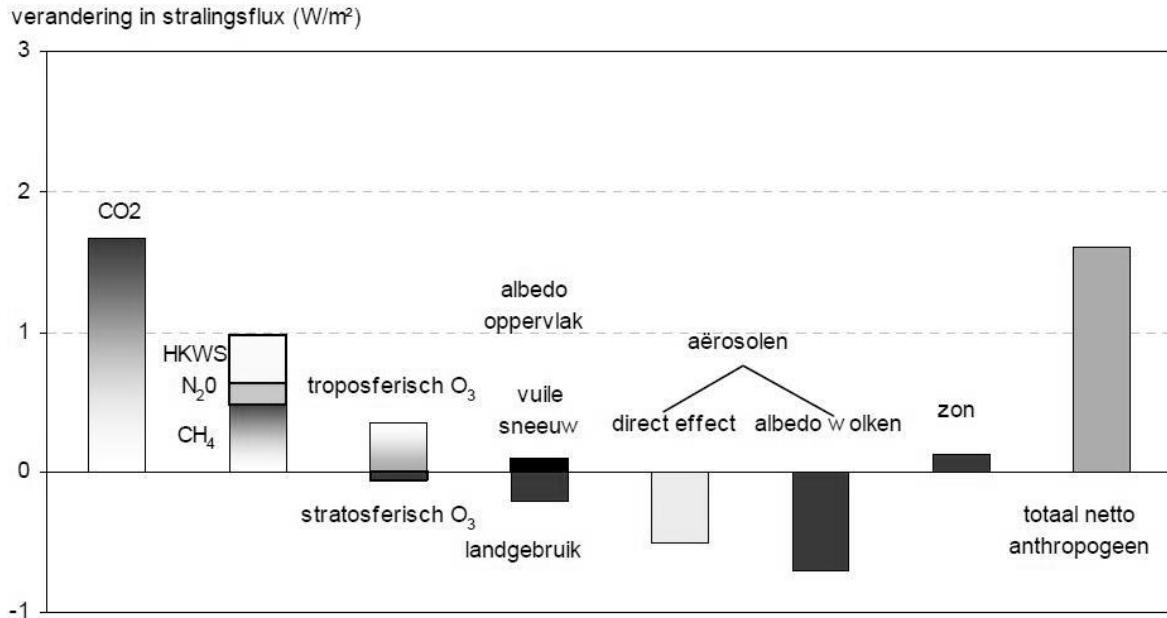
Bron: IPCC (2007)

De evolutie van de overige broeikasgassen wordt ook nog kort onder de loep genomen. Door de afspraken gemaakt in het kader van het Protocol van Montreal (1987) stabiliseren de atmosferische concentraties van de meeste ozonafbrekende stoffen of nemen ze zelfs af. De concentraties van hun vervangproducten nemen volgens het WMO (2008) daarentegen sterk toe. Velders et al (2009) schatten dat HFK's tegen 2050 verantwoordelijk zullen zijn voor 14% van de totale uitstoot van broeikasgassen. Ook de concentratie van  $O_3$  in de atmosfeer is sinds het pre-industrieel tijdperk met 36% toegenomen (IPCC, 2007; WMO, 2008).

Deze hogere atmosferische concentraties van de broeikasgassen zullen het natuurlijke broeikaseffect versterken. Een groter deel van de warmte die het aardoppervlak uitstraalt zal immers worden teruggekaatst in de atmosfeer. Dit zal er voor zorgen dat de aarde verder opwarmt. Dit doet het vermoeden rijzen dat de antropogene uitstoot van broeikasgassen een belangrijke oorzaak zou kunnen zijn van de vastgestelde opwarming van de aarde. Om dit te kunnen besluiten moet echter eerst nog worden nagegaan of er geen andere invloeden bestaan die (mede) verantwoordelijk zijn voor de opwarming. Onderzoek toont volgens het IPCC (2007) duidelijk aan dat de toename van de atmosferische concentraties van broeikasgassen veruit de belangrijkste

antropogene bron van opwarming was tussen 1750 en 2005. De resultaten van dit onderzoek worden grafisch weergegeven in figuur 2.5.

*Figuur 2.5: Gemiddelde totale radiatieve forcering in de periode 1750-2005\**



\*Een positieve verandering in stralingsflux komt overeen met een opwarmend effect.

Bron: VMM (2008), gebaseerd op IPCC (2007)

Het IPCC (2007) concludeert hieruit dan ook dat het grootste deel van de opwarming van de aarde sinds het midden van de 20e eeuw zeer waarschijnlijk (kans >90%) het gevolg is van de toename van antropogene broeikasgassen in de atmosfeer. De relatie tussen de atmosferische concentraties van broeikasgassen en de temperatuur wordt door Kennedy & Hanson (2006) bevestigd door gegevens uit de geologische geschiedenis. Zo blijkt bijvoorbeeld duidelijk uit figuur 2.4 dat de warmere interglaciale periodes in de laatste 650000 jaar telkens overeenkomen met substantieel hogere concentraties van broeikasgassen.

## **2.6. Kritiek/Onzekerheid**

De kennis van de mens over de werking van het klimaatsysteem is de laatste decennia sterk toegenomen. Toch is het volgens Van Dorland & Jansen (2006) bijna nooit mogelijk om uitspraken te doen over het klimaatsysteem die absoluut zeker zijn. Dit komt door het bestaan van een grote interne variabiliteit die moeilijk of zelfs helemaal niet te voorspellen is, door de onvolledigheid van meetreeksen en door de beperkingen van klimaatmodellen.

Ook de voorgaande conclusies van het IPCC (2007) zijn zoals vermeld onder voorbehoud van een onzekerheidsmarge. Het grootste deel van de academische wereld schaart zich achter de bevindingen van het IPCC maar, ondanks de wetenschappelijke bewijzen, zijn er nog altijd wetenschappers die het niet eens zijn met deze conclusies. In het verdere verloop van dit onderzoek gaan we uit van de hypothese dat de bevindingen van het IPCC waarheidsgetrouw zijn.

## **2.7. Toekomstprojecties**

Het is volgens het IPCC (2007) nagenoeg zeker (>99%) dat de mens het klimaat de komende tijd zal blijven beïnvloeden. Zelfs indien de uitstoot van broeikasgassen vandaag volledig zou worden gereduceerd, dan nog zou de aarde op termijn verder opwarmen met 0,6°C. Dit komt omdat de gevolgen van het versterkte broeikaseffect pas met vertraging zichtbaar worden.

Met behulp van klimaatmodellen heeft het IPCC (2007) toekomstprojecties gemaakt voor de verwachte mondiale temperatuurstijging in de 21<sup>e</sup> eeuw. Volgens deze projecties wordt er tegen het einde van deze eeuw een gemiddelde mondiale temperatuurstijging verwacht die tussen de 1,1 en 6,4°C ligt ten opzichte van 1990. Volgens Van Ypersele & Marbaix (2004) zal de stijging van de temperatuur zich in België in de 21e eeuw nog sterker doorzetten. Modelberekeningen voorspellen hier zelfs een toename van 1,7°C

à 6,6°C. De grote bandbreedte in de projecties worden veroorzaakt door de onzekerheid over de toekomstige uitstoot van broeikasgassen en over bepaalde terugkoppelingen in het klimaatsysteem.

## **2.8. Gevolgen klimaatverandering**

De verwachte temperatuurstijgingen uit de vorige paragraaf lijken misschien niet altijd even spectaculair. Niets is minder waar. Zelfs relatief kleine stijgingen kunnen verregaande en onomkeerbare gevolgen met zich meebrengen. De klimaatverandering kan zowel positieve als negatieve gevolgen met zich meebrengen. De aard en omvang van de effecten hangen samen met de grootte en snelheid van de temperatuurstijgingen. Bij eerder matige temperatuurstijgingen (1 tot 2 °C) kunnen vooral rijkere landen zelfs nog netto baten van klimaatverandering hebben terwijl armere landen reeds de kosten van klimaatverandering zullen voelen. Bij grotere temperatuurstijgingen zullen in alle sectoren en landen de kosten groter zijn dan de baten (IPCC, 2007).

In dit deel worden enkele (mogelijke) gevolgen van de opwarming van de aarde kort besproken. Het is hier niet de bedoeling om een exhaustieve lijst van gevolgen te geven. Het is de bedoeling om de lezer een idee te geven van hoe ver de gevolgen van de opwarming van de aarde kunnen reiken. In bijlagen 3 en 4 kan men twee overzichten vinden van de belangrijkste mogelijke gevolgen in functie van de toenemende temperatuur.

### **2.8.1. Neerslag en extreme weersomstandigheden**

Een van de bevindingen van het IPCC van 2007 is dat de neerslagpatronen wereldwijd aan het veranderen zijn. In België is er een duidelijk stijgende trend van de gemiddelde jaarlijkse neerslag. Zo noteerde het KMI sinds 1933 een stijging van de gemiddelde jaarlijkse neerslag met 50 mm. Er komen ook



steeds nadrukkelijker meer natte dan droge jaren voor in ons land, met overstromingen tot gevolg (LNE, 2005).

Ook extreme weersomstandigheden zoals stormen en droogte zijn op wereldschaal sterk toegenomen en zullen verder blijven toenemen. In België is het mogelijk dat er 30% meer stormen zullen voorkomen tegen het jaar 2050 (FOD VVVL, 2009).

### **2.8.2. Impact op ijskappen en gletsjers**

Zoals eerder aangehaald zijn er reeds grote veranderingen waargenomen in de cryosfeer (sneeuw, ijs, permafrost). Ijskappen, sneeuwbedekking en gletsjers in berggebieden smelten wereldwijd sneller dan ooit. Volgens het IPCC (2007) neemt het noordelijk pakijns af met 2,7% per decennium, en in de zomer zelfs met 7,4%. Sommige voorspellingen geven zelfs aan dat op de Noordpool het pakijns in de zomer bijna volledig zal verdwijnen en dat de gletsjer van Groenland op termijn helemaal zal wegsmelten.

### **2.8.3. Oceanen**

In de 20e eeuw is de zeespiegel wereldwijd gestegen met ongeveer 17 centimeter. Aan de Europese kusten stijgt het zeewaterniveau momenteel met 0,8 tot 3 mm per jaar. Dit is te wijten aan het smelten van ijs en de opwarming van de oceanen (IPCC, 2007). Een stijging van de zeespiegel kan ernstige gevolgen voor de laaggelegen kustgebieden en eilanden hebben. Het IPCC (2007) voorziet tegen het jaar 2100 een bijkomende stijging van het zeeniveau van 18 tot 59 cm in vergelijking met de periode 1980-1999. Een nieuwe studie van Grinsted, Moore en Jevrejeva (2009) schat dat het zeeniveau zelfs zal stijgen met meer dan 80cm. Dit bedreigt laaggelegen dichtbevolkte gebieden zoals Nederland en bepaalde delen van België. De meeste klimaatmodellen van het IPCC tonen aan dat een opwarming van meer

dan 1,9°C er voor zou kunnen zorgen dat de zeespiegel zelfs met 7 meter zou stijgen op lange termijn.

Ook de oceaantemperatuur is wereldwijd aan het stijgen. Deze evolutie is het gevolg van de stijging van de luchttemperatuur. Wereldwijd is de temperatuur van het oceaanwater met 0.6 °C gestegen (FOD VVVL, 2009). Dit heeft vooral zijn gevolgen voor de ecosystemen in de oceanen.

#### **2.8.4. Impact op de ecosystemen**

Een toename van de temperatuur met 3°C tegen het jaar 2100 zou overeenkomen met een verschuiving van de klimaatgordels en dus ook van de leefgebieden van de soorten met 300 à 400 km naar de polen. Zulke klimaatveranderingen leggen een grote druk op vele dieren- en plantensoorten. Deze moeten zich aanpassen aan de nieuwe klimaatomstandigheden en worden bovendien geconfronteerd met een invasie van uitheemse, meer warmteminnende soorten uit zuidelijker gebieden. De opwarming van de aarde zal er voor zorgen dat een groot aantal dieren- en plantensoorten met uitsterven zullen worden bedreigd. In ons land loopt 25 tot 75% van de soorten het risico zeer sterk in aantal af te nemen (FOD VVVL, 2009).

#### **2.8.5. Impact op de voedselvoorziening**

Planten, en dus ook landbouwgewassen, hangen voor hun groei ook in hoge mate af van factoren als de temperatuur, de neerslag en de CO<sub>2</sub>-concentratie. Wijzigende klimaatsomstandigheden kunnen dan ook een belangrijke invloed op de landbouw uitoefenen en kunnen de voedselvoorziening wereldwijd op verschillende plaatsen in gevaar brengen. In België verwachten we in de toekomst we voor de meeste gewassen in België initieel nog een verhoogde opbrengst (FOD VVVL, 2009).

De opwarming van het klimaat zal ook een toename veroorzaken van het aantal gebieden waar er een schaarste is aan drinkwater. Tot 2 miljard mensen kunnen volgens schattingen van het IPCC (2007) met een tekort aan drinkwater komen te zitten indien de aarde opwarmt met meer dan 2°C.

### **2.8.6. Impact op de gezondheid**

Klimaatverandering kan ook een impact hebben op de volksgezondheid. Een verdere opwarming van de aarde zal een toename in de frequentie en intensiteit van hittegolven met zich meebrengen. Hittegolven brengen een sterke stijging van sterftegevallen met zich mee. Een voorbeeld hiervan was de extreem warme zomer van 2003, die verantwoordelijk was voor zo'n 20 000 à 30 000 overlijdens in Europa (FOD VVVL, 2009).

Klimaatveranderingen zullen ook zorgen voor veranderingen in de verdelingspatronen van sommige ziekten en plagen zoals bv. Malaria in delen van Europa en Afrika (LNE, 2005).

## **2.9. Geschatte maatschappelijke kost van klimaatverandering**

Er zijn al verschillende pogingen ondernomen om de kosten voor de maatschappij van de klimaatverandering precies te schatten. Het welvaartsverlies is echter zeer moeilijk te kwantificeren omdat het een zeer complexe materie is waarbij men rekening moet houden met vele onzekere factoren (VMM, 2008). Het is dan ook niet verbazend dat de verschillende schattingen van het welvaartsverlies erg uiteen lopen. Een overzicht van de verschillende studies is weergegeven in een artikel van Tol (2005).

Vaak wordt het welvaartsverlies in studies uitgedrukt in termen van het wereldwijde BBP. De meeste studies geven aan dat de totale impact beperkt blijft tot enkele procenten van het mondiale BBP. Deze studies geven een

solide ondergrens van de totale kosten, maar zijn onvolledig omdat ze zich beperken tot de best gekende impacts en zich voornamelijk beperken tot de schade in economische sectoren en volksgezondheid (VMM, 2008).

Sommige studies hanteren een andere indicator: de marginale milieuschadeprijzen per ton CO<sub>2</sub>-eq(uivalent). Deze indicator bouwt voort op de eerste, maar is relevanter voor de meeste beleidsstudies. Tol (2005) heeft 103 resultaten van 28 studies samengebracht. Op basis van 97 schattingen uit 27 studies besluit Tol (2005) dat er weinig evidentie is om externe kosten hoger in te schatten dan 10 EUR/ton CO<sub>2</sub>-eq. Watkiss et al. (2005) suggereren in een vergelijkbare studie iets hogere cijfers, met een centrale schatting van 14 tot 53 EUR/ton CO<sub>2</sub>-eq. De totale bandbreedte van de verschillende studies varieert van 4 tot 89 EUR/ton CO<sub>2</sub>-eq. In beleidsstudies wordt vaak 20 EUR/ton CO<sub>2</sub>-eq gebruikt.

Een recente studie van Stern (2006) wijkt op verschillende vlakken af van deze literatuur. In deze studie worden ook de meer onzekere effecten van het opwarmen van de aarde meegenomen. Stern (2006) schat dat de totale kost van de klimaatverandering op lange termijn kan oplopen tot maar liefst 20% van het wereldwijde BBP als er geen maatregelen getroffen worden.

## Hoofdstuk 3: Rol van de overheid

---

### 3.1. Verschillende ideologieën

Tot de Grote Depressie in de jaren '30 werd het politieke denken in het Westen gedomineerd door het '*klassieke liberalisme*'. Het klassieke liberalisme vond zijn oorsprong op het einde van de 18<sup>e</sup> eeuw. Het was een stroming die een samenleving voor ogen had waarin individuele vrijheid en privaat eigendom centraal stonden en waarin de overheid slechts een zeer beperkte rol speelde. Belangrijke vertegenwoordigers van het klassieke liberalisme waren oa. Adam Smith en Jean-Baptiste Say. Ze legden de basis voor de economische aspecten van het klassieke liberalisme en ook het hedendaagse neoliberalisme.

Adam Smith (1723-1790) was een Schotse econoom die de principes van de vrije markt voor het eerst systematisch verdedigde in zijn boek *The Wealth Of Nations* (1776). Dit werk wordt beschouwd als het eerste moderne werk op het vlak van de economische wetenschap. Een belangrijk concept dat Adam Smith hierin aanbrengt is dat van de '*Invisible Hand*' (Onzichtbare Hand). In een markt waar dat alle consumenten en producenten volledig vrij hun beslissingen kunnen nemen zal de markt volgens Smith altijd resulteren in een productie- en prijsniveau dat de welvaart van de maatschappij in zijn geheel zal maximaliseren, gestuurd door een onzichtbare kracht die hij omschreef als de '*Invisible Hand*'. Actief overheidsingrijpen zou binnen deze visie enkel de werking van de vrije markt zou verstoren (Conway, 1998).

De Franse econoom Jean-Baptiste Say (1767-1832) formuleerde een ander belangrijk economisch concept dat bekend werd als de '*Wet van Say*'. Deze wet wordt vaak geformuleerd als "*Het aanbod schept zijn eigen vraag*". Say stelt hiermee dat er geen vraag kan zijn zonder aanbod. De totale vraag (consumptie) kan per definitie maximaal gelijk zijn aan het totale aanbod

(productie). Consumptie in een economie is immers alleen maar mogelijk door de besteding van de factorvergoedingen die verkregen zijn tijdens de productie. Volgens Say is het dan ook zinloos om de economie te stimuleren aan de vraagzijde (Conway, 1998; Kates, 1997; De Wit, 2009).

De klassieke liberale economen hadden in de jaren '30 echter geen antwoord op de Grote Depressie waarbij de vrije markt er niet in slaagde zich te herstellen. In 1936 publiceerde de Engelse econoom John Maynard Keynes (1883-1946) zijn boek *'The general theory of employment, interest and money'* als een reactie op de Grote Depressie. Hierin promoveerde Keynes een gemengde economie, waarin zowel de overheid als de privésector een belangrijke rol spelen. Keynes en zijn volgelingen geloven, in tegenstelling tot Say, dat de totale vraag naar goederen en diensten de drijvende kracht achter de economie vormen. Vanuit dit standpunt pleitte Keynes voor een anticyclisch overheidsbeleid waarbij dat de overheid in tijden van economische crisis haar monetair en budgettair beleid moet aanpassen om de macro-economische vraag aan te zwengelen zodat het herstel van de economie wordt gestimuleerd. De eerste omvangrijke overheidsinterventies gebaseerd op de theorieën van Keynes vonden plaats op het einde van de jaren '30 in het kader van de 'New deal' onder de Amerikaanse president Roosevelt. De ideologie van Keynes werd na de Tweede Wereldoorlog dominant in het Westen. De overheid werd een centrale speler die de markteconomie stuurde en het kapitalisme beteugelde.

Sinds de jaren '70 en vooral vanaf de jaren '80 deed een nieuwe ideologie zijn opmars in academische kringen, namelijk het *'neoliberalisme'*. Het neoliberalisme is een beweging die zich verzette tegen deze macro-economische theorieën van Keynes en kan worden beschouwd als een voortzetting van het klassieke liberalisme. Net zoals bij het klassieke liberalisme geloven de aanhangers van het neoliberalisme dat het overheidsingrijpen op de vrije markt moet worden beperkt tot het absolute minimum. Bij het neoliberalisme wordt er echter dieper nagedacht over de rol

die de overheid moet spelen in het sturen van de vrije markt. De neoliberalen erkennen dat de overheid moet toezien op de goede werking van de markt. In tegenstelling tot Keynes leggen de neoliberalen ook terug de aandacht op de aanbodzijde van de economie (Harvey, 2005).

De meest invloedrijke neoliberale econoom was Milton Friedman (1912-2006). Friedman was de grondlegger van een belangrijke stroming binnen het neoliberalisme, namelijk het *monetarisme*. Friedman wordt samen met Keynes beschouwd als één van de meest invloedrijke economen van de 20<sup>e</sup> eeuw. De visie van Friedman verschilt echter fundamenteel met die van Keynes. Friedman stelt dat niet de macro-economische vraag maar wel de beschikbare geldhoeveelheid in de economie op lange termijn de bepalende factor van de economische activiteit is. Concreet pleitte Friedman voor een vrije markt zonder overheidsinmenging met een stabiele en gecontroleerde groei van de geldhoeveelheid (De Clerq, 2006).

Onder invloed van het neoliberale gedachtegoed werden de laatste drie decennia gekenmerkt door een sterke deregulering van de Westerse economieën, met de Angelsaksische landen voorop. De liberalisering van de Amerikaanse luchtvaart door de Democratische president Jimmy Carter in de jaren '70 wordt beschouwd als het begin van de neoliberalistische golf. Het neoliberalisme kreeg in de jaren '80 vaste voet aan grond in de Angelsaksische landen door bekende neoliberale politici zoals Margaret Thatcher en Ronald Reagan. In de rest van Europa werd het neoliberale proces vooral pas vanaf de jaren '90 ingezet. Ook in België is er het laatste decennium een duidelijke neoliberale tendens op te merken met oa. de liberalisering van de elektriciteitsmarkt en de privatisering van De Post als voorbeelden.

In het kader van de huidige kredietcrisis komt het neoliberalisme onder zware druk te staan. De sterke deregulering van de financiële markten onder invloed van het neoliberalisme wordt door velen aangehaald als een belangrijke oorzaak van de crisis. We zien dan ook dat politici wereldwijd maatregelen aan

het treffen zijn die indruisen tegen het neoliberale gedachtegoed. Zo zijn de regeringsleiders van de twintig belangrijkste economische machten op zaterdag 15 november 2008 in Washington het eens geworden over een hervorming van het financiële stelsel, met een betere regulering van de financiële markten ('G20 akkoord over betere regulering financiële markten', 2008). Verder zien we ook dat overheden wereldwijd terugvallen op oude Keynesiaanse theorieën om de wereldeconomie terug uit het slop te trekken. Een goed voorbeeld hiervan is het herstelplan van president Obama in de Verenigde Staten naar het model van de New Deal in de jaren '30. De Amerikaanse overheid zal 700 tot 1000 miljard dollar in de economie pompen om deze te stimuleren. Volgens schattingen zal de VS hierdoor in 2009 tegen een begrotingstekort van 12% van het BBP aankijken, iets wat sinds de tweede wereldoorlog niet meer is voorgekomen ('Begrotingstekort VS naar 1,8 biljoen', 2009).

Er bestaat in de academische wereld geen uitgesproken consensus over welke ideologie de beste basis vormt voor het sturen van de economie. Zowel de principes van Keynes als die van het neoliberalisme hebben nog vele aanhangers. Het gekozen beleid in een land zal afhangen van de plaatselijke politieke keuzes. Economisch liberale partijen zullen geneigd zijn om vast te houden aan de neoliberale principes terwijl linkse partijen sneller hun toevlucht zullen zoeken in een systeem met verregaande overheidstussenkomsten, zoals bij Keynes.

In het vorige hoofdstuk hebben we ook al aangehaald dat de wereld naast de huidige economische crisis ook nog te maken heeft met een klimaatcrisis. Verschillende topeconomen en vooraanstaande figuren binnen de Verenigde Naties schuiven het idee van een groene New Deal naar voren als een gezamenlijke oplossing voor beide problemen. Ze stellen voor om het stimuleren van de economie door budgettaire maatregelen te koppelen aan een vergroening van de economie (UNEP, 2008).



### **3.2. Falen van de vrije markt**

Voorvechters van een vrijemarkteconomie zonder overheidsop treden gaan er van uit dat de vrije markt altijd leidt tot de maatschappelijk meest wenselijke uitkomsten. Dit klopt volgens De Borger en Van Poeck (2005) echter alleen indien een economie volledig bestaat uit perfect werkende competitieve markten. In werkelijkheid bestaan er echter geen markten die voldoen aan de voorwaarden om een perfect werkende competitieve markten te zijn en zal de vrije markt niet leiden tot de maatschappelijk meest wenselijke uitkomsten. Men spreekt hier over het falen van de markt. Volgens Van Velthoven en Van Wijck (2007) kan het daarom bevorderlijk zijn voor de maatschappelijke welvaart als de overheid ingrijpt en de marktwerking bijstuurt.

Pindyck en Rubinfeld (2005) onderscheiden 4 mogelijke oorzaken voor het falen van competitieve markten: Marktmacht, imperfecte informatie, externe effecten en publieke goederen. Het is interessant om het bestaan van de zogenaamde 'externe effecten' kort te bespreken omdat deze een hoofdrol opeisen in deze eindverhandeling.

Externe effecten zijn positieve of negatieve neveneffecten van de productie of consumptie voor derden die niet in de normale marktwerking tot uiting komen. Producenten en consumenten houden namelijk geen rekening met deze effecten bij het nemen van hun economische beslissingen. Het gevolg is dat er te veel of te weinig van deze goederen worden geproduceerd in vergelijking met wat maatschappelijk wenselijk is (De Borger & Van Poeck, 2005).

Vervolgens wordt de problematiek van externe effecten verder toegelicht aan de hand van een vereenvoudigd voorbeeld voor de elektriciteitsmarkt waarbij klimaatverandering wordt beschouwd als een negatief extern effect. Er wordt in dit voorbeeld abstractie gemaakt van andere externe effecten die kunnen spelen in de elektriciteitsmarkt.

### 3.3. Klimaatverandering als extern effect

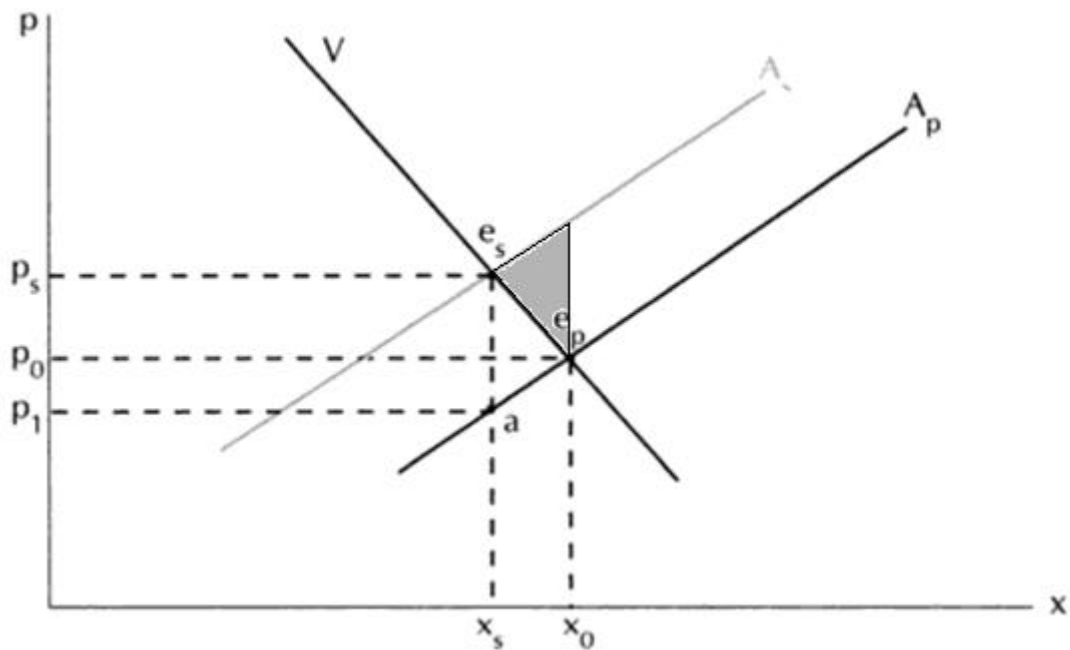
Bij de productie van elektriciteit door klassieke thermische centrales komen er tijdens het productieproces broeikasgassen vrij in de atmosfeer. In het vorige hoofdstuk werd reeds aangetoond dat de uitstoot van broeikasgassen niet te onderschatten extra kosten opleggen aan de maatschappij omdat ze het klimaat verstoren. Dit neveneffect bij de productie van elektriciteit kan worden beschouwd als een negatief extern effect.

Aan de hand van figuur 3.1 op de volgende bladzijde wordt de problematiek van negatieve externe effecten op basis van de elektriciteitsmarkt verhelderd. In figuur 3.1 geeft  $V$  de marktvraag naar elektriciteit weer.  $A_p$  geeft het marktaanbod weer. Producenten zullen, zonder overheidsoptreden, altijd beslissen om de hoeveelheid  $X_0$  te produceren, waarbij de marktvraag gelijk is aan het marktaanbod. Eerder werd al vastgesteld dat dit op een perfect werkende competitieve markt resulteert in een maatschappelijk wenselijke uitkomst. Dit is echter niet meer het geval indien er externe effecten optreden zoals in deze markt.

Het marktaanbod ( $A_p$ ) is namelijk gebaseerd op de marginale private kosten van de producenten in de industrie. Deze omvatten enkel de productiekosten die de producenten zelf dragen. De elektriciteitsproducenten houden bij hun beslissingen geen rekening met de extra kosten die zij opleggen aan de maatschappij als gevolg van hun uitstoot van broeikasgassen. De werkelijke marginale kost van het productieproces ligt dus hoger dan de private marginale kosten. Deze noemt men de marginale sociale kost. Indien men wel rekening zou houden met de marginale sociale kost bij het bepalen van het aanbod zou de aanbodscurve verschuiven naar  $A_s$  en zou de geproduceerde hoeveelheid dalen naar  $X_s$ . In dit punt zou de markt opnieuw leiden tot de maatschappelijk meest wenselijke uitkomst. De grijze driehoek op de figuur stelt het verlies aan welvaart voor de maatschappij voor indien er geen rekening gehouden wordt met het negatieve externe effect. De producenten

van elektriciteit hebben op een vrije markt echter geen enkele motivatie om hun uitstoot van broeikasgassen te beperken aangezien dit kostenverhogend werkt en hun winst hierdoor zal dalen. Een degelijk overheidsbeleid is volgens De Borger en Van Poeck (2005) de enige manier om de private markt te motiveren om minder vervuilend te werken zodat het maatschappelijke optimum bereikt wordt. (Van Velthoven & Van Wijck, 2007; De Borger & Van Poeck, 2005).

*Figuur 3.1: Negatieve externe effecten in de elektriciteitsmarkt\**



\* De y-as stelt de prijs voor en de x-as vertegenwoordigd de geproduceerde hoeveelheid van elektriciteit

Bron: De Borger & Van Poeck (2005)

### **3.4. Beleidsinstrumenten**

De vraag is nu op welke wijze de overheid kan ingrijpen op een private markt met externe effecten zoals de elektriciteitsmarkt om het maatschappelijk optimum na te streven. De verschillende beleidsinstrumenten worden kort besproken. Elk van deze instrumenten heeft zijn beperkingen en zijn voor- en nadelen. In elke situatie moet men nauwkeurig afwegen welk instrument het meest geschikt is om een bepaalde doelstelling te behalen. Ook ideologie kan een rol spelen in deze afweging.

#### **3.4.1. Informeren**

Zoals eerder vermeld zullen rationele producenten altijd kiezen voor de productiemethoden die hun private productiekosten minimaliseren zonder rekening te houden met de externe effecten. Toch kan het gebeuren dat producenten door een gebrek aan informatie niet de goedkoopste productiemethoden toepassen. De overheid kan kiezen om de producenten hierover te informeren indien deze productiemethoden ook voordeliger zijn voor de maatschappelijke welvaart. Hierdoor ontstaat er een win-win situatie waarbij de producenten hun winst zien toenemen en de maatschappelijke welvaart zal stijgen. Een voorbeeld hiervan is de promotie van de warmtekrachtkoppeling (WKK) door COGEN Vlaanderen. Deze vorm van elektriciteitsproductie zal verder in deze masterproef nog geanalyseerd worden.

In veel gevallen zullen de productiemethoden met de laagste private kosten niet optimaal zijn voor de maatschappelijke welvaart. De goedkoopste productiemethoden gaan immers vaak gepaard met grotere externe kosten zoals vb. milieuschade. Indien de overheid producenten wil aanzetten om duurdere productiemethoden toe te passen omdat deze beter zijn voor de maatschappelijke welvaart, zal ze meer dwingende beleidsinstrumenten moeten toepassen.

De laatste jaren zien we echter een evolutie waarbij producenten zich meer en meer willen profileren als milieuvriendelijke bedrijven om zich op die manier te differentiëren van de concurrentie en milieubewuste klanten aan te trekken. De overheid kan op deze trend inspelen en bedrijven bewust maken van de verschillende mogelijke inspanningen die mogelijk zijn om dit doel kostenefficiënt te bereiken. Een voorbeeld van een bedrijf dat zich wil profileren als milieubewust bedrijf is Electrabel. Zo biedt Electrabel momenteel reeds formules aan waarbij klanten tegen een kleine meerprijs kunnen worden voorzien van groene elektriciteit. De overheid kan ook sensibiliseringscampagnes opzetten om op die manier het gedrag van de producenten proberen te beïnvloeden.

### **3.4.2. Milieubelastingen**

Een tweede mogelijkheid bestaat eruit een milieubelasting op te leggen per uitgestoten eenheid van de vervuiling. Indien de overheid hierop een belasting heft, drijft ze voor de bedrijven de productiekost op. Op deze manier dwingt ze de bedrijven om de kosten van de milieuhinder in aanmerking te nemen bij hun aanbodbeslissingen. Hierdoor zal er een nieuw marktevenwicht ontstaan en zal de geproduceerde hoeveelheid, en dus ook de vervuiling, dalen. Een optimale belasting zal er dan ook voor zorgen dat er een maatschappelijk optimum ontstaat op de markt waarbij de marginale opbrengsten gelijk zijn aan de marginale sociale kost. In de praktijk is het bepalen van de optimale milieubelasting niet eenvoudig omdat de informatie vervat in de kosten- en vraagcurven door de overheid niet perfect gekend is (De Borger & Van Poeck, 2005).

Een milieubelasting is volgens Pindyck en Rubinfeld (2005) te verkiezen boven het zetten van normen in bepaalde omstandigheden. Wanneer een milieubelasting wordt opgelegd voor alle bedrijven in een sector, zal dezelfde reductie worden behaald tegen een lagere kost. Verder zullen milieubelastingen producenten ertoe aanzetten om te investeren in nieuwe

technologieën die het mogelijk maken om de emissies in de toekomst nog verder terug te dringen.

### **3.4.3. Uitstootnormen**

Een uitstootnorm is een wettelijke limiet op de hoeveelheid vervuiling dat een producent mag uitstoten. Als het bedrijf deze limiet overschrijdt kan het geldstraffen en zelfs criminele straffen riskeren. De producenten zullen hierdoor verplicht worden om hun uitstoot te verminderen door het installeren van milieuvriendelijkere technologieën. Het zetten van uitstootnormen is interessant omdat dit zekerheid creëert over de reducties die behaald zullen worden. De kosten van deze reductie zijn echter onzeker en zullen zeer waarschijnlijk hoger liggen als bij het opleggen van een milieubelasting (Pindyck & Rubinfeld, 2005).

### **3.4.4. Verhandelbare emissierechten**

Een volgende mogelijkheid voor de overheid is om een systeem van verhandelbare emissierechten op te zetten tussen bedrijven. Emissierechten geven het recht om een bepaalde hoeveelheid broeikasgassen of schadelijke stoffen uit te stoten. De emissierechten worden meestal toegewezen aan de verschillende bedrijven door de overheid. Indien een bedrijf onvoldoende vergunningen heeft voor haar uitstoot moet deze worden bestraft door een monetaire sanctie. De rechten zijn onderling verhandelbaar tussen de bedrijven. Als er genoeg firma's en emissierechten zijn, zal er een competitieve markt ontstaan voor deze rechten. Onder dit systeem zullen bedrijven met een hoge marginale reductiekost emissierechten aankopen terwijl bedrijven met een lage marginale reductiekost hun uitstoot sterk zullen verminderen en hun overbodige emissierechten zullen verkopen. Het emissieniveau vooropgesteld door de overheid zal volgens Pindyck en Rubinfeld (2005) op deze manier met de minste kost worden bereikt. Het combineert de voordelen van een milieubelasting met die van een

uitstootnorm. Een goed voorbeeld van een systeem van verhandelbare emissierechten is de Europese emissiehandel tussen bedrijven. Dit wordt in het volgende hoofdstuk verder besproken.

### **3.4.5. Benchmarking**

Een benchmark is een referentiekader waarmee men de prestaties van verschillende organisaties met elkaar kan vergelijken (Van Dale, 2009). De overheid kan de prestaties van verschillende bedrijven binnen een bepaalde sector wereldwijd vergelijken en de bedrijven verplichten om hun processen te verbeteren tot ze niet meer bij de slechtsten horen. Men zou bijvoorbeeld kunnen streven naar een lagere broeikasgasintensiteit van de elektriciteitsproducenten in België door een doel vast te leggen waarbij ze allemaal dichterbij de wereldtop moeten aansluiten.

In Vlaanderen bestaat er reeds een benchmarkingconvenant voor energie-intensieve bedrijven. Bedrijven kunnen vrijwillig toetreden tot dit convenant. Door toe te treden gaan de bedrijven de verplichting aan om de energie-efficiëntie van hun procesinstallaties op wereldtopniveau te brengen en/of te behouden tegen 2012. Als tegenprestatie voor de inspanningen van de bedrijven garandeert de Vlaamse Overheid dat zij geen bijkomende maatregelen aan de bedrijven zal opleggen op gebied van rationeel energiegebruik of CO<sub>2</sub> (Commissie Benchmarking, 2009).

### **3.4.6. Technische normen**

De overheid kan er ook voor kiezen om technische normen op te stellen voor de bedrijven. Zo kan het de bedrijven verplichten om gebruik te maken van bepaalde productiemethoden. Eén van de belangrijkste argumenten tegen technologievoorschriften door de overheid is volgens Eyckmans en Pepermans (2003) dat informatie vaak ongelijk verdeeld is tussen marktpartijen. Elektriciteitsproducenten die dagelijks beslissingen moeten nemen over

investeringen in hun productiepark zijn meestal veel beter geïnformeerd dan de overheid over de precieze kosten van het gebruik van bepaalde productietechnologieën. De overheid kampt hier met een structureel informatienadeel, met als mogelijk gevolg dat ze een dure productietechnologie voorschrijft (of goedkope technologieën verbiedt) waardoor binnenlandse producenten niet meer competitief zijn in de geliberaliseerde Europese elektriciteitsmarkt. Eyckmans en Pepermans (2003) erkennen echter dat het omwille van het bestaan van externe kosten toch wenselijk is dat de overheid de technologiekeuze probeert te sturen, maar dat er hier meer geschikte instrumenten voor bestaan.

### **3.4.7. Subsidies**

Een laatste mogelijkheid is om de introductie van milieuverbeterende technologieën te subsidiëren. Door middel van directe of indirecte steunmaatregelen kan de overheid er voor zorgen dat bepaalde milieuvriendelijke technologieën toch rendabel worden voor de bedrijven zodat deze toch worden toegepast. De overheid zal uiteraard eerst een grondige economische analyse moeten uitvoeren om te bepalen welke technologieën uit maatschappelijk standpunt het meest wenselijk zijn om te subsidiëren. Het is ook zeer moeilijk om het optimale niveau van subsidies vast te stellen. Een voorbeeld van subsidiëring van milieuvriendelijke technologieën in de elektriciteitssector is het systeem van de groenestroomcertificaten.

Subsidies verschillen fundamenteel van andere beleidsinstrumenten zoals bv. milieubelastingen. Bij deze andere instrumenten draait de vervuiler (producent) immers op voor de kosten van het reduceren. Subsidies kunnen echter worden beschouwd als een soort van omgekeerde belasting waarbij uiteindelijk de overheid/belastingbetaler opdraait voor de kosten van het reduceren van de uitstoot (Pindyck & Rubinfeld, 2005). Zo zullen subsidies, in tegenstelling tot de andere beleidsinstrumenten, de internationale concurrentiepositie van de producenten niet aantasten. Wanneer bv. de



normen of milieubelastingen in andere landen minder streng zijn zullen Belgische producenten het immers moeilijker hebben om hiermee te concurreren omdat hun productiekosten hoger worden. Dit zou op termijn ook kunnen leiden tot een delokalisatie van bedrijven naar landen met soepelere regelgeving.

De overheid heeft echter geen onbeperkte budgettaire ruimte om subsidies uit te trekken. In 2008 bedroeg de Belgische staatsschuld al 86% van het bruto binnenlands product (BBP). Hiermee is de Belgische staatsschuld relatief één van de grootste ter wereld, na Japan en Italië. Uit de meest recente begrotingscontrole van de federale regering in februari blijkt dat het begrotingstekort van de federale regering in 2009 zal oplopen tot 3,4% van het BBP. Bij een ongewijzigd beleid kan dit tekort zelfs toenemen tot 4,5% in 2010. De oorzaken hiervan zijn de zware economische recessie en de geplande relancemaatregelen van de federale regering. Het Internationaal Monetair Fonds (IMF) zelfs verwacht dat de Belgische staatsschuld verder zal oplopen tot 96% van het BBP in 2014. In dit kader blijft er niet veel ruimte om veelvuldig gebruik te maken van subsidies. ('Begrotingstekort loopt op tot 3,4 procent', 2009; Janssens, 2009; IMF ziet groot begrotingstekort tot 2014, 2009).

## Hoofdstuk 4: Beleidskader

---

### 4.1. Een korte geschiedenis

De Engelse natuurkundige John Tyndall (1820-1893) suggereerde 150 jaar geleden al dat kleine veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer konden leiden tot grote klimaatveranderingen. Toch heeft het nog bijna 120 jaar geduurd vooraleer de problematiek rond het versterkte broeikaseffect op de politieke agenda is verschenen (Burchfield, 1981). Pas tijdens de eerste klimaatconferentie in Genève (1979) werd klimaatverandering door de mens voor het eerst erkend als een ernstig mondiaal probleem. Deze conferentie riep regeringen van over heel de wereld op om door de mens veroorzaakte klimaatveranderingen te voorkomen.

In 1988 werd het *Intergovernmental Panel On Climate Change* (IPCC) opgericht door de World Meteorological Organization (WMO) en het milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP). De taak van het IPCC was om beleidsmakers een objectieve bron van informatie te bieden over de klimaatveranderingen. Het IPCC doet zelf niet aan wetenschappelijk onderzoek maar stelt op basis van wetenschappelijke literatuur wetenschappelijke rapporten op. Deze rapporten gelden wereldwijd als de meest gezaghebbende referentiewerken inzake klimaatverandering. De bevindingen van het IPCC hebben een belangrijke rol gespeeld in het stimuleren en uitwerken van een internationaal klimaatbeleid.

De Wereldtop voor Duurzame Ontwikkeling in Rio de Janeiro (1992) was een belangrijke mijlpaal in de strijd tegen de klimaatverandering. Tijdens deze bijeenkomst werd het Raamverdrag van de Verenigde Naties inzake Klimaatverandering (UNFCCC) afgesloten. Dit verdrag dient als een internationaal kader waarbinnen maatregelen kunnen worden getroffen om de klimaatveranderingen tegen te gaan die worden veroorzaakt door de uitstoot

van broeikasgassen. Het Raamverdrag bepaalt dat de atmosferische concentraties van broeikasgassen gestabiliseerd moeten worden op een niveau waarop geen gevaarlijke verstoring van het klimaatsysteem optreedt. Het verdrag trad officieel in werking op 21 maart 1994. Sinds augustus 2007 hebben 192 landen het verdrag geratificeerd. België ratificeerde het Raamverdrag reeds op 16 januari 1996 (LNE, 2005).

In het Raamverdrag werd vooropgesteld dat de industrielanden zich moesten inzetten om hun broeikasgasemissies uiterlijk in 2000 terug te brengen naar het peil van 1990. Van bindende doelstellingen was er echter geen sprake. Tijdens de eerste Conferentie der Partijen (COP1) in Berlijn (1995) werd duidelijk dat geen enkel land zijn engagement zou nakomen.

## **4.2. Het Kyoto-protocol**

In 1997 werd het Raamverdrag daarom aangevuld met het zogenaamde *Kyoto-protocol* waarin wel duidelijke verplichtingen omschreven staan voor industrielanden met concrete reductiedoelstellingen. Hiermee verbinden alle ondertekenende industrielanden (de zogenaamde Annex-I landen) er zich toe om hun gezamenlijke broeikasgasemissies tegen 2008-2012 met 5,2% te verminderen ten opzichte van 1990. Niet-Annex-I landen die het Kyoto Protocol hebben geratificeerd zijn alleen verplicht om een klimaatbeleid te ontwikkelen maar hebben geen kwantitatieve reductiedoelstellingen. Niet-Annex-I landen bevatten de ontwikkelingslanden en snel groeiende economieën. In bijlage 5 kan de volledige lijst met Annex-I landen gevonden worden.

De reductiedoelstellingen in het Kyoto-protocol werden vastgelegd voor een korf van 6 broeikasgassen, namelijk koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>), lachgas (N<sub>2</sub>O) en een aantal fluorverbindingen (HFK's, PFK's en zwavelhexafluoride (SF<sub>6</sub>)). Deze broeikasgassen kunnen ten opzichte van

elkaar worden afgewogen met behulp van hun Global Warming Potential. Dit principe werd reeds besproken in hoofdstuk 2.

Per industrieland werden er precieze reductiedoelstellingen vastgelegd in het Kyoto-protocol. Bij de verdeling van de reductie werd rekening gehouden met de economische draagkracht en de huidige uitstoot van de landen. De originele 15 lidstaten van de Europese Unie, waaronder België, worden beschouwd als één partij binnen het protocol en moeten gezamenlijk hun uitstoot verminderen met 8%. De Europese lidstaten hebben deze reductie achteraf onderling verdeeld in de *Burden Sharing agreement* (1998). Voor België werd een reductiedoelstelling van 7,5% overeengekomen. In bijlage 6 wordt de verdeling van de CO<sub>2</sub>-reductiedoelstellingen voor de 15 Europese lidstaten weergegeven.

De betrokken landen waren overeengekomen dat het protocol enkel bindend zou worden indien het geratificeerd werd door minstens 55 landen, die in 1990 samen ten minste 55% van de totale emissie wereldwijd vertegenwoordigden. Aan deze voorwaarden werd pas voldaan nadat het verdrag ook door Rusland werd goedgekeurd op 23 oktober 2004. Het protocol is 90 dagen later effectief in werking getreden. De reden waarom dat het zo lang duurde vooraleer men 55% had was omdat de grootste uitstoter van broeikasgassen, namelijk de VS, ervoor heeft gekozen in 2001 om het protocol niet te ratificeren. De VS was in 1990 verantwoordelijk voor ongeveer een derde van de totale uitstoot van broeikasgassen, terwijl ze maar 4% van de totale wereldbevolking uitmaken (Jones, 2004). De toenmalige Amerikaanse president George W. Bush en de Amerikaanse Senaat hebben deze beslissing genomen uit vrees voor grote schade aan de Amerikaanse economie en omdat ze het onrechtvaardig vonden dat andere grote vervuilers zoals China en India hun emissies niet moesten reduceren ("President condemns climate change treaty", 2005). Momenteel hebben 179 landen het Kyoto-protocol geratificeerd (UNFCCC, 2009).

### **4.3. Flexibele mechanismen**

Het Kyoto-protocol beoogt in de eerste plaats een vermindering van de uitstoot door interne beleidsmaatregelen maar het protocol laat ook toe om de uitstoot van broeikasgassen te compenseren door de bevordering van koolstofopname via bossen of door een beter bodemgebruik. Bovendien voorziet het protocol in een aantal flexibele mechanismen die de Annex-I landen de mogelijkheid bieden om de reducties in het buitenland te bereiken. Deze mechanismen zorgen ervoor dat de reducties op een economisch efficiënte manier kunnen worden bereikt. De kosten om de emissies te beperken kunnen immers sterk variëren van land tot land terwijl het effect op het klimaat hetzelfde blijft, onafhankelijk van waar de reducties gerealiseerd worden (UNFCCC, 2006).

#### **4.3.1. Internationale emissiehandel (artikel 17)**

In het Kyoto-protocol worden aan alle deelnemende industrielanden een bepaald aantal emissierechten (1 emissierecht = 1 ton CO<sub>2</sub>) toegekend. Deze emissierechten vertegenwoordigen de hoeveelheid broeikasgassen dat een industrieland jaarlijks gemiddeld mag uitstoten in de periode 2008-2012. De internationale emissiehandel laat landen toe om de toegekende emissierechten onderling te verhandelen. Landen die hun emissies verder reduceren dan voorgeschreven kunnen hun overtollige emissierechten verkopen aan landen die hun doelstellingen niet hebben bereikt. Enkel landen met emissiereductiedoelstellingen kunnen deelnemen aan de emissiehandel. De emissiehandel is in 2008 in werking getreden. De annex-I landen kunnen ook bijkomende emissierechten verwerven via projecten in het buitenland. We onderscheiden hierin twee verschillende projectgebonden mechanismen: Joint implementation en het Clean Development Mechanism. Deze worden verderop besproken.

Verschillende auteurs hebben bedenkingen bij de uitwerking van de internationale emissiehandel door het bestaan van zogenaamde 'hot air'. Volgens Bollen en Van Humbeek (2005) verwijst deze term naar het feit dat sommige landen in het Kyoto-protocol emissiedoelstellingen hebben gekregen die ze zullen bereiken zonder enige reductiemaatregelen te moeten nemen. Hierbij denken we vooral aan landen uit de voormalige Sovjet-Unie. Na de val van de Sovjet-Unie kenden deze landen een grote economische achteruitgang. Door het dalen van de economische activiteiten lag het uitstootniveau in deze landen in 2003 volgens het CEESE (2004) ongeveer 25 tot 30% lager dan in 1990. Er wordt volgens Bollen en Van Humbeek (2005) gevreesd dat deze landen de emissiemarkt zullen overspoelen met hun overvloedige emissierechten zodat de andere landen uit kostenoverwegingen deze liever zullen kopen dan zelf reductie-inspanningen te leveren. Ellerman en Decaux (1998) schatten dat hierdoor ongeveer 110 Miljoen ton CO<sub>2</sub>-equivalenten minder aan broeikasgassen zal worden gereduceerd door de industrielanden.

De marktprijs voor emissierechten piekte in vorig jaar in juli 2008 op 24 EUR/ton CO<sub>2</sub>-eq maar daalde nadien sterk omwille van de slechte economische vooruitzichten. De marktprijs bereikte haar absoluut dieptepunt in februari 2009 op minder dan 9 EUR/ ton CO<sub>2</sub>-eq. Sindsdien is de prijs aan het herstellen en in het begin van augustus 2009 flirtte de prijs terug met 13 EUR/ton CO<sub>2</sub>-eq (Carbon Positive, 2009). De huidige economische crisis dreigt volgens Melik (2009) het opzet van de internationale emissiehandel en het Kyoto-protocol te ondermijnen. De economische crisis heeft er immers voor gezorgd dat de industriële productie wereldwijd sterk is gedaald. In de eurozone lag de industriële productie in mei 2009 maar liefst 17% lager op jaarbasis. Ten opzichte van april steeg de industriële productie wel met 0,5%. Dit is de eerste stijging die werd waargenomen sinds augustus 2008 en kan worden beschouwd als een bemoedigend teken voor de slabakkende economie. Deze lagere industriële productie betekent automatisch dat er ook een pak minder broeikasgassen worden uitgestoten waardoor de vraag naar emissierechten sterk zal dalen. Bijgevolg zal de prijs van deze rechten ook

dalen en zullen er minder inspanningen worden gedaan om de productiemethoden milieuvriendelijker te maken.

Een emissiereductie als gevolg van de economische achteruitgang is echter niet duurzaam. Wanneer de economie terug aantrekt zal de uitstoot opnieuw even snel mee toenemen. Het doel van de Kyoto-protocol was om ervoor te zorgen dat de uitstoot van broeikasgassen duurzaam werd gereduceerd doordat de broeikasgasintensiteit van de economie zou dalen. De broeikasgasintensiteit is een indicator voor de milieuefficiëntie die de uitgestoten hoeveelheid broeikasgassen per eenheid van economische activiteit meet. Er gaan om deze reden dan ook meer en meer stemmen op om de emissiehandel te vervangen door milieubelastingen.

#### **4.3.2. Joint Implementation (artikel 6)**

Joint Implementation wordt in artikel 6 van het protocol uiteengezet. Het mechanisme biedt Annex-I landen de mogelijkheid om via financiering van projecten in het buitenland bijkomende emissierechten in de vorm van Emission Reduction Units (ERU's) te verwerven. Deze projecten moeten wel ondernomen worden in landen die eveneens een reductieverplichting hebben. In ruil hiervoor krijgt het investerende land bijkomende emissierechten.

#### **4.3.3. Clean Development Mechanism (artikel 12)**

In het 12e artikel van het Protocol wordt het Clean Development Mechanism (CDM) gedefinieerd. Het mechanisme biedt Annex-I landen, net zoals bij Joint implementation, de mogelijkheid om bijkomende emissierechten te verwerven in de vorm van Certified Emissions Reductions (CER's) door het financieren van projecten in het buitenland. Het grote verschil met Joint implementation is dat de investeringen hier moeten gebeuren in landen die geen reductiedoelstellingen hebben gekregen in het Kyoto-protocol.

Dit mechanisme is volgens Eyckmans en Proost (1998) het meest innoverend in die zin dat dit mechanisme de enige manier is om de ontwikkelingslanden te betrekken in de strijd tegen de opwarming van de aarde. Deze landen worden zo geholpen om aan duurzame ontwikkeling te doen en op die manier hun steentje bij te dragen. Een voordeel van dit mechanisme is dat er nieuwe investeringen terecht komen in de ontwikkelingslanden en dat de overdracht van technologie wordt versneld. Door de verspreiding van de technologie in de ontwikkelingslanden kunnen er hier op termijn meer verminderingen worden gerealiseerd.

#### **4.4. Sancties**

De regels voor naleving van het Kyoto Protocol zijn uitgewerkt in de Marrakesh-akkoorden (2002). Wanneer er wordt vastgesteld dat een land zijn doelstelling niet heeft gehaald, krijgt het eerst de kans om binnen een bepaalde periode alsnog de kans om hieraan te voldoen door bijvoorbeeld extra maatregelen te nemen of gebruik te maken van de flexibele mechanismen. Als een land alsnog in gebreke blijft, volgen er sancties. Na het aflopen van het Kyoto-protocol moet het land de niet gerealiseerde reducties alsnog realiseren, plus 30% erbovenop (Alterra, 2005).

Wanneer de Europese Unie haar emissiereductiedoelstellingen niet haalt, kunnen individuele lidstaten verantwoordelijk worden gesteld voor de niet-naleving van hun verbintenissen onder het Kyoto-protocol. Wanneer de Europese Unie haar doelstellingen wel behaalt, maar een afzonderlijke lidstaat niet, dan kan men geen enkele lidstaat juridisch bestraffen onder de bepalingen van het Protocol. De Europese Commissie kan dan wel nog een procedure opstarten bij het Hof van Justitie voor de niet-naleving van het Europese Gemeenschapsrecht. Dit kan uiteindelijk leiden tot het opleggen van een dwangsom indien de betrokken lidstaat haar veroordeling niet navolgt (LNE, z.d.).



## **4.5. Europees Beleidskader**

De Europese Unie streeft ernaar om op internationaal vlak een pionier te zijn in de strijd tegen de verandering van het klimaat en voert daarom een actief klimaatbeleid. Zo heeft de Europese Commissie onder andere een aantal wetgevende initiatieven genomen die de lidstaten moeten helpen om hun verplichtingen in het kader van het Kyoto-protocol na te komen.

### **4.5.1. European Union Emission Trading Scheme (EU ETS)**

In het Kyoto-protocol werd er een emissiehandel tussen landen voorzien. Voordat het Kyoto-protocol in werking trad, werkte de Europese Commissie al een vergelijkbaar systeem uit dat een emissiehandel organiseerde tussen Europese bedrijven. Het doel van deze richtlijn was om het de lidstaten makkelijker te maken om aan hun verplichtingen in het kader van het Kyoto-protocol te voldoen. De emissiehandel maakt een goedkopere naleving van de bestaande reductiedoelstellingen mogelijk. Het systeem is beperkt tot de CO<sub>2</sub>-emissies van de belangrijkste industriële sectoren maar zal in de toekomst verder worden uitgebreid. De rechten werden in de eerste twee fasen (2005-2007 en 2008-2012) verdeeld onder de bedrijven door de nationale overheden. Het systeem is enkel van toepassing op bedrijven met een verbrandingscapaciteit van minimum 20 Megawatt. In 2005 viel ongeveer 43% van alle broeikasgasuitstoot in de EU onder het ETS (FOD VVVL, 2009).

Het is belangrijk dat er een correcte hoeveelheid emissierechten in omloop worden gebracht. Tijdens de eerste fase van de emissiehandel tussen 2005 en 2008 werden er te veel emissierechten toegekend aan de bedrijven door de nationale overheden. Hierdoor daalde de prijs tot 0,10€/ton CO<sub>2</sub> in september 2007 terwijl deze in zijn piekmomenten in april 2006 nog meer dan 30€/ton bedroeg. Door de overvloed aan uitstootrechten viel voor de bedrijven de financiële stimulans weg om de uitstoot verder te verminderen, omdat de rechten niet veel meer waard waren (Arnott, 2009). In het begin van april

2009 schommelde de prijs van een emissierecht op de Europese markt rond 13EUR/ton. De prijs is zich aan het herstellen na een sterke dip in het begin van deze jaar als gevolg van de slechte economische vooruitzichten. Volgens Harvey (2009) zien de vooruitzichten op de markt er beter uit en zal de markt stabiliseren in 2009. Nieuwe gegevens uit juni bevestigen deze vooruitzichten. De prijs schommelde in het begin van juni net boven 13 EUR/ton. Analisten van New Carbon Finance (2009) verwachten dat de gemiddelde prijs van een emissierecht op de Europese markt zal schommelen rond de 40EUR/ton tegen 2020.

#### **4.5.2. Projectgebonden flexibiliteitsmechanismen**

Verder heeft de Europese Unie ook nog een richtlijn (2004/101/EG) uitgevaardigd die een brug wil vormen tussen het Europese systeem van verhandelbare emissierechten en de projectgebonden flexibiliteitsmechanismen van het Kyoto-protocol. Bedrijven die zich onder het Europese systeem bevinden, kunnen dankzij deze maatregel de emissierechten die ze verkrijgen in het kader van het Clean Development Mechanism en Joint Implementation inzetten om te voldoen aan hun verplichtingen in het Europese emissiehandelssysteem (LNE, z.d.).

#### **4.6. Belgische Beleidskader**

De bevoegdheden over het klimaatbeleid zijn in het federale België verdeeld over de federale overheid en de gewesten. Tabel 4.1 op de volgende bladzijde geeft een beknopt overzicht weer van de verdeling van de belangrijkste bevoegdheden op het vlak van het klimaatbeleid. Deze federale structuur houdt in dat de nationale reductiedoelstelling van 7,5% slechts kan worden gerealiseerd via een lastenverdeling tussen het federale en het gewestelijke niveau (FOD VVVL, 2008).

Na onderhandelingen tussen de Belgische federale staat en de 3 gewesten werd er in 2004 in het Overlegcomité een akkoord gesloten over de verdeling

van de nationale reductiedoelstellingen onder de drie gewesten. Onder dit akkoord neemt het Vlaamse Gewest een reductiedoelstelling op zich van 5,2% tegen 2008-2012. Voor het Waalse Gewest geldt een reductiedoelstelling van 7,5%, terwijl de emissies in het Brusselse Gewest met 3,475% mogen toenemen.

Tabel 4.1: Bevoegdheidsverdeling in België

	<b>Federale Staat</b>	<b>Gewesten</b>
Leefmilieu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- coördinatie van het internationale beleid (waaronder het klimaatbeleid)</li> <li>- productbeleid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- luchtkwaliteit</li> </ul>
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- grote infrastructuren en planning van gas en elektriciteit</li> <li>- tarificatie en belastingen</li> <li>- nucleaire energie</li> <li>- off-shore windenergie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- transport en lokale distributie van gas en elektriciteit</li> <li>- rationeel energiegebruik</li> <li>- energie-efficiëntie</li> <li>- hernieuwbare energie</li> </ul>
Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nationale luchthaven en spoor</li> <li>- belasting op auto's en brandstof</li> <li>- technische normen van auto's</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- autowegen, bevaarbare waterlopen, havens, regionale luchthavens</li> <li>- openbaar vervoer en schoolvervoer</li> </ul>

Bron: FOD Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu (2008)

Deze lastenverdeling houdt echter in dat de Gewesten in totaal meer emissierechten toebedeeld krijgen dan dat België onder het Protocol van Kyoto heeft ontvangen. De federale overheid zal daarom bijkomende maatregelen moeten treffen om er voor te zorgen dat België zijn reductiedoelstellingen behaalt. Er zullen federale maatregelen getroffen worden om de emissies in de gewesten met 4,8 miljoen ton CO<sub>2</sub>-eq te verminderen en verder zal de federale overheid beroep doen op de flexibele mechanismen voor een totaal van 12,3 miljoen ton CO<sub>2</sub>-eq per jaar in de periode 2008-2012 (FOD VVVL, 2008).

## **4.7. Evolutie broeikasgassen**

### **4.7.1. EU-15 en België**

Het European Environmental Agency (EEA) geeft jaarlijks een rapport uit dat de trends en projecties voor de uitstoot van broeikasgassen binnen de Europese Unie beschrijft. Uit het meest recente rapport (2008) blijkt dat zowel België als de EU-15 op schema zitten om hun doelstellingen in het kader van het Kyoto-protocol te halen. Hierbij wordt wel in aanzienlijke mate beroep gedaan op projecten in ontwikkelingslanden.

Volgens de projecties zou de EU-15 met zijn huidige maatregelen de uitstoot terugdringen met 3,6% op het eigen grondgebied. Geplande maatregelen in de toekomst zouden goed zijn voor een aanvullende reductie van 3,3%. Met investeringen in uitstootbesparende projecten in ontwikkelingslanden zou nog eens 3% reductie gehaald worden. Ont- en herbebossingsactiviteiten leveren tenslotte nog een bijkomende reductie van 1,4 procent op. Alles samen zou dit goed zijn voor een reductie van 11,3% tegen 2010. Hiermee zou de EU-15 voldoen aan zijn reductiedoelstellingen in het kader van het Kyoto-protocol, met een marge van 3,3%. Deze gegevens worden overzichtelijk weergegeven in bijlage 7a).

In België zou de uitstoot volgens de projecties in totaal met 3,7% worden ingeperkt tegen 2010. Verder zouden de geplande uitstootbesparende projecten in ontwikkelingslanden nog eens een reductie van 4,8% opleveren. Dit zou samen goed zijn voor een totale reductie van 8,5%, wat een marge van 1% oplevert in het kader van het Kyoto-protocol. Deze gegevens worden overzichtelijk weergegeven in bijlage 7b).

Uit een persmededeling van Hilde Crevits, Vlaams minister van openbare werken, energie, leefmilieu en natuur, op 17 december 2008 blijkt dat de uitstoot van broeikasgassen in Vlaanderen in 2007 al onder het niveau van de

Kyotodoelstelling lag. In Vlaanderen was de uitstoot in 2007 namelijk met 7% gezakt ten opzichte van het basisjaar 1990.

Op het moment van dit schrijven bestonden er nog geen definitieve gegevens over de uitstootniveaus voor het jaar 2008 en later. Toch kan men verwachten dat de uitstoot van broeikasgassen in Europa en in de Annex-I landen (verder besproken) gevoelig lager zal liggen dan verwacht als gevolg van de slechte economische omstandigheden. Een voorlopige studie van Point Carbon (2009) schat dat de uitstoot van broeikasgassen in Europa met een bijkomende 4,4% is gedaald in 2008 als gevolg van de economische achteruitgang.

#### **4.7.2. Annex-I landen**

Volgens gegevens van het UNFCCC (2008) daalde de uitstoot van broeikasgassen in de geïndustrialiseerde landen met 4,7% tussen 1990-2006. Dit positieve resultaat is echter vooral te danken aan de spectaculaire daling van de uitstoot in de zogenaamde 'transiteconomieën' van de voormalige Oostbloklanden na de val van de Sovjetunie. Wanneer men geen rekening zou houden met deze transiteconomieën zou de uitstoot van de Annex-I landen gestegen zijn met maar liefst 9,9% tussen 1990-2006. De landen die vooral verantwoordelijk zijn voor deze slechte cijfers zijn Australia (+28,8%), Canada (+21,7%) en de Verenigde Staten (+14,4%). De gegevens houden geen rekening met veranderingen in landgebruik en bosbouw. Ook hier worden als gevolg van de economische crisis bijkomende dalingen verwacht voor 2008-2009.

#### **4.7.3. Globale uitstoot**

Niet voor alle landen zijn precieze gegevens over de uitstoot van broeikasgassen beschikbaar. Om een idee te krijgen van de evolutie van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen kan er gekeken worden naar de evolutie van de atmosferische concentratie van de broeikasgassen. In

hoofdstuk 2 werd reeds vastgesteld dat de atmosferische concentraties van broeikasgassen nog steeds aan het stijgen zijn. Uit de meest recente gegevens van het WMO (2008) blijkt dat de broeikasgassen in de atmosfeer zijn toegenomen met maar liefst 24,2% tussen 1990-2007. Tussen 2006 en 2007 namen de atmosferische concentraties toe met 1,06%. Dit ligt gevoelig boven de gemiddelde stijging van de laatste 20 jaar en wijst er op dat de globale uitstoot van broeikasgassen ook nog steeds aan het stijgen is. Uit de eerste metingen van de concentraties in 2009 van het NOAA blijkt dat de stijging zich onverminderd verderzet. Het is nog te vroeg om de invloed van de economische crisis op de atmosferische concentraties te zien, omdat het klimaatsysteem met vertraging reageert op veranderingen in de uitstoot van broeikasgassen, maar het valt te verwachten dat de toename van de uitstoot tijdelijk zal afzwakken door de economische crisis.

Volgens Blanford, Richels en Rutherford (2008) is deze onverminderde stijging voor een groot deel te wijten aan een sterke groei van de uitstoot in de ontwikkelingslanden, die geen reductiedoelstellingen hebben in het Kyoto-protocol. Daarbij moeten we volgens hen voornamelijk kijken naar de landen die de laatste jaren een sterke groei kenden, zoals China, India, Rusland en Brazilië. Zo is China volgens schattingen van Auffhammer en Carson (2008) in 2007 al de grootste uitstoter van CO<sub>2</sub> ter wereld geworden. Auffhammer en Carson (2008) verwachten dat de uitstoot van CO<sub>2</sub> in China zelfs nog zal verdubbelen in het komende decennium indien er geen maatregelen getroffen worden.

## **4.8. Post-Kyoto**

### **4.8.1. Langetermijndoelstellingen**

Het doel van het Raamverdrag inzake klimaatverandering is om de atmosferische concentraties van broeikasgassen op lange termijn te stabiliseren op een niveau waarbij gevaarlijke klimaatveranderingen door de

mensen worden vermeden. Gebaseerd op de wetenschappelijke inzichten van o.a. het IPCC (2007) streeft de Europese Unie er naar om de opwarming van de aarde te beperken tot 2°C ten opzichte van het begin van de industriële revolutie.

Er zijn immers sterke bewijzen dat er bij hogere temperaturen onomkeerbare en rampzalige gevolgen voor het milieu zullen plaatsvinden. Het IPCC (2007) schat dat 1 tot 2 miljard mensen te maken zouden krijgen met een tekort aan drinkbaar water. Verder zouden 30% van alle planten en dieren op aarde met uitsterven worden bedreigd. De voedselvoorziening wereldwijd zou ook onder druk komen te staan door dalende productiviteit in de landbouw. Dit zijn slechts enkele van de belangrijkste mogelijke gevolgen indien de drempel van 2°C wordt overschreden. Volgens het VMM (2008) bestaat er bovendien ook de kans dat er zichzelf versterkende natuurlijke processen in werking kunnen treden die tot een oncontroleerbare stijging van de temperatuur zouden kunnen leiden.

Om de opwarming van de aarde te beperken tot maximaal 2°C moeten de atmosferische concentraties van broeikasgassen volgens het IPCC (2007) gestabiliseerd worden op een niveau van 450 ppm CO<sub>2</sub>-eq. Dit doel is enkel nog mogelijk indien de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen krachtig en snel worden verminderd. Uit projecties van het IPCC (2007) blijkt dat de uitstoot hiervoor uiterlijk tegen 2015 moet beginnen teruglopen op wereldschaal. Tegen 2050 zou de werelduitstoot zelfs moeten worden gereduceerd met 50 tot 85%. De ontwikkelde landen moeten volgens De Boer (2007) hierin het voortouw nemen omdat zij grotendeels verantwoordelijk zijn voor de historische uitstoot van broeikasgassen en omdat zij een grotere economische draagkracht hebben. Blanford, Richels en Rutherford (2008) stellen echter dat de stabilisatiedoelstelling op 450 ppm CO<sub>2</sub>-eq niet langer realistisch is. Uit een opiniepeiling van The Guardian in 2009 blijkt dat bijna 9 op de 10 klimaatexperten niet geloven dat de internationale politiek er in zal slagen om deze doelstelling nog te bereiken ('World will not meet 2°C warming target, climate change experts agree', 2009).

#### **4.8.2. Opvolger Kyoto-protocol**

Het Kyoto-protocol loopt op zijn einde tegen 2012. Op de klimaatconferentie in Bali (2007) zijn de onderhandelingen voor een opvolger al op gang gekomen. In december 2009 zal er een nieuwe klimaatconferentie plaatsvinden in Kopenhagen om een nieuw akkoord op te stellen. Het nieuwe akkoord zal zeer ambitieus moeten zijn indien men de opwarming van de aarde wil beperken tot maximaal 2°C. Het is volgens de Europese Commissie (z.d.) duidelijk dat het sluiten van een effectieve mondiale overeenkomst zeer moeilijk zal worden, zeker in deze slechte economische tijden. Positief is wel dat de VS hun medewerking beloofd hebben aan het vervolg op Kyoto ('VS beloven medewerking aan vervolg op Kyoto', 2007).

#### **4.8.3. EU 2020-doelstelling**

De Europese Unie heeft niet gewacht op een nieuw klimaatverdrag en wil alvast het goede voorbeeld geven. Op 8 en 9 maart 2007 beslisten de staats- en regeringsleiders van de Europese Unie in het kader van een ambitieus Europees klimaatplan dat de Europese Unie haar broeikasgasuitstoot tegen 2020 met 20% zal verminderen ten opzichte van 1990. De Europese Unie is zelfs bereid om haar uitstoot te verminderen met 30% indien er hierover een internationaal akkoord wordt bereikt (Europese Commissie, 2008). Om deze 20% reductiedoelstelling te behalen is er een reductie nodig van 14% ten opzichte van 2005. Hiervoor zijn er reducties nodig zowel in EU ETS-sectoren als in sectoren die niet binnen het EU ETS vallen. Men stelt voorop dat de uitstoot binnen de EU ETS moet dalen met 21% tegen 2020 ten opzichte van 2005. In de niet-ETS sectoren is een reductie van 10% het doel. Binnen de niet-ETS sectoren krijgt elke lidstaat ook weer individuele doelstellingen opgelegd. Voor België bedraagt deze -15%.

In het Europese klimaatplan verbinden de lidstaten er zich onder andere ook toe om 20% van hun energieverbruik uit hernieuwbare bronnen te halen tegen



2020. Dit is een belangrijke beperking waarmee er verderop in deze masterproef rekening moet worden gehouden.

#### **4.8.4. Technisch-economische haalbaarheid**

Een analyse van het IPCC (2007) toont aan dat de ambitieuze doelstellingen van de EU zeker haalbaar zijn. Het IPCC heeft aangetoond dat de stabilisatie van de broeikasgassen in de atmosfeer tussen 450-550 ppm CO<sub>2</sub>-eq mogelijk is zonder dat de jaarlijkse groei van het mondiale BBP met meer dan 0,12% wordt afgezwakt. Dit betekent dat het niveau van het mondiale BBP in 2030 en 2050 maximaal 3 en 5,5 % lager zou liggen dan het geval zou zijn zonder een klimaatbeleid. Deze impact op de economische groei is relatief klein als men in het achterhoofd houdt dat het mondiale BBP waarschijnlijk zal verdubbelen tussen 2000 en 2030. Volgens het EEA (2005) zal de impact op het Europese BBP net onder het mondiale gemiddelde liggen. Het VMM (2008) concludeert op basis van deze gegevens dat een verregaand klimaatbeleid haalbaar is voor de wereld, en ook voor Europa.

Deze cijfers zijn volgens het VMM (2008) waarschijnlijk een overschatting van het effect op de economische groei. Zo werd er geen rekening gehouden met de welvaartswinsten die er zullen zijn door de beperking van de gevolgen van de klimaatverandering en andere aanvullende baten van een klimaatbeleid. Anderzijds zijn ze waarschijnlijk een onderschatting omdat het onwaarschijnlijk is dat de beleidsmakers er voor kunnen zorgen dat het meest kostenefficiënte pakket van maatregelen zullen worden genomen.

De voorgaande studies waren niet voorzien op de zware economische crisis waarmee de wereld nu te kampen heeft. Een recentere studie van New Carbon Finance stelt dat de kost voor Europa om aan zijn doelstellingen voor 2020 te voldoen bijna de helft lager zou liggen dankzij de tragere verwachte groei van de economie.

Het reductiepotentieel zit verdeeld over verschillende sectoren in de economie, en het zal nodig zijn om het potentieel in alle sectoren aan te spreken om de ambitieuze doelstellingen op een kostenefficiënte manier te bereiken. Beleidsmakers zullen daarom voor alle mogelijke maatregelen in elke sector een grondige economische analyse moeten uitvoeren om te bepalen welke combinatie van maatregelen een bepaalde reductiedoelstelling op een optimale manier kan bereiken. Vervolgens moeten ze gebruik maken van hun beleidsinstrumenten om ervoor te zorgen dat de optimale combinatie van maatregelen daadwerkelijk worden geïmplementeerd.

## **Hoofdstuk 5: Analyse van de Elektriciteitsproductie**

---

### **5.1. Aanpak**

In dit hoofdstuk worden vervolgens de verschillende mogelijke vormen van elektriciteitsproductie in België geanalyseerd, rekening houdende met de Kyoto- en Post-Kyotodoelstellingen. Er wordt in deze masterproef gekozen om hiervoor gebruik te maken van een kosten-effectiviteitanalyse (CEA). Boardman, Greenberg, Vining en Weimer (2006) definiëren een CEA als een analyse die alternatieven met elkaar vergelijkt in termen van hun kosten en een gekwantificeerde, maar niet gemonetariseerde, effectiviteitsmaatstaf. In dit hoofdstuk worden de totale sociale productiekostprijzen per geproduceerde eenheid elektriciteit voor de verschillende alternatieven tegen elkaar afgewogen.

CEA's zijn een veelgebruikt alternatief voor kosten-batenanalyses (CBA). Een CBA is volgens Boardman et al. (2006) een methode om de gevolgen van een beleidskeuze te kwantificeren in monetaire termen voor de samenleving in zijn geheel. In een CBA staan de analisten voor de taak om alle mogelijke impacten te monetariseren. Het is echter een tijdrovende en zeer moeilijke opdracht om alle mogelijke sociale baten in het kader van deze analyse van de elektriciteitsproductie correct te identificeren en te monetariseren. Boardman et al. (2006) erkennen dat het in zulke situaties verantwoord kan zijn om gebruik te maken van een CEA.

Het verdere verloop van dit hoofdstuk ziet er uit als volgt. Eerst wordt er een kort inleidend overzicht gegeven van de evoluties op de Belgische elektriciteitsmarkt. Vervolgens wordt een beeld geschetst van de wereldwijde energievoorziening en tenslotte worden de verschillende mogelijke vormen van elektriciteitsproductie voor België besproken. Hier wordt er in de eerste plaats aandacht besteed aan de totale sociale kostprijs van elk alternatief en

de veroorzaakte uitstoot van broeikasgassen. Verder wordt er ook kort gekeken naar verschillende beperkingen en andere aspecten van de technologieën die een belangrijke rol kunnen spelen bij het maken van beslissingen.

## **5.2. Evoluties op de elektriciteitsmarkt**

Elektriciteit is niet meer weg te denken uit het dagelijkse leven. Burgers en bedrijven worden in toenemende mate afhankelijk van elektriciteit. Het totale elektriciteitsverbruik in België bedroeg in 2007 volgens gegevens van ELIA (2008) ongeveer 88,8 TWh. Het totale verbruik steeg de jaren voordien gemiddeld tussen 1 en 1,5%. Volgens projecties Gusbin en Hoornaert (2005) zal het verbruik verder stijgen tot 102,4 TWh (+15%) in 2020 en zelfs tot 111,2 TWh (+25%) in 2030.

De bovenstaande gegevens dateren echter nog van voor het uitbreken van de economische crisis. Uit de meest recente gegevens van ELIA (2009) blijkt dat het elektriciteitsverbruik in België in 2008 is gedaald met 1% tot 88 TWh als gevolg van de crisis. De daling was vooral te merken in de laatste maanden van 2008 bij de industriële verbruikers. Ook in de eerste helft van 2009 verwacht ELIA een verdere daling van het elektriciteitsgebruik. De projecties van Gusbin en Hoornaert (2005) zullen dus waarschijnlijk een overschatting zijn aangezien niemand op voorhand deze zware economische crisis had kunnen voorspellen.

Er moet altijd een evenwicht zijn tussen wat aan elektriciteit geproduceerd wordt en wat er afgenomen wordt. Als er geen evenwicht is, kan de netspanning variëren, de frequentie veranderen en uiteindelijk zelfs de stroom uitvallen. Volgens VOKA (2006) zou een volledige stroomuitval van het hoogspanningsnet enorm veel kosten veroorzaken. De kosten voor België worden geschat op maar liefst 50 tot 128 miljoen euro per uur zonder elektriciteit. Eén dag zonder elektriciteit zou met andere woorden een kost

met zich meebrengen van 0,4% tot meer dan 1% van het Belgische BBP. Dit is opmerkelijk aangezien dat één dag slechts 0,27% uitmaakt van een jaar.

De productie van elektriciteit moet dus zeer goed worden gepland. De productiecapaciteit (basis- en piekvermogen) moet voldoende groot zijn om de vraag op te vangen en er moet ook een zeker reservevermogen bestaan voor uitzonderlijke omstandigheden. Uit gegevens van het CREG (2008) blijkt dat België duidelijk te kampen heeft met een structureel tekort aan productiecapaciteit. België is sinds 1992 een netto-importeur van elektriciteit. In 2006 en 2007 werd het Belgische elektriciteitsverbruik ongeveer voor 10% gedekt door de invoer van elektriciteit uit onze buurlanden, voornamelijk uit Frankrijk. In 2008 liep dit volgens ELIA (2009) op tot 10,6 TWh of ongeveer 12% van het totale verbruik. Dit komt overeen met een invoer van elektriciteit ter waarde van meer dan 1 miljard EUR.

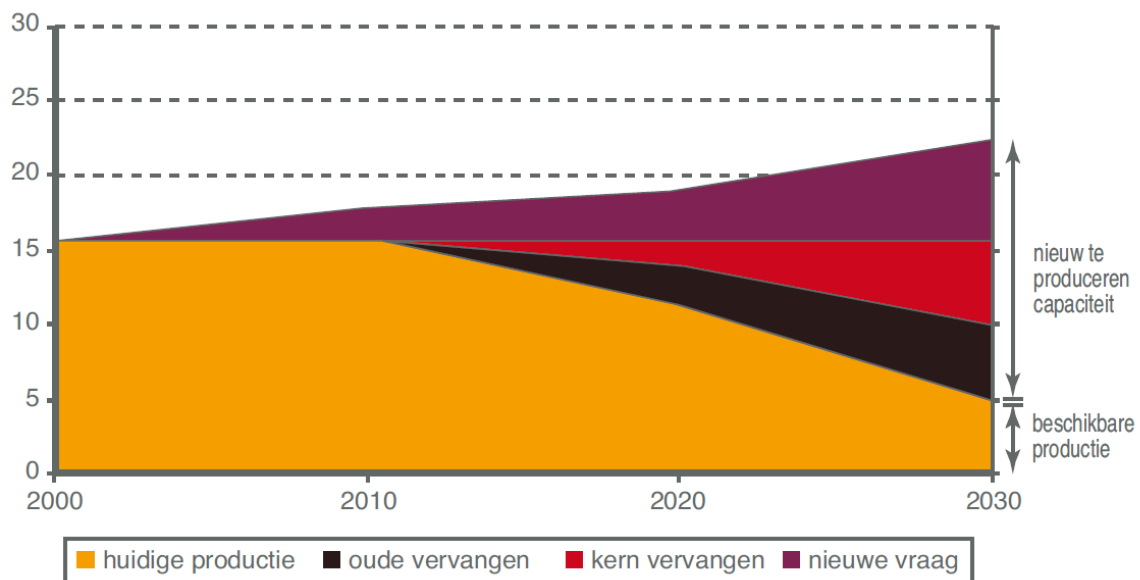
Uit de meest recente gegevens van ELIA blijkt dat het elektriciteitsverbruik in de eerste helft van 2009 nog verder is teruggefallen met 10% ten opzichte van dezelfde periode vorig jaar. Bovendien lag de beschikbaarheid van de Belgische kernreactoren gevoelig hoger dan vorig jaar. Deze twee elementen hebben ervoor gezorgd dat België voor het eerst sinds jaren vrijwel volledig in zijn eigen elektriciteitsbehoefte kon voorzien. Deze gunstige situatie zal echter maar tijdelijk zijn. Wanneer de economie terug aantrekt zal het gebrek aan productiecapaciteit in België weer duidelijk worden ('Verbruik elektriciteit keldert door crisis', 2009).

In 2007 schatte de CREG de extra capaciteit die nodig is voor de toekomst om de elektriciteitsproductie in België veilig te stellen zonder afhankelijk te zijn van invoer uit het buitenland. Volgens deze schattingen zou er in 2008 een tekort zijn van 2000 MW capaciteit. Tegen 2014 zou dit tekort oplopen 2400 MW plus een bijkomend piekvermogen van 480 MW. Na 2015 neemt dit tekort snel toe. De federale regering heeft immers in 2002 beslist dat de Belgische kerncentrales na 40 jaar dienst moeten sluiten. In 2015 worden daardoor de

eerste kerncentrales gesloten en tegen 2025 zullen alle kerncentrales dicht zijn. In 2017, het laatste jaar van de onderzochte periode, zal het tekort oplopen tot 4.800 MW plus een bijkomend piekvermogen van 720 MW.

Investerings in het productiepark zijn dus broodnodig volgens VOKA (2006), zeker gezien de ouderdom van een aantal centrales die nu in België op het net zijn aangesloten. Men mag immers de kost niet onderschatten van het vervangen of vernieuwen van oude elektriciteitscentrales. VOKA (2006) schat dat tegen 2030 maar liefst 68% van het huidige vermogen (inclusief kernuitstap) moet worden vervangen. Reken hier nog eens bij dat volgens schattingen van Gusbin en Hoornaert (2005) de vraag zal stijgen met ongeveer 43% in 2030 ten opzichte van 2000, dan betekent dit dat er tegen 2030 ongeveer 79 TWh aan bijkomende productie moet worden voorzien. Dit komt overeen met maar liefst 89% van het huidige totale elektriciteitsverbruik in België. Dit wordt grafisch weergegeven in figuur 5.1.

*Figuur 5.1: Geschatte productiecapaciteit (in GW) voor België (2000-2030)*



Bron: VOKA (2006)

Bovenstaande schattingen gaan er van uit dat de overheid de kerncentrales zullen sluiten zoals vooropgesteld in 2002. Er gaan wel stemmen op om de

kerncentrales langer open te houden. De federale regering heeft in 2008 een nieuwe studie besteld over dit onderwerp en zal in oktober 2009 beslissen of men de kerncentrales langer wil openhouden ("Geen beslissing over kernuitstap voor regionale verkiezingen", 2008)

De Europese Unie besliste met de Elektriciteitsrichtlijnen van 1996 en 2003 de elektriciteitsmarkt geleidelijk te liberaliseren. De liberalisering kan echter een negatief effect hebben op de leveringszekerheid van elektriciteit. Voor de liberalisering werd de productie van elektriciteit in België centraal geregeld door het CPTÉ (Coördinatie van de Productie en de Transmissie van Elektrische Energie). De stap naar een vrije elektriciteitsmarkt heeft de capaciteitsplanning verschoven van centraal niveau naar de elektriciteitsproducenten. Volgens Lijesen en Zwart (2005) zijn er zorgen of de markt het gevraagde niveau van betrouwbaarheid zal leveren. Het is immers voor de producenten een zeer kostelijke zaak om een reservevermogen te onderhouden voor uitzonderlijke omstandigheden. Het Nederlandse Centrale Planbureau (2006) erkent deze problematiek en stelt dat het de taak is van de overheid om de productie van elektriciteit te sturen door middel van haar beleidsinstrumenten aan te wenden.

De federale overheid moest in 2008 toegeven dat de liberalisering van de elektriciteitsmarkt gedeeltelijk mislukt is omdat er onvoldoende concurrentie is op de markt. In 2008 bezat Electrabel volgens de CREG (2009) nog meer dan 80% van de totale productiecapaciteit voor elektriciteit. Uit winstmarges blijkt dat Electrabel misbruik maakt van deze monopoliepositie. De winstmarges liepen op tot 22% voor Electrabel in 2007. In de buurlanden waren de winstmarges echter beperkt tot gemiddeld 6% ('Liberalisering elektriciteitsmarkt grotendeels mislukt', 2009). Het is volgens de CREG (2009) ook niet mogelijk voor nieuwe spelers om de Belgische markt te betreden. Electrabel beschikt reeds over een evenwicht uitgebouwd machinepark, met onder andere versneld afgeschreven kerncentrales, en dit is niet beconcurrerbaar voor nieuwe spelers.

De elektriciteit werd vóór de liberalisering in België verkocht aan burgers en bedrijven op basis van een vaste prijs die werd bepaald door een Controlecomité. De prijs bleef toen min of meer stabiel omdat die gebaseerd werd op een energiemix en een langetermijnperspectief (VOKA, 2006). De prijsvorming wordt nu overgelaten aan de vrije markt. De elektriciteitsprijs is zeer belangrijk voor de concurrentiepositie van de Belgische economie. Volgens VOKA (2006) is het belang van elektriciteit nergens in Europa groter als in de Belgische economie. Per miljoen euro toegevoegde waarde heeft de Belgische economie gemiddeld meer elektriciteit nodig dan onze buurlanden. Dit wordt weergegeven in tabel 5.1.

*Tabel 5.1: Elektriciteitsintensiteit Belgische economie (2003)*

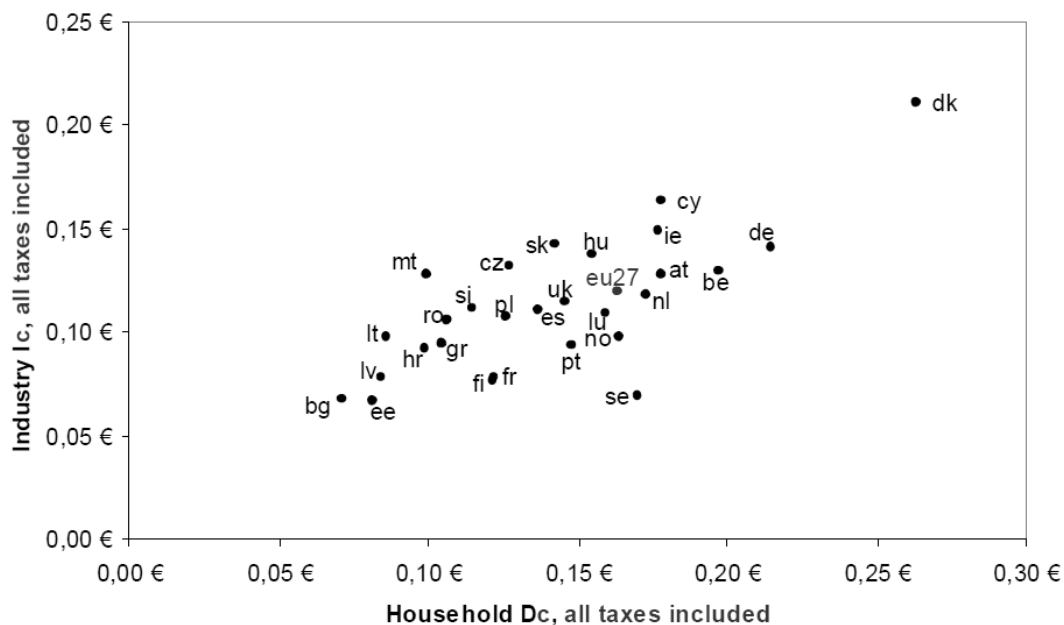
	TJ elektriciteit / M EUR toegevoegde waarde
België	2226
Nederland	1680
Frankrijk	1512
Duitsland	1428
Denemarken	1050

Bron: VOKA (2006)

Op figuur 5.2 kan men aflezen hoe de Belgische elektriciteitsprijzen zich verhouden ten opzichte van de prijzen in de Europese Unie in de eerste helft van 2008. Op de x-as zijn de gemiddelde elektriciteitsprijzen voor huishoudelijk gebruik (2500-5000 KWh) uiteengezet en op de y-as die voor industrieel gebruik (500-2000 MWh). De industriële prijzen liggen in België net iets boven het Europese gemiddelde. In vergelijking met de rest van Europa betalen de Belgische gezinnen veel voor hun elektriciteit. Verder stelt de Europese Commissie (2009) vast dat de elektriciteitsprijzen in België de laatste jaren gevoelig sneller stijgen dan het Europese gemiddelde.



Figuur 5.2: Elektriciteitsprijzen in de EU in EUR/kWh (1<sup>e</sup> semester 2008)



Bron: Europese Commissie (2009)

### 5.3. Energievoorziening

#### 5.3.1. Gebruikte energiebronnen in België

De productie van elektriciteit gebeurt in elektriciteitscentrales door de omzetting van energie. In tabel 5.2 wordt het aandeel van de verschillende mogelijke energiebronnen in de totale Belgische elektriciteitsproductie weergegeven. Hieruit blijkt dat het leeuwendeel van de Belgische elektriciteitsproductie (55%) uit kernenergie komt. Ook aardgas is een belangrijke bron van energie voor de elektriciteitsproductie. De hernieuwbare energiebronnen (zon, water, wind en biomassa) maken nog steeds maar een zeer klein deel uit van de totale productie.

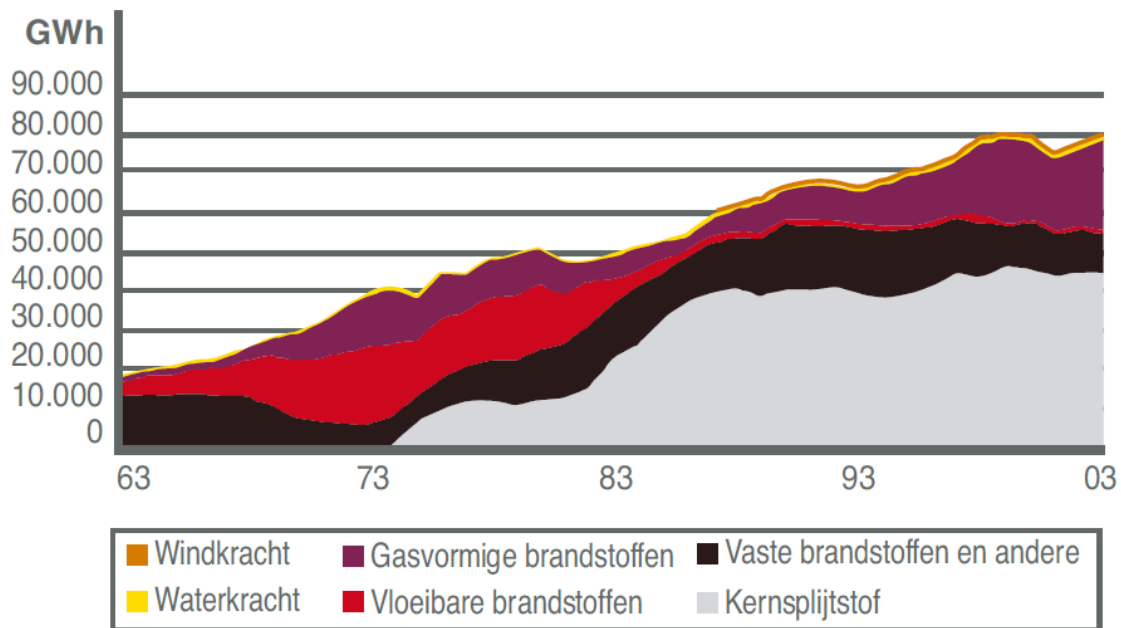
Tabel 5.2: Energiebronnen elektriciteitsproductie België (2006)

Energiebron	Opgewekte Elektriciteit (GWh)	%
steenkool	9216	10,764%
olie	1377	1,608%
gas	23022	26,890%
biomassa	1906	2,226%
afvalverbranding	1199	1,400%
kernenergie	46645	54,481%
waterkracht	1628	1,901%
photovoltaïsche zonnecellen	2	0,002%
windenergie	366	0,427%
<b>Total Production</b>	<b>85617</b>	

Bron: International Energy Agency (2009).

Op figuur 5.3 blijkt duidelijk dat het gebruik van energiebronnen sterk is geëvolueerd sinds de jaren '60. Voor 1970 werd onze elektriciteitsproductie vooral gewonnen uit vaste brandstoffen (steenkool). Eind jaren '60 is men in grote mate overgeschakeld naar vloeibare brandstoffen (olie). Tijdens de olieschokken in de jaren '70 werd duidelijk dat de volledige afhankelijkheid van één energiebron gevaarlijk was en dat een evenwichtige energiemix moest worden nagestreefd. Na de jaren '70 werd de elektriciteitsproductie op basis van vloeibare brandstoffen sterk afgebouwd, voornamelijk ten voordele van kernenergie. De productiecapaciteit uit kernenergie is sinds 1985 ongeveer gelijk gebleven en we zien dat vooral gasvormige energiebronnen sterk aan belang aan het winnen zijn in het laatste decennium.

*Figuur 5.3: Evolutie van de energiebronnen die gebruikt worden voor de opwekking van elektriciteit*



Bron: VOKA (2006)

Zoals reeds werd aangehaald in de inleiding is België voor zijn elektriciteitsproductie bijna volledig afhankelijk van buitenlandse leveranciers voor uranium, steenkool, aardgas en olie. Deze grondstoffen komen immers niet voor in België (uranium, olie en aardgas) of zijn economisch niet rendabel om te ontginnen in België (steenkool). Dit voegt een onzekerheidsfactor toe voor de leveringszekerheid van deze grondstoffen. Bovendien zijn de wereldwijde natuurlijke reserves van deze grondstoffen beperkt. We bespreken deze aspecten kort voor elk van deze energiebronnen.

### **5.3.2. Wereldwijde voorraden en reserves**

In tabel 5.3 wordt een overzicht gegeven van de wereldreserves en -voorraden in 2005. Aan de huidige productiehoeveelheden zullen de momenteel gekende en ontginbare oliereserves nog 41 jaar volstaan. Voor aardgas is er nog een reserve voor 63 jaar en de steen- & bruinkoolreserves

zijn nog voldoende voor 374 jaar als de huidige productie blijft aanhouden. De voorraden van uranium volstaan bij het huidige gebruik nog ongeveer 47 jaar.

*Tabel 5.3: Wereldwijde reserves en voorraden van energiebronnen (2005)\**

	reserves <sup>1</sup> 2005 (EJ)	voorraden <sup>2</sup> 2005 (EJ)	winning <sup>3</sup> 2005 (EJ)	beschikbaarheid reserves <sup>4</sup> (jaar)	beschikbaarheid voorraden <sup>4</sup> (jaar)
conventionele olie	6 755	3 430	163	41	21
niet-conventionele olie <sup>5</sup>	2 761	10 460			
aardgas	5 676	6 555	90	63	73
niet-conventioneel aardgas <sup>6</sup>	63	48 633			
harde steenkool	18 347	104 573	123	150	853
zachte bruinkool	2 062	10 184	9	224	1 107
uranium	799	5 304	17	47	314
thorium	908	964	402	2	2
<b>totaal</b>	<b>37 371</b>	<b>190 103</b>	<b>804</b>		

<sup>1</sup> Reserves zijn hoeveelheden niet-hernieuwbare energiebronnen die op dit ogenblik technologisch en economisch winbaar zijn.

<sup>2</sup> Voorraden zijn hoeveelheden niet-hernieuwbare energiebronnen waarvan geologen het bestaan weliswaar al hebben aangetoond, maar die nog niet technologisch en economisch winbaar zijn.

<sup>3</sup> Winning is de hoeveelheid die gewonnen werd in 2005.

<sup>4</sup> Beschikbaarheid: periode gedurende dewelke de reserves/voorraden nog beschikbaar zijn aan de huidige productiehoeveelheden.

<sup>5</sup> Niet-conventionele aardolie: aardolie die men niet kan winnen uit ondergrondse reservoirs door gebruik te maken van putten en/of aardolie die een aanvullende behandeling vereist om er 'kunstmatige ruwe aardolie' van te maken (bv. olieschalie, teerzanden, zeer ruwe aardolie).

<sup>6</sup> Niet-conventioneel aardgas: aardgas afkomstig van reservoirs die niet via normale technieken kunnen geëxploiteerd worden (bv. waterijs waarin aardgas zit gevangen).

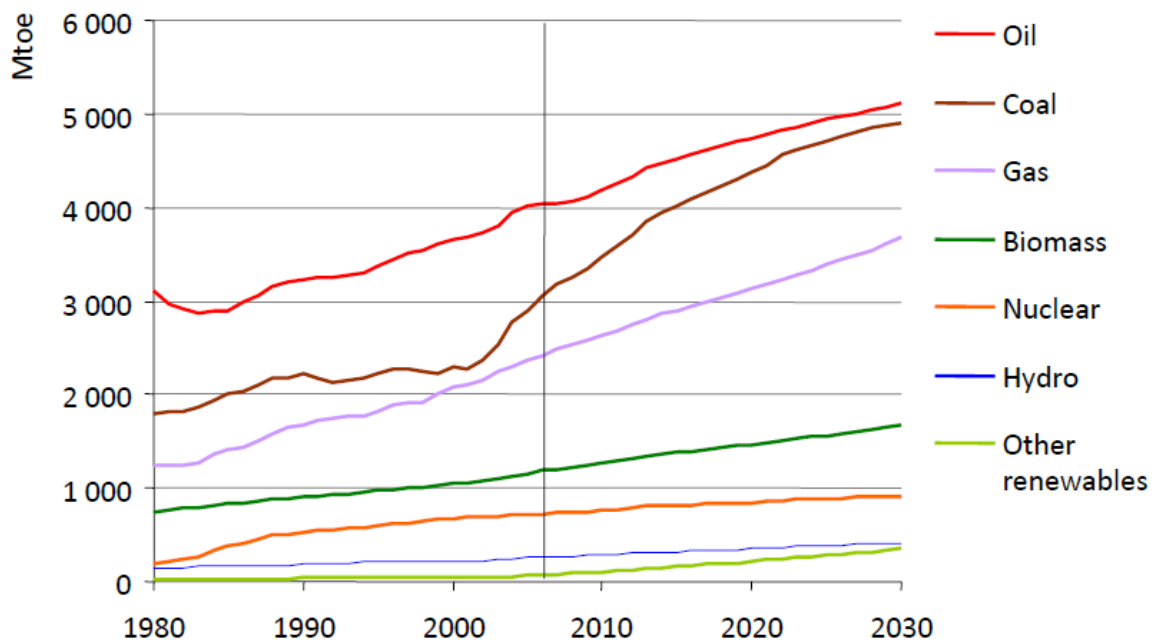
\* 1 EJ = 10<sup>18</sup> J

Bron: VMM (2007) op basis van Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007)

Het mondiale energiegebruik groeit echter jaarlijks en zal naar verwachting ook in de komende decennia blijven groeien. Het International Energy Agency (IEA) (2008) schat dat de totale wereldwijde vraag naar energie tegen 2030 zal stijgen met 45%. Dit vertegenwoordigt een stijging van gemiddeld 1,6% per jaar. De vraag naar de niet-hernieuwbare energiebronnen uranium, olie, aardgas en steenkool zal hierdoor ook stijgen. Deze stijging wordt grafisch weergegeven in figuur 5.4. De vraag naar olie zal toenemen met ongeveer 25%. De vraag naar aardgas en steenkool neemt echter een pak sneller toe met respectievelijk 50% en 57%. De vraag naar uranium stijgt het minst snel, namelijk met 20%. Deze verwachte groei zal de wereldwijde reserves en

voorraden van niet-hernieuwbare energiebronnen sneller doen slinken dan voorspeld. Anderzijds moet men er rekening mee houden dat niet alle voorraden van deze energiebronnen al ontdekt zijn. De World Nuclear Association (2008) schat zo bijvoorbeeld dat er nog een tienvoud van voorraden aan uranium kan worden ontdekt.

*Figuur 5.4: Evolutie van de wereldwijde vraag naar energie\**



\* 1 Mtoe = 42 TJ =  $42 \times 10^{12}$  J

Bron: International energy agency (2008)

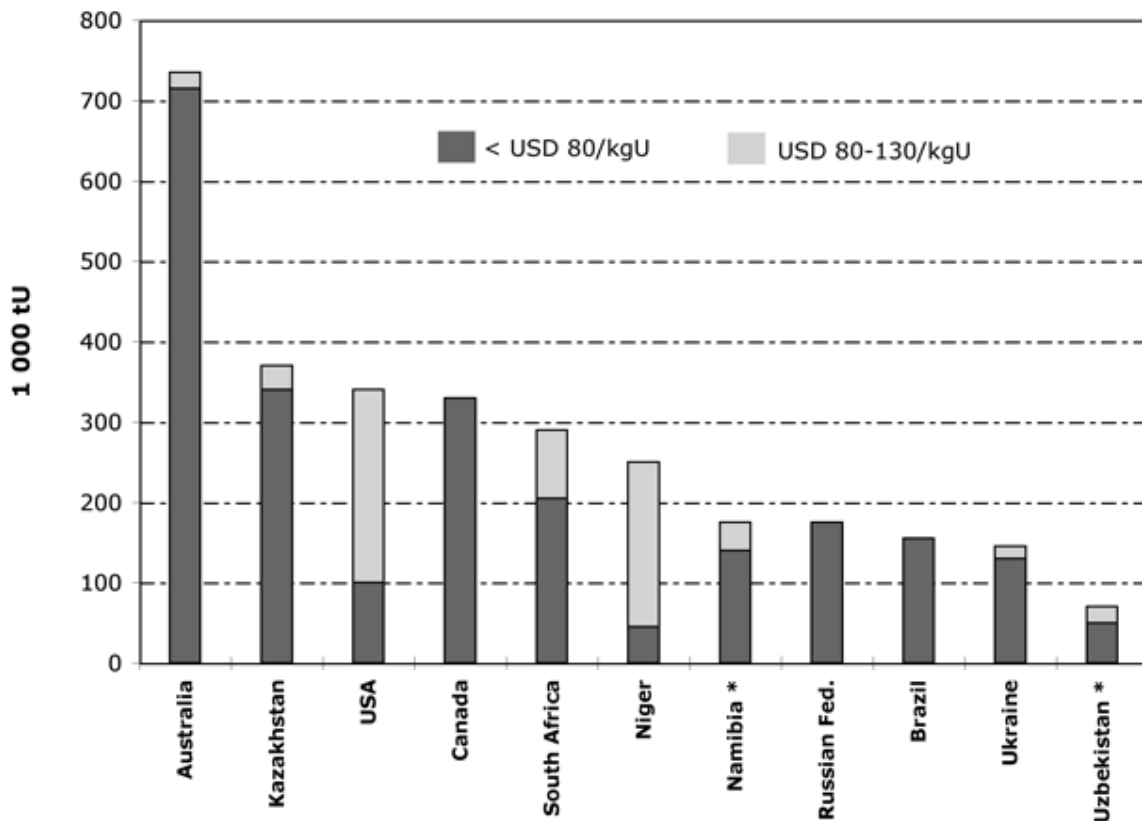
### 5.3.3. Geopolitieke afhankelijkheid

Geopolitieke factoren kunnen ook een invloed hebben op de leveringszekerheid van de benodigde grondstoffen. De voorraden van grondstoffen zijn ongelijk verdeeld over de wereld en de politieke relaties met de energierijke gebieden zijn dan ook belangrijk.

De World Nuclear Association (2008) houdt jaarlijks een inventaris bij van de beschikbare voorraden van *uranium* wereldwijd. De inventaris voor 2007

wordt weergegeven op figuur 5.5. De voorraden op de figuur worden ook onderverdeeld in twee groepen, naargelang de kost voor het ontginnen van de voorraden. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat er verschillende mogelijke leveranciers zijn van uranium, waardoor men niet afhankelijk wordt van één leverancier. Bovendien bevinden de voorraden zich voornamelijk in politiek stabiele regio's.

*Figuur 5.5: Uraniumbronnen in 2007*



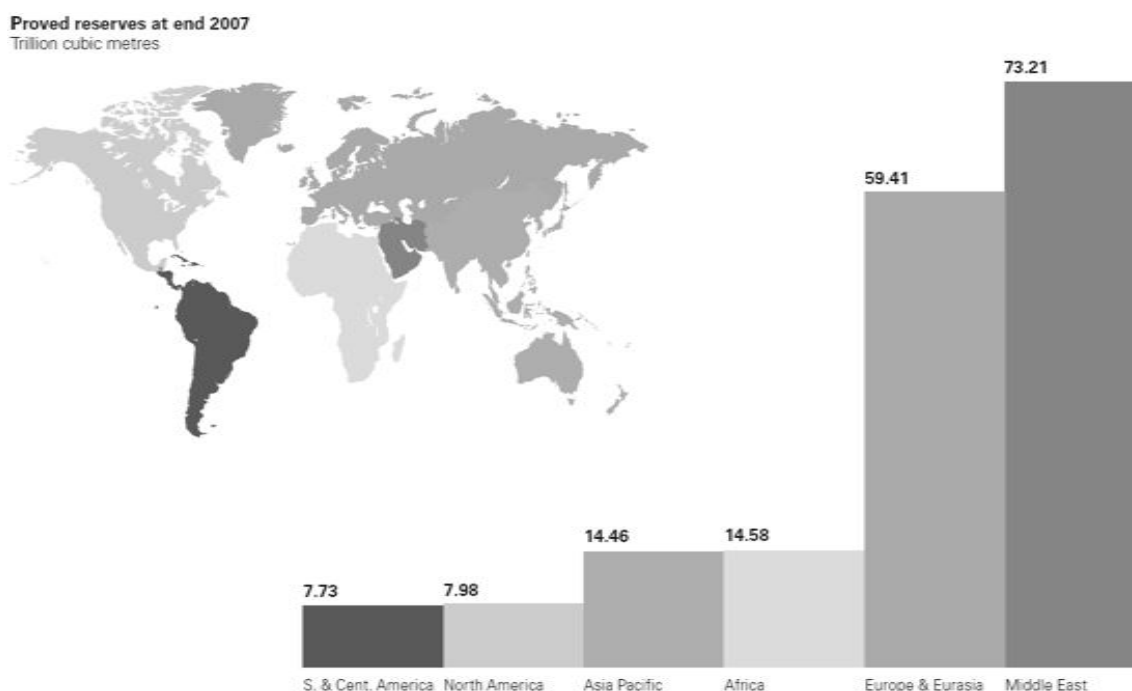
Bron: International energy agency (2008)

Ook op het vlak van kortermijnleveringszekerheid biedt kernenergie volgens VOKA (2006) duidelijke voordelen. De energiedichtheid is immers zeer groot. Zo bevat 1 kg uranium maar liefst  $80 \times 10^6$  MJ aan potentiële energie. Het gemiddelde jaarlijkse elektriciteitsgebruik van een huishouden wordt geschat op 13140 MJ. Zonder rekening te houden met verliezen bij de energieomzetting, zou 0,16 gram dus voldoende zijn om één huishouden een jaar lang van elektriciteit te voorzien. Door deze hoge energiedichtheid kan de

brandstof gemakkelijk voor meerdere jaren opgeslagen worden, zelfs binnen de bestaande nucleaire centrales.

De wereldwijde voorraden van de fossiele brandstoffen (aardgas, olie en steenkool) worden jaarlijks opgevolgd door BP. Hun meest recente rapport dateert van juni 2008. Op figuur 5.6 kan men de verdeling van de wereldwijde *aardgasreserves* op het einde van 2007 aflezen. Hierop kan men zien dat de belangrijkste reserves van aardgas zich in Europa, Azië en het Midden-Oosten bevinden. In deze grafiek werden de voorraden voor Europa en Azië samengeteld. Dit geeft echter een vertekend beeld. Meer dan 80% van deze 'Eurazische' voorraden liggen namelijk in de landen van de voormalige Sovjet-Unie (voornamelijk in Rusland met 75%).

*Figuur 5.6: Verdeling aardgasreserves (2007)*

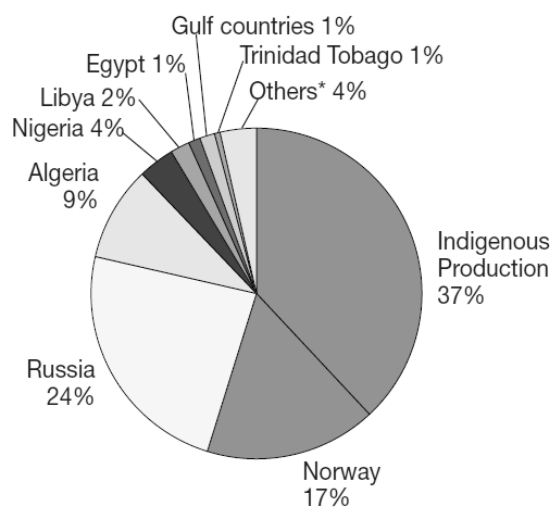


Bron: BP (2008)

Eurogas houdt alle bewegingen van aardgas in Europa bij. Op figuur 5.7 wordt de herkomst van alle gebruikte aardgas in de EU weergegeven voor het jaar 2007. 51% van het gas dat in de EU gebruikt wordt, komt uit de EU zelf en uit

Noorwegen. De rest wordt uit niet-EU landen geïmporteerd. Daarvan kwam in 2007 24% uit Rusland en 18% uit Noord-Afrika, Nigerië en het Midden-Oosten. Heel wat aardgas komt dus uit politiek minder stabiele landen, wat een belangrijke invloed kan hebben op de aanvoer. Dit gevaar bleek al eens in 2006 toen de Russische gasreus Gazprom de gaskraan naar Oekraïne dichtdraaide omdat er een geschil was over de prijs van het gas. Dit had een effect op de gastoevoer voor heel de EU ('Gazprom stopt gasleveringen Oekraïne', 2006).

*Figuur 5.7: Bronnen van aardgas voor de EU (2007)*



Bron: Eurogas (2008)

Volgens VOKA (2006) ziet het ernaar uit dat de Europese reserves relatief snel uitgeput zullen geraken. Als de huidige trend zich doorzet, zouden we tot 80% van het gas dat we nodig hebben in Europa, moeten importeren tegen 2020.

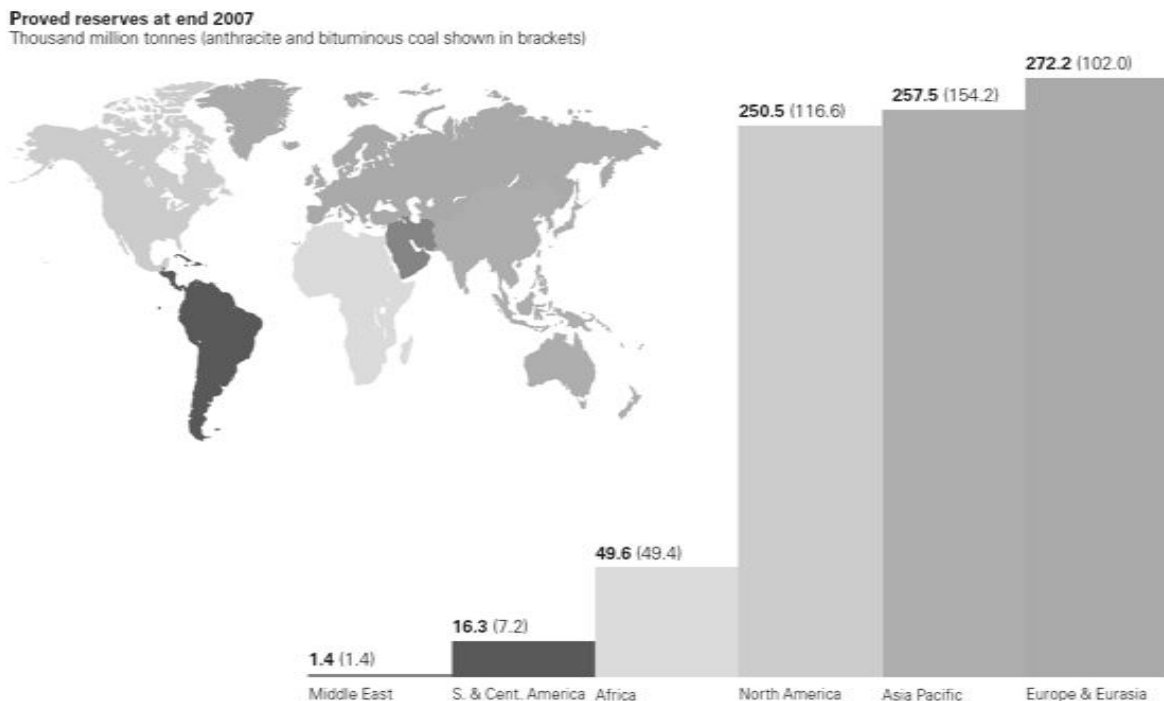
De kortetermijnleveringszekerheid van aardgas is ook maar bedenkelijk. De energiedichtheid van gas ( $35\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ) is beduidend lager dan die van uranium. Men heeft dus minimaal  $375\text{ Nm}^3$  aardgas nodig om één huishouden een jaar lang van elektriciteit te voorzien. Bovendien is gas moeilijk om op te slaan en dit maakt het moeilijk om grote voorraden aan te leggen. In België is er slechts een opslagcapaciteit voor 3% van het jaarlijkse gasgebruik



beschikbaar. Het Russische gasconcern Gazprom heeft in het begin van 2009 al wel aangegeven dat het geïnteresseerd is om bijkomende ondergrondse opslagfaciliteiten te bouwen in de Antwerpse Kempen ('Gazprom onderzoekt sites in Loenhout en Poederlee', 2009)

De wereldwijde verdeling van *steenkool* wordt vervolgens weergegeven in figuur 5.8. De voorraden van steenkool zijn verspreid over de hele wereld en in politiek stabiele regio's. Zo werd in 2004 de steenkool in België voornamelijk ingevoerd door Australië (25,4%), Zuid-Afrika (29,9%) en de Verenigde Staten (16,5%) volgens het VITO (2006).

*Figuur 5.8: Verdeling steenkoolreserves (2007)*

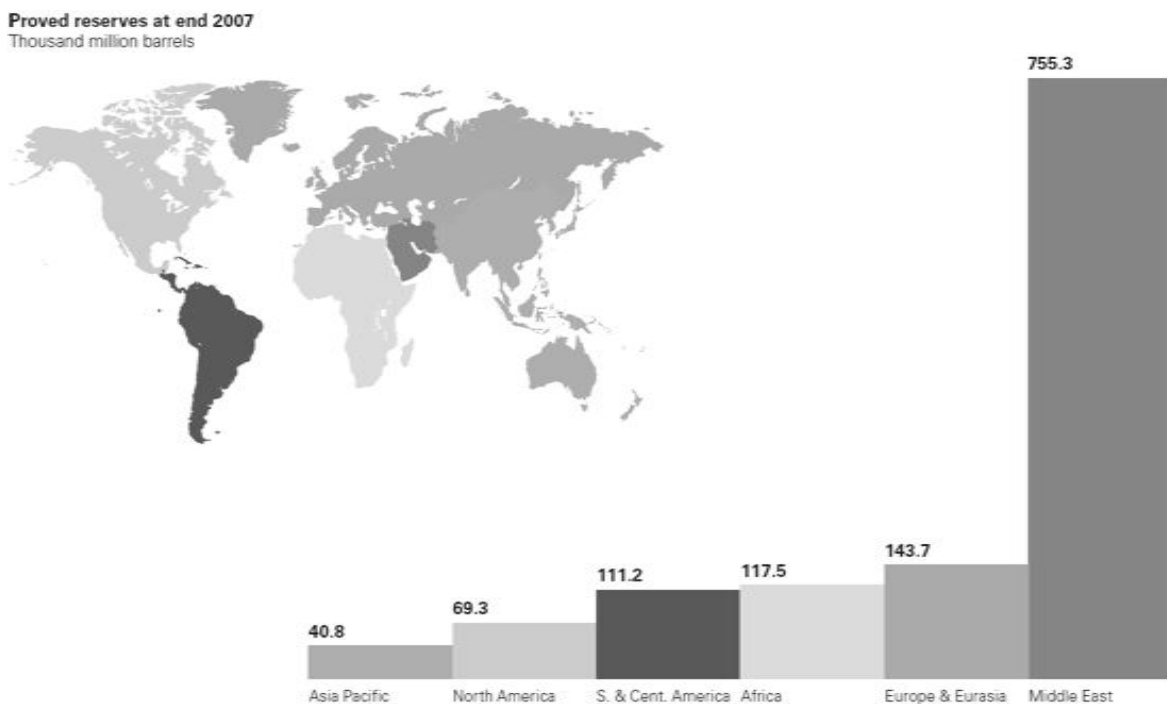


Bron: BP (2008)

Ook op kortetermijnleveringszekerheid scoort steenkool beter dan aardgas. Steenkool is immers veel eenvoudiger te stockeren dan gas. De energiedichtheid van steenkool is 30 MJ/kg. Er is dus jaarlijks 438 kg steenkool nodig om één huishouden van elektriciteit te voorzien.

Tenslotte bekijken we nog de verdeling van de oliereserves. Deze wordt weergegeven op figuur 5.9. We zien dat ongeveer 75% van de beschikbare oliereserves zich in het Midden-Oosten bevinden. Dit is een politiek onstabiele regio wat de olievoorziening zeer onzeker maakt. Bovendien hebben een aantal landen, die samen 75% van de totale oliereserves wereldwijd controleren, in 1960 de OPEC opgericht. De OPEC is in feite een kartel dat werd opgericht om de olieprijs te controleren. Een voorbeeld van de instabiliteit van de olievoorziening zijn de oliecrisisen in de jaren '70, mede veroorzaakt door de OPEC.

*Figuur 5.9: Verdeling oliereserves (2007)*



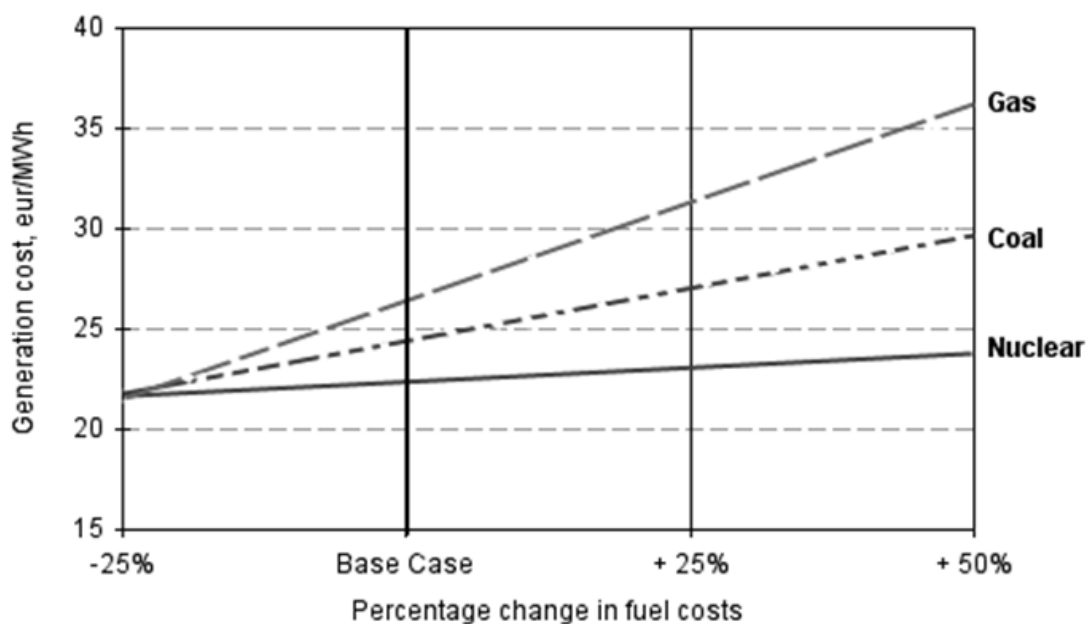
Bron: BP (2008)

Ruwe olie heeft een energiedichtheid van ongeveer 38 MJ per liter. Er zou dus jaarlijks minstens 346 liter ruwe olie nodig zijn om één huishouden één jaar lang van elektriciteit te voorzien.

### 5.3.4. Grondstofprijzen

Bij de keuze tussen energiebronnen moet men ook rekening houden met de prijs van de grondstoffen. Deze kunnen ook een grote impact hebben op de productiekosten. De relatieve gevoeligheid van de totale productiekosten voor veranderingen in grondstofprijzen verschilt voor de verschillende energiebronnen. Op Figuur 5.10 wordt deze gevoeligheid weergegeven voor de drie belangrijkste energiebronnen in de elektriciteitsproductie: steenkool, gas en kernenergie. Deze gegevens zijn gebaseerd op een Finse studie uit 2000. Uit de figuur blijkt duidelijk dat elektriciteitsproductie met behulp van aardgas het meest gevoelig is voor prijsschommelingen van de grondstoffen. Een stijging van de gasprijs met 50% resulteert in een stijging van de productiekosten van meer dan 35%. Bij steenkool zou dit maar een stijging van ongeveer 25% opleveren en bij nucleaire energie slechts ongeveer 10%.

*Figuur 5.10: Gevoeligheid productiekosten voor grondstofprijzen*



Bron: Wold Nuclear Association (2009)

De olieprijsen zijn in het verleden al zeer onstabiel gebleken. Hierbij wordt er in de eerste plaats teruggedacht aan de oliecrisissen in de jaren '70, maar ook in het laatste decennium was dit het geval. In het begin van 2003 was een vat olie 20 USD waard. In juli 2008 piekte de olieprijs tot bijna 150 USD per vat, een stijging van 650%. Vervolgens zijn de olieprijsen, mede dankzij de huidige economische crisis, weer gezakt tot een niveau van onder de 40 USD/vat in december 2008. De huidige olieprijs (augustus 2009) schommelt rond 70 USD/vat (Oil-price.net, 2009; 'Olie eindigt jaar meer dan 100 dollar onder record', 2008). Op lange termijn zal de prijs van olie zonder twijfel structureel toenemen. De vraag naar olie zal snel toenemen door groeiende economieën zoals China, de productiekosten zullen stijgen en de beschikbare voorraden zullen snel afnemen. Het IEA (2008) schat dat de gemiddelde prijs van olie ongeveer 100 USD/vat zal bedragen over de volgende twee decennia. In 2030 zou de prijs zelfs oplopen tot 200 USD/vat.

Er bestaat geen wereldmarkt voor gas en de prijzen kunnen dan ook lokaal sterk verschillen. In Europa komen de gasprijzen volgens Cleutinx (2008) sterk overeen met de olieprijsen. Dit komt omdat gas en olie in vele situaties perfect substitueerbaar zijn. De gasprijzen in Europa verviervoudigden tussen 2003 en 2008 van 120-150 USD voor 1000 Nm<sup>3</sup> tot 450-500 USD voor 1000 Nm<sup>3</sup>. Sinds eind 2008 zien we dat de gasprijzen ook weer sterk aan het dalen zijn. De huidige gasprijs (begin augustus 2009) schommelt rond de 350 USD per 1000 Nm<sup>3</sup> (GDF Suez, 2009). De gasprijzen in Europa zullen in de toekomst een stijgende trend hebben volgens het VMM (2007) door de toenemende vraag en uitputting van de Europese gasvelden.

De prijs van kolen is volgens het VMM (2007) relatief stabiel in vergelijking met deze van de andere fossiele energiebronnen olie en aardgas. De reden hiervoor is dat de internationale kolenmarkt een competitieve markt is met veel vragers en aanbieders, met weinig of geen toetredingsbelemmeringen en dat er grote beschikbare voorraden voor handen zijn. De steenkoolprijs bedroeg op 11 augustus 2009 64,85 USD/ton in Europa. In het begin van

2008 piekte de steenkoolprijs nog rond de 125 USD/ton door een kleine steenkoolcrisis. OESO-voorspellingen houden er rekening mee dat de huidige prijs van steenkool zal verdubbelen tegen 2050 ('Steenkoolprijs op record door productieverstoringen', 2008; 'Coal prices in Europe hovers at lower levels than in Asia', 2009; 'Energy: Coal prices rise on Europe sales', 2009)

De prijs van uranium is volgens de World Nuclear Organisation (2009) lange tijd relatief stabiel gebleven tot in het begin van 2003. Daarna is de prijs sterk gestegen van 11 USD/pond tot een piek van 140 USD/pond in 2007. Vervolgens daalde de prijs terug sterk en op 10 augustus 2009 bedroeg de prijs nog 48 USD/pond (UXC, 2009). Het VMM (2008) verwacht op termijn een stijgende trend van de uraniumprijzen door een sterke toenemende vraag en door hogere ontginningskosten.

In tabel 5.4 worden de grondstofprijzen met elkaar vergeleken door ze uit te drukken in termen van potentiële energie. De uitkomsten werden berekend op basis van de energiedichtheden en de huidige prijzen van de grondstoffen die reeds in het hoofdstuk werden besproken. We zien dat de prijzen voor 1 GJ potentiële energie het hoogste zijn bij olie en gas. De prijs voor 1 GJ bij uranium ligt zoals te verwachten veel lager. Deze prijzen zijn enkel illustratief aangezien ze zijn berekend vóór de omzetting van energie. Bij de omzetting van potentiële energie naar bv. elektriciteit moet men ook nog rekening houden met het optreden van verliezen.

*Tabel 5.4: Vergelijking grondstofprijzen per eenheid potentiële energie\**

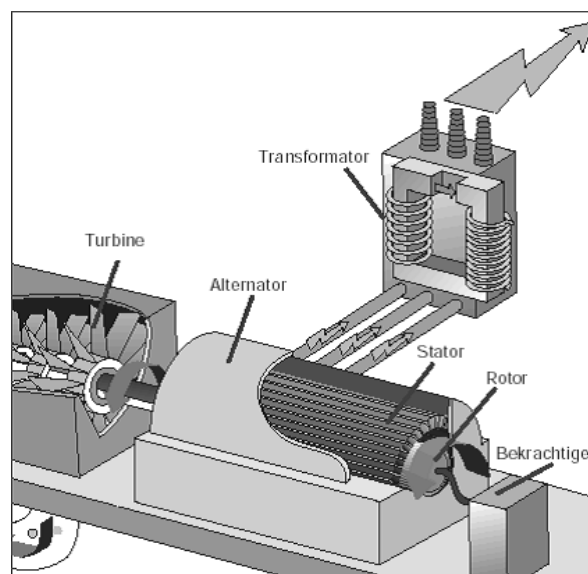
	Olie	Steenkool	Aardgas	Uranium
Prijs (USD/GJ)	11,49	2,10	10,21	0,00132

\* Bij de berekening werd uitgegaan van volgende data:  
- 1 pond = 0,454 kg  
- 1 vat olie = 159 l

## 5.4. Bespreking verschillende vormen elektriciteitsproductie

Elektriciteit wordt meestal opgewekt met behulp van elektromechanische omzeters (alternatoren of generatoren) die mechanische energie omzetten in elektrische energie. Dit wordt geïllustreerd op figuur 5.11. Uitzonderingen op dit principe zijn de fotonvoltaïsche omzetting en brandstofcellen. De omzetter bestaat meestal uit een rotor waarin een magnetisch veld wordt opgewekt en die ronddraait in een vast deel van magnetisch materiaal dat geleidende wikkelingen bevat (de *stator*). Door de ronddraaiende beweging van het magnetisch veld wordt er elektrische spanning opgewekt in de de stator, die verbonden is met het elektriciteitsnet (VMM, 2007).

*Figuur 5.11: De opwekking van elektriciteit in centrales*



Bron: Electrabel (z.d.)

Men past naargelang de gebruikte energiebron verschillende technieken toe om de rotor aan te drijven. In klassieke thermische centrales en kerncentrales produceert men stoom, die een stoomturbine doet draaien. In gasturbines doen verbrandingsgassen de turbine draaien. Stoom- en gascentrales (STEG) combineren deze twee vormen. Naast het gebruik van stoom en

verbrandingsgassen is het ook mogelijk om een turbine te doen draaien door het gebruik van water- en windkracht (VMM, 2007).

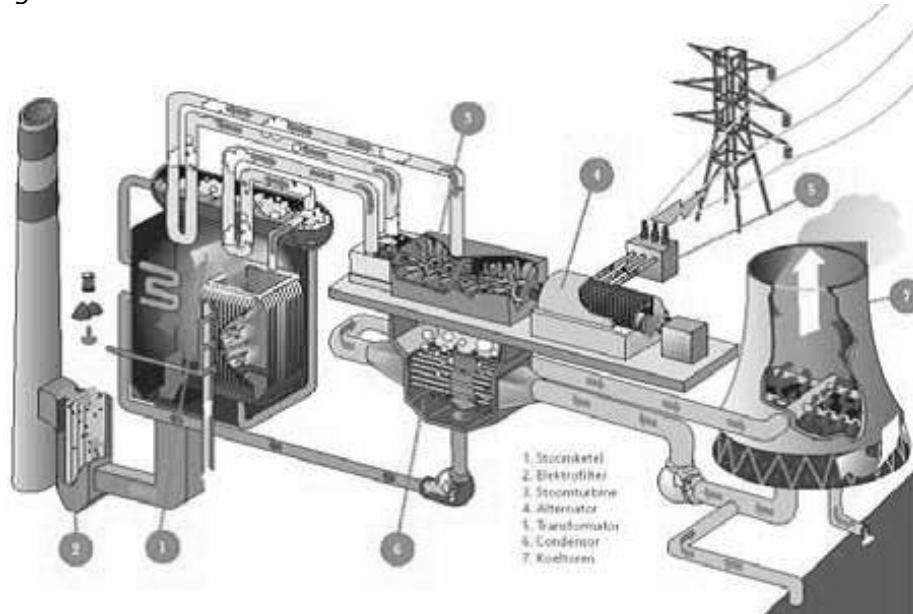
Vervolgens worden in dit onderdeel de verschillende mogelijke vormen voor elektriciteitsproductie in België besproken. Een belangrijk onderdeel in de analyse is het schatten van de private en externe kosten voor elk alternatief. De private kosten omvatten steeds in hoofdzaak de investeringskosten, onderhouds- en personeelskosten, brandstofprijzen en kosten gebonden aan ontmanteling en afvalberging. De externe kosten bestaan hoofdzakelijk uit schadekosten veroorzaakt door emissies van broeikasgassen of andere vervuilende stoffen, door hinder of door ongevallen. Bij het schatten van deze kosten zal er steeds gebruik gemaakt worden van verschillende nationale en internationale studies om een betrouwbaar beeld te kunnen schetsen.

Verder wordt er ook kort gekeken naar verschillende beperkingen en andere aspecten van de technologieën die een belangrijke rol kunnen spelen bij het maken van beslissingen. Een uitgebreide technische omschrijving van de verschillende technologieën valt niet binnen het bestek van deze masterproef en wordt dan ook achterwege gelaten.

#### **5.4.1. Klassieke thermische centrales**

In klassieke thermische centrales verbrandt men fossiele brandstoffen zoals steenkool, aardgas of stookolie in een stoomketel. Doorheen de stoomketel lopen buizen met water, dat tot stoom verdampt onder invloed van de vrijgekomen warmte. Het geproduceerde stoom gaat onder hoge druk en bij hoge temperatuur naar een turbine. Onder deze druk beginnen de schoepbladen van de turbine te draaien. Hier wordt de thermische energie omgezet in mechanische energie. De turbine drijft verder de alternator aan, die de mechanische energie omzet in elektriciteit (Hoenraet, 1999). Dit proces wordt weergegeven op figuur 5.12 op de volgende bladzijde.

*Figuur 5.12: Overzichtsschema van een klassieke thermische centrale*



Bron: Electrabel (z.d.)

Een aantal klassieke thermische centrales maken echter geen gebruik van een stoomturbine. Dieselcentrales verbranden zware stookolie in dieselmotoren gekoppeld aan een generator. Deze thermische centrales worden vooral gebruikt als piek- en noodeenheden die plotse stijgingen in het elektriciteitsgebruik kunnen opvangen en kunnen bijspringen in geval van een defect in andere centrales, omdat ze snel kunnen opgestart worden. Ze hebben een laag energetisch rendement (VMM, 2007).

Zoals eerder al aangehaald staan steenkool en gas de laatste jaren in voor het grootste deel van de fossiele productie. Het gebruik van olie werd systematisch afgebouwd sinds de oliecrisis in de jaren '70 om minder afhankelijk te worden van de OPEC-landen en door hun laag rendement. Voor het gebruik van vloeibare brandstoffen in de elektriciteitsproductie lijkt er volgens VOKA (2006) geen toekomst meer weggelegd. We bestuderen de twee overgebleven opties vervolgens grondiger.



### 5.4.2. Steenkoolcentrales

Men kan drie verschillende categorieën van technologieën onderscheiden voor het omzetten van steenkool tot elektriciteit: de poederkoolcentrales, de steenkoolvergassingscentrales (IGCC) en de wervelbedcentrales (FBC).

De *poederkoolcentrales* zijn de klassieke steenkoolcentrales die nu nog bijna overal gebruikt worden. Men onderscheidt 4 types van poederkoolcentrales naargelang de temperatuur- en drukcondities van de stoom bij de ingang van de turbine:

- de subkritische (druk < 221 bar),
- de superkritische SC (druk tot 250 bar, temp. 565°C),
- de geavanceerde superkritische ASC (druk tot 300 bar, temp. 585°C),
- de ultra-superkritische USC (druk > 300 bar, temp. 585°C).

Het verhogen van temperatuur en druk aan de ingang van de turbine gaat gepaard met een verhoging van het rendement maar stelt ook hogere eisen aan het materiaal. De klassieke subkritische centrales die al jaren meegaan hebben een nettorendement tot 38%. De poederkoolcentrales met een superkritische cyclus en een nettorendement tot 42 % zijn intussen enkele jaren commercieel beschikbaar. De poederkoolcentrales met een geavanceerd superkritische cyclus zouden tegen 2010 op de markt moeten komen. In Nederland is men reeds begonnen aan de constructie van de eerste superkritische centrale. De ultra-superkritische poederkoolcentrales met een nettorendement tot 45 % worden pas na 2010 op de markt verwacht. Dit laatste rendement kan op termijn nog oplopen tot 50% (VMM, 2007).

Een *steenkoolvergassingscentrale (IGCC)* is een centrale met een gecombineerde gas- en stoomcyclus, vergelijkbaar met een STEG-centrale (zie later), waarbij gebruik wordt gemaakt van een synthesegas dat wordt gevormd door de vergassing van steenkool. De IGCC-technologie is nog volop

in ontwikkeling. Momenteel beschikt men over centrales met een netto-rendement van 46%. Tegen 2020 hoopt men het rendement te verhogen naar 50% (VMM, 2007; Commissie AMPERE, 2000).

Tenslotte is er nog de *wervelbedcentrale* (FBC). Wervelbedverbranding is een technologie waarbij de brandstof (steenkool, afval, biomassa, ...) verbrand wordt in een bed met vaste inerte deeltjes in suspensie in een opstijgende luchtstroom. Op die manier wordt er stoom geproduceerd die ontspannen wordt in een stoomturbine. De verbranding kan onder atmosferische druk (AFBC) of onder verhoogde druk (PFBC) gebeuren. Wervelbedcentrales onder atmosferische druk hebben een relatief laag rendement van 38 %. Ze moeten volgens de Commissie AMPERE (2000) gezien worden als een tussenstap naar de ontwikkeling van wervelbedcentrales onder druk. Deze laatsten zouden theoretisch gezien 49 % rendement halen. Het grote voordeel van IGCC- en FBC-centrales is dat er beduidend minder schadelijke stoffen worden vrijgegeven in de atmosfeer.

Vervolgens wordt er gekeken naar het totale kostenplaatje van steenkoolcentrales. Op basis van enkele nationale en internationale bronnen werd tabel 5.5 op de volgende bladzijde opgesteld. In de eerste en tweede kolom worden schattingen weergegeven van de totale private en externe kosten en in de derde kolom worden deze kosten met elkaar opgeteld om de totale sociale productiekost te berekenen. Er worden in de tabel telkens minimum- en maximumwaarden meegegeven. Deze bandbreedten zijn een gevolg van allerlei onzekerheden en variabele factoren. Zo worden de schattingen van de private kosten gebaseerd op gegevens van centrales die reeds functioneel of in aanbouw zijn. Geen enkele centrale is echter identiek. De gebruikte technologie, de omgeving, de lokale grondstofprijzen, etc. variëren waardoor het onmogelijk is om een universele kostprijs op te geven. Met behulp van deze bandbreedtes kan het toch mogelijk zijn om conclusies te trekken. Om een eenvoudige vergelijking van de verschillende technologieën

doorheen het hoofdstuk mogelijk te maken, wordt dezelfde aanpak overal gehanteerd.

Tabel 5.5: Geschatte kosten van elektriciteitsproductie met steenkool (EUR/MWh)

	Private Kost	Externe Kost	Sociale Kost
Commissie AMPERE (2000)	34-41	18-24	52-65
IEA (2006)	21-42	n/a*	/
VOKA (2006)	28-41	n/a	/
VMM (2006)**	25-50	15-32	40-82
Torfs et al. (2005)	n/a	28-32	/
Kuik (2007)	n/a	19-39	/
Totale bandbreedte	21-50	15-39	36-89

\* Geen gegevens beschikbaar in de betreffende bron

In de meeste bronnen wordt er geen onderscheid gemaakt tussen de verschillende mogelijke technologieën voor het omzetten van steenkool naar elektriciteit. De kosten slaan telkens zowel op poederkoolcentrales als op IGCC-centrales. In het rapport van de Commissie AMPERE (2000) gebeurt dit echter wel. De resultaten hiervan worden weergegeven in tabel 5.6 op de volgende bladzijde. In de tabel wordt duidelijk dat de ultra-superkritische poederkoolcentrales (USC) de laagste sociale kostprijs hebben. De IGCC-centrales hebben dan weer de hoogste sociale productiekosten, maar deze technologie heeft nog een groeimarge en kan op termijn zeker concurreren met de USC-centrales. Het hogere verwachte rendement zal op termijn immers de brandstofkosten en externe kosten doen dalen. Zo kan men volgens de Commissie AMPERE (2000) als vuistregel nemen dat de gemiddelde CO<sub>2</sub>-eq-uitstoot per MWh met 2 % afneemt voor elke 1 %-punt toename in het rendement. Ook de productiekosten zullen verder dalen door gebruik.

Tabel 5.6: Kosten van verschillende steenkooltechnologieën in 2010 in EUR/MWh  
(constante prijzen van 2000)

	Private kost	Externe kost	Sociale Kost
Poederkoolcentrale (SC)	34,25	24,25	58,5
Poederkool (ASC)	35,25	20	55,25
Poederkool (USC, 2020)	34,5	18,25	52,5
IGCC-centrale	41,75	18,75	60,5

Bron: Commissie AMPERE (2000)

De kosten van wervelbedscentrales werden niet opgenomen in de tabellen. Wervelbedcentrales onder atmosferische druk zijn niet concurrentieel en zijn, zoals eerder gezegd, enkel ontwikkeld als tussenstap voor de ontwikkeling van wervelbedcentrales onder verhoogde druk. Deze laatste technologie is tot op heden nog niet bewezen en het is dan ook niet mogelijk om hier een kostenplaatje aan te hangen.

Steenkoolcentrales in het algemeen zijn door hun grootte en de relatief hoge investeringskost kapitaalintensief. De investeringskosten maken ongeveer 35 tot 50% van de totale kosten per MWh uit. De variabele kosten (werkings- en onderhoudskosten) zijn relatief laag en omvatten slechts 15-20% van de totale private kosten. De brandstofkosten bedragen uiteindelijk tussen de 35-45% van de totale private kost (VMM, 2007).

Eerder in dit hoofdstuk werd al vastgesteld dat steenkool relatief goed scoort op leveringszekerheid en prijs ten opzichte van andere grondstoffen. De natuurlijke reserves liggen verspreid over de wereld en in politiek stabiele regio's. Bovendien zijn de reserves nog toereikend voor meer dan 350 jaar. De marktprijs voor steenkool is ook minder volatiel als die voor olie en aardgas, en de verwachte prijsstijgingen zijn ook milder.

Een nadeel van steenkoolcentrales is de lange bouwtijd die nodig is. Zo duurt het gemiddeld 4 jaar om een steenkoolcentrale te bouwen. Het grootste minpunt van steenkoolcentrales is echter de grote externe kost per geproduceerde eenheid van elektriciteit. Bij de verbranding van steenkool komen er veel broeikasgassen (voornamelijk CO<sub>2</sub>) en andere schadelijke stoffen vrij. We zullen verder zien dat de uitstoot van CO<sub>2</sub>-eq (670-900 g/KWh) door steenkoolcentrales het hoogste is van alle besproken alternatieven. Een laatste belangrijke beperking van steenkoolcentrales is dat ze niet flexibel zijn en altijd op vol vermogen moeten draaien (VMM, 2007; Commissie AMPERE, 2000; Kuik, 2007).

Als er in België zou worden gekozen om het aandeel van steenkoolcentrales in de elektriciteitsproductie te vergroten, dan zouden de globale CO<sub>2</sub>-emissies in België dan ook sterk stijgen. Dit is niet verenigbaar met de emissiereductiedoelstellingen waaraan België zal moeten voldoen in de toekomst. Zo stelde VOKA (2006) dat de uitstoot van broeikasgassen in België zou stijgen met 30% indien men de volledige nucleaire productie zou vervangen door kolengestookte centrales.

### **5.4.3. Gascentrales**

- **Gasturbinecentrales (enkelvoudige cyclus)**

Een gasturbine is vergelijkbaar met de straalmotor van een vliegtuig. Omgevingslucht wordt aangezogen en door een compressor samengedrukt, zodat druk en temperatuur van de lucht aanzienlijk stijgen. Deze samengedrukte lucht wordt naar een verbrandingskamer gevoerd waar dat men de brandstof (meestal aardgas) toevoegt. Hierdoor zal het mengsel ontbranden. De hete verbrandingsgassen zullen onder hoge druk en met een hoge temperatuur sterk in volume toenemen en een turbine aan het draaien brengen, die op zijn beurt verbonden is met een generator (VMM, 2007). De restwarmte kan eventueel nog nuttig worden gebruikt (zie STEG-centrales).

Wat betreft het rendement moet men vooral kijken naar de eigenschappen van de gasturbine en de temperatuur aan de ingang van de turbine. Momenteel schommelt deze temperatuur rond de 1260 °C. Bij deze temperaturen halen de turbines reeds een rendement van 35% tot 40%. De Commissie AMPERE (2000) schat dat het mogelijk is om mits enkele technische verbeteringen, een rendement van 44% te halen tegen 2020.

Gasturbines in een enkelvoudige cyclus zijn een voorbijgestreefde vorm van elektriciteitsproductie. In tabel 5.7 worden de totale kosten weergegeven van elektriciteitscentrales met gasturbines (enkelvoudige cyclus) op basis van gegevens van de commissie AMPERE (2000). Meteen valt op dat de sociale productiekostprijs gevoelig hoger ligt dan bij fossiele centrales op basis van steenkool. Men kan op basis van deze gegevens besluiten dat dit geen interessante vorm is voor elektriciteitsproductie. Ze werden voornamelijk gebruikt om te voldoen aan de vraag naar elektriciteit op piekmomenten. Het opstarten van een gasturbine vergt immers gemiddeld maar een kwartier en zijn daarom uitermate geschikt voor het leveren van piekvermogen. Stoomturbines bij oa. steenkoolcentrales vergen veel meer tijd om op gang te komen. Een kolencentrale opstarten kan 4 tot 8 uren duren (VMM, 2008).

*Tabel 5.7: Kosten van elektriciteitsproductie met gasturbines in 2010 in EUR/MWh (constante prijzen van 2000)*

	Private kost	Externe kost	Sociale Kost
Gasturbine (aardgas)	78,75	15,75	94,5

Bron: Commissie AMPERE (2000)

- **Stoom- en Gascentrales (STEG)**

STEG-centrales zijn centrales met stoom- en gasturbines in een gecombineerde cyclus. Een STEG-centrale start net zoals gewone gasturbinecentrales met het verbranden van aardgas in de verbrandingskamer van een gasturbine. In een STEG-centrale komen de verbrandingsgassen die de gasturbine verlaten terecht in een recuperatiestoomketel waarin de resterende warmte wordt omgezet in stoom. Deze stoom wordt vervolgens gebruikt om een stoomturbine aan te drijven. Op deze manier wordt er op een tweede maal elektriciteit opgewekt en gaat de resterende warmte niet volledig verloren (Electrabel, z.d.).

Het rendement van STEG-centrales ligt dan ook gevoelig hoger dan bij gewone gasturbinecentrales. Ze halen momenteel een rendement van 56%, en dit kan nog worden verhoogd tot 58% door gebruik te maken van gasturbines met trapsgewijze verbranding. Dankzij de verbetering van de gasturbines mag men volgens de Commissie AMPERE (2000) tegen 2020 globale netto-rendementen verwachten in de orde van 63 % tot zelfs 65 %. Bij STEG-centrales moet men wel rekening houden met een rendementsvermindering indien de capaciteit niet volledig benut wordt. Zo zal het rendement dalen met 10% tussen vollast en halfvast. Tussen 100% en 80% verandert het rendement praktisch niet. Hierdoor kan men gasturbines ook gebruiken om beperkte belastingsschommelingen te volgen (Commissie AMPERE, 2000; IEA 2006).

De totale kosten voor STEG-centrales worden weergegeven in tabel 5.8. We zien meteen dat deze vorm veel beter scoort op elk vlak dan gasturbines met een enkelvoudige cyclus. We zien ook dat STEG-centrales een gevoelig lagere sociale productiekostprijs hebben dan de steenkoolcentrales die we reeds besproken hebben. Hierbij moet men dan nog rekening houden dat deze technologie nog steeds verder wordt ontwikkeld en dat er tegen 2020 nog gevoelige rendementsstijgingen verwacht worden.

Tabel 5.8: Geschatte kosten STEG-centrales (EUR/MWh)

	Private Kost	Externe Kost	Sociale Kost
Commissie AMPERE (2000)	32	10	42
IEA (2006)	26-45	n/a	/
VOKA (2006)	30-45	n/a	/
VMM (2006)	20-56	9-12	29-68
Torfs et al. (2005)	n/a	11	/
Kuik (2007)	n/a	6-14	/
Totale bandbreedte	20-56	6-14	26-70

STEG-centrales zijn relatief goedkoop om te bouwen en te onderhouden. De uiteindelijke kost is wel zeer gevoelig voor de prijs van aardgas. Brandstofkosten zijn namelijk goed voor maar liefst 2/3e van de totale private kost. Uiteraard is het aandeel van de brandstofkosten afhankelijk van de evolutie van de aardgasprijs. Deze grote gevoeligheid voor de prijs van aardgas is toch wel een belangrijk nadeel. Eerder werd immers al duidelijk dat aardgas niet goed scoort op leveringszekerheid en op prijsstabiliteit.

De externe kosten van STEG-centrales liggen gevoelig lager dan die van de steenkoolcentrales. De uitstoot van broeikasgassen bedraagt minder dan de helft (350-450 kg/MWh) van de uitstoot van de verschillende steenkoolcentrales. Hoewel dit een stap in de goede richting is blijft de uitstoot van broeikasgassen hoog (VMM, 2007; Commissie AMPERE, 2000; Kuik, 2007). Een grootschalige overschakeling naar fossiele brandstoffen (aardgas/steenkool) zal volgens VOKA (2006) de huidige en toekomstige klimaatdoelstellingen bemoeilijken, zonet onmogelijk maken.

STEG-centrales kunnen interessant zijn om periodes van capaciteitsgebrek te overbruggen. Ze kunnen namelijk relatief snel worden opgebouwd (2-3 jaar)



en hebben maar een lage investerings- en onderhoudskost (VMM, 2007). Bovendien zijn ze ook geschikt voor het opvangen van piekvermogen. De opstartduur is wel lichtjes langzamer (60 min.) dan bij een gewone gasturbine door het toevoegen van het stoomgedeelte, maar is volgens Electrabel (z.d.) toch snel genoeg om te kunnen anticiperen op piekmomenten.

#### **5.4.5. Warmtekrachtkoppeling (WKK)**

Warmtekrachtkoppeling kan worden omschreven als de gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte. Hierbij wordt de warmte die bij een gewone elektriciteitscentrale verloren gaat, gerecupereerd voor vb. industriële processen of de verwarming van gebouwen. WKK kan toegepast worden bij elke technologie die zowel elektriciteit als warmte produceert. Het energetische rendement van een WKK ligt veel hoger dan het rendement in klassieke thermische centrales en situeert zich tussen 85 à 90%.

In tabel 5.9 op de volgende bladzijde worden de geschatte kosten voor elektriciteitsproductie met WKK-installaties weergegeven. Deze kosten kunnen sterk variëren naargelang de gebruikte technologie. Bovendien zijn de productiekosten voor het opwekken van elektriciteit door WKK sterk afhankelijk van de vraag naar en de waarde van de opgewekte warmte. De grote bandbreedte in private kosten is dan ook niet verwonderlijk. De productiekost voor elektriciteit wordt berekend door te na te gaan welke kosten moeten worden toegewezen aan de elektriciteitsproductie en welke aan de warmteproductie. Men mag achteraf dus ook niet uit het oog verliezen dat er ook kostenbesparingen kunnen zijn bij de warmteproductie.

Tabel 5.9: Geschatte kosten WKK-installaties (EUR/MWh)

	Private Kost	Externe Kost	Sociale Kost
Commissie AMPERE (2000)	37-140	1-9 (65)*	38-149
IEA (2006)	18-100	n/a	/
VMM (2006)	30-130	4-9*	34-139
Torfs et al. (2005)	n/a	8-19*	/
Totale bandbreedte	18-140	1-19	19-159

WKK heeft ook enkele beperkingen. Als men de gerecupereerde warmte niet nuttig gebruikt zal de centrale een lager rendement hebben dan een standaard STEG-centrale. Om WKK optimaal te benutten heeft men dus afnemers nodig die in de onmiddellijke buurt zijn gelegen en die een intensief warmteverbruik hebben. Een andere beperking voor WKK-installaties is het elektriciteitsnet. Dit is immers niet voorzien op grootschalige decentrale elektriciteitsproductie en het moderniseren van het elektriciteitsnet zou enorme investeringen vergen.

In 2007 bedroeg volgens het Vlaamse Energieagentschap (z.d.) de totale elektriciteitsproductie in warmtekrachtinstallaties ongeveer 15% van het elektriciteitsverbruik. Tegen 2010 wil de Vlaamse overheid dit cijfer nog optrekken tot 19%. In Wallonië lag dit cijfer nog beduidend lager in 2006 op ongeveer 5,5% van de totale elektriciteitsproductie (ICEDD, 2007). Het totale potentieel voor WKK's in België tegen 2020 wordt door D'haeseleer (2002) geschat op ongeveer 4000MW wat overeenkomt met ongeveer 25% van de huidige totale geïnstalleerde productiecapaciteit.

### 5.4.6. Kernenergie

De werking van een kerncentrale lijkt op het eerste zicht sterk op dat van een klassieke thermische centrale die draait op fossiele brandstoffen. In beide gevallen wordt er elektriciteit opgewekt met behulp van stoom. Enkel de manier om warmte op te wekken is anders. Bij kernenergie komt deze tot stand door het splijten uranium, plutonium of thorium. Er bestaan verschillende types kerncentrales die momenteel in gebruik zijn wereldwijd. In België wordt er enkel gebruik gemaakt van centrales op basis van een Pressurised Water Reactor (PWR). Dit type is het meest verspreid over de hele wereld. Een kerncentrale zet ongeveer 32 à 33 % van de "nucleaire warmte" om in elektriciteit (Electrabel, z.d.).

In tabel 5.10 worden de kosten van de hedendaagse PWR-kerncentrales weergegeven. De sociale productiekostprijs ligt opmerkelijk lager dan die van het beste alternatief tot dusver, de STEG-centrales. We zullen verder zien dat kernenergie zelfs de laagste geschatte sociale kostprijs heeft van alle alternatieven.

*Tabel 5.10: Geschatte kosten Kernenergie (EUR/MWh)*

	Private Kosten	Externe Kosten	Sociale Kost
Commissie AMPERE (2000)	31	0,9	32
IEA (2006)	15-36	/	/
Roques et al. (2006)	19-42	/	/
VMM (2006)	21-36	0,8	21-37
Torfs et al. (2005)	/	0,8	/
Kuik (2007)	/	1,1-1,3	/
<b>Totale bandbreedte</b>	<b>15-42</b>	<b>0,8-1,3</b>	<b>16-43</b>

Een nadeel van kernenergie is de relatief hoge investeringkost. Deze bedraagt tussen de 50-60% van de totale private kosten. Kernenergie blijft echter een concurrentiële manier om elektriciteit op te wekken omdat de centrales een lange levensduur hebben, en omdat het de laagste variabele productiekost per eenheid heeft. In vergelijking met andere centrales zijn kerncentrales ook veel minder gevoelig voor de grondstofprijzen. Hierdoor is het ook relatief makkelijk om de prijs van kernenergie op voorhand te voorspellen. Bovendien hebben we al gezien dat uranium relatief goed scoort op het vlak van leveringszekerheid.

De opbouwtijd van kerncentrales is relatief lang (5-6 jaar) ten opzichte van bv. STEG-centrales. Bovendien zijn de hedendaagse kerncentrales ook niet flexibel en moeten ze altijd draaien tegen een volledig vermogen. Het duurt ook meer dan 24u om een kerncentrale op te starten. Kerncentrales zijn dus niet geschikt om veranderingen in de vraag naar elektriciteit snel op te vangen (VMM, 2007).

Een groot pluspunt van kerncentrales zijn de zeer lage externe kosten. Dit blijkt ook zeer duidelijk uit tabel 5.10. Bij de productie van elektriciteit in kerncentrales komen er immers geen broeikasgassen en andere schadelijke gassen vrij, met uitzondering van enkele relatief kleine hoeveelheden die vrijkomen tijdens de bouw van kerncentrales of tijdens de verrijking van het uranium. In termen van broeikasgassen stoten kerncentrales tussen 10-16 g/kWh CO<sub>2</sub>-equivalent uit. Ter vergelijking, STEG-centrales stoten maar liefst tot 20 tot 40 keer meer CO<sub>2</sub>-eq uit (VMM, 2007; Commissie AMPERE, 2000; Kuik, 2007). De lage productiekosten en de minieme uitstoot van broeikasgassen maken van kernenergie dan ook een zeer goede optie om aan de toekomstige klimaatdoelstellingen te voldoen. Andere externe kosten zoals het risico op ongevallen en de problematiek van het radioactief afval worden ook telkens zeer laag ingeschat door de verschillende studies, hoewel hier toch onenigheid over bestaat. Er wordt hier later nog op teruggekomen.

Toch heeft de Belgische federale regering, zoals eerder vermeld, besloten om alle kerncentrales te sluiten tussen 2015 en 2025. Dit zou volgens het federale planbureau (2007) leiden tot een stijging van de uitstoot van broeikasgassen met 21% tussen 2000-2030 omdat deze capaciteit grotendeels zou worden vervangen door gascentrales. Het langer openhouden van de reeds afgeschreven kerncentrales zou ook voor veel extra winst zorgen. Volgens Paul Magnette, federaal minister van Klimaat en Energie, bedraagt de winst die gemaakt wordt doordat de kerncentrales sneller zijn afgeschreven ongeveer 500 miljoen euro netto per jaar. Als men toch beslist dat de kerncentrales langer open mogen blijven, zal voor deze exploitatievergunning een vergoeding moeten worden betaald aan de federale overheid. Volgens Magnette zal Electrabel dit jaar al 500 miljoen euro betalen. Nu de regering-Van Rompuy aankijkt tegen een begrotingstekort van 20 miljard euro in 2009, 20 miljard in 2010 en nog eens 20 miljard in 2011 is zo'n financiële opkikker meer dan welkom ('Van Rompuy koppelt kernenergie aan begroting', 2009).

Vanuit een puur economisch standpunt is de kernuitstap dan ook niet te verdedigen, gebaseerd op bovenstaande gegevens over de kosten van kernenergie. Vervolgens bespreken we daarom de belangrijkste argumenten van de voorstanders van de kernuitstap. De kernuitstap is immers een belangrijke beslissing die grote economische, ecologische en energetische gevolgen zal hebben voor België. Centraal in het debat rond de kernuitstap staan de verwerking van radioactief afval, het risico op nucleaire ongevallen en het gevaar van terrorisme.

Een eerste belangrijk bezwaar tegen kernenergie is het risico op extreme schade bij *ongevallen in kerncentrales*. Zeker na het ongeval in Tchernobyl is de publieke opinie heel gevoelig geworden voor ongevallen met kerncentrales. De impact van één enkel ongeval met een kerncentrale kan zeer groot zijn. Zo kan het leiden tot tienduizenden gevallen van fatale kankers en in monetaire termen kan het leiden tot miljarden euro's aan kosten voor de samenleving. De kans dat zo'n ongeval zich voordoet is anderzijds zo klein dat de geschatte

waarde van het risico verwaarloosbaar klein wordt ten opzichte van de elektriciteit die kan worden geproduceerd gedurende de levensloop van een kerncentrale. De geschatte externe kosten per geproduceerde eenheid elektriciteit voor dit risico variëren volgens Eyckmans & Pepermans (2003) in de meeste literatuur tussen ongeveer 0,104 EUR/MWh en 0,0023 EUR/MWh. Een meer pessimistische studie van CE Delft (2007) (niet toevallig in opdracht van Greenpeace) stelt daarentegen dat deze kosten minimaal moeten geschat worden op 5 EUR/MWh. In totaal schat deze studie de externe kosten van kernenergie in rond 10 EUR/MWh. Zelfs indien men deze waarden hanteert, blijft kernenergie een zeer goede optie. Eyckmans en Pepermans (2003) merken verder op dat het schatten van externe kosten bijna altijd gepaard gaan met onzekerheden en dat dit altijd een bron van discussie zal blijven.

Naast het risico op een ernstig ongeval in een nucleaire centrale is het ontstaan van *radioactief afval* één van de meest gehoorde bezwaren tegen het gebruik van kernenergie. Het Internationaal Atoomagentschap definieert radioactief afval als materiaal dat radioactieve isotopen bevat of daarmee besmet is, in concentraties hoger dan wat minimaal meetbaar is en waarvoor geen praktische toepassingen bekend zijn. Deze isotopen zenden bijzonder energierijke ioniserende straling uit die veranderingen kunnen teweegbrengen in de materie waarin ze doordringt. Daardoor kunnen ze levende weefsels beschadigen en zijn ze gevaarlijk voor mens en milieu (NIRAS, z.d.). Ongeveer 80% van het radioactieve afval in België ontstaat in de bedrijven die betrokken zijn met de productie van elektriciteit via kernenergie. Het volume van dit afval is proportioneel echter zeer erg klein. Het bedraagt slechts 0,015% van de totale hoeveelheid afval dat jaarlijks wordt geproduceerd in België (Nucleair Forum, z.d.).

Er kunnen verschillende categorieën van nucleair afval worden onderscheiden, gaande van laag tot hoogradioactief afval. Naast het activiteitsniveau moet men bij het beheer van radioactief afval rekening houden met een tweede essentiële eigenschap: de duur van de schadelijkheid van het afval. De

radioactiviteit en dus ook het risico van het afval nemen af met de tijd. Zolang de radioactiviteit niet gedaald is tot op een niveau dat aanvaardbaar is voor de volksgezondheid, moet er nauwlettend op toegezien worden dat de straling geen schade kan toebrengen aan mens en milieu. We merken hierbij op dat slechts 1% van het nucleair afval hoogactief is, maar dat deze wel goed is voor ongeveer 95% van de totale radioactiviteit (NIRAS, z.d.).

De enige optie is om het afval te isoleren van de biosfeer voor een bepaalde periode tot dat het stralingsgevaar is geweken. De berging van radioactief afval blijft tot op heden een probleem. België heeft nog geen beslissing genomen over het langetermijnbeheer van middel- en hoogactief langlevend afval. Er bestaat volgens Laes (2006) en het NEA (2002) een algemene wetenschappelijke consensus dat het bergen van het radioactieve afval in diepe geologische formaties de best mogelijke oplossing is. Toch is deze methode ook niet 100% veilig om het afval, dat tot 240 000 jaar actief kan blijven, op te slaan. Zo stellen Vanmarcke et al. (2008) dat reeds na 5000 jaar radioactieve deeltjes het grondwater zou kunnen besmetten. De straling zou wel ver onder gevaarlijke niveaus blijven.

De schattingen van de externe kosten die eerder in dit onderdeel werden aangehaald houden rekening met de externe kosten die gepaard gaan met de verwerking en de bijkomende risico's van het radioactief afval. Laes (2006) en Scheepers et al. (2007) merken echter op dat deze schattingen van de externe kosten altijd met een korreltje zout moeten worden genomen. De impact van gevaarlijke materialen zoals radioactief afval zijn zeer moeilijk te voorspellen op lange termijn en de kosten worden in zeer grote mate bepaald door beslissingen die in de toekomst moeten worden gemaakt. Tenslotte kan het debat over kernafval ook uit een ethisch/filosofisch standpunt worden bekeken. Hebben wij het recht om de toekomstige generaties te belasten met deze erfenis? Dit is een vraag die vele ethici, sociologen en filosofen bezighoudt.

Een derde terugkerend argument voor de kernuitstap is de *dreiging van terrorisme*. Enerzijds bestaat er het gevaar dat terroristen een bestaande kerncentrale als doelwit zouden uitkiezen om op die manier een grote catastrofe te veroorzaken. Anderzijds bestaat de vrees dat radioactief materiaal in de handen van terroristen zou kunnen komen die er dan een zogenaamde "dirty bomb" mee zouden aanmaken. De nucleaire installaties in België behoren echter tot de best beschermde burgerlijke installaties in het land. De toegang tot de terreinen waar nucleaire installaties gevestigd zijn is streng beveiligd en wordt strikt gecontroleerd. De kerncentrales voldoen ook aan zeer strenge constructienormen waardoor aanvallen van buitenaf geen bedreiging vormen. Zo kunnen de Belgische kerncentrales in principe zelfs aan een directe inslag van een groot vliegtuig weerstaan (Nucleair Forum, z.d; Eyckmans en Pepermans, 2003).

Intussen staat de technologie niet stil en wordt het ontwerp van nucleaire reactoren steeds verder verbeterd. De huidige centrales worden centrales van de tweede generatie genoemd. Centrales van een derde generatie zijn reeds in volle ontwikkeling. De eerste prototypes werden in Japan al in gebruik genomen in 1996. In Europa worden ook centrales van de derde generatie ontwikkeld die voldoen aan de strenge 'European Utility Requirements' normen. Deze centrales zijn een verdere evolutie van de huidige PWR-centrales. De eerste prototypes worden nu gebouwd in Finland en Frankrijk. Reactors van de derde generatie zijn veiliger, verbruiken minder splijtstof, produceren minder afval, draaien langer zonder onderhoud en hebben een langere levensduur van ongeveer 60 jaar (World Nuclear Association, 2009; VOKA, 2006).

De centrales van de 3e generatie staan nog maar in hun kinderschoenen en hun productiekosten liggen op dit moment nog hoger dan centrales van de tweede generatie. Op termijn hebben ze echter een groot potentieel en daarom is het belangrijk dat men nu investeert in deze technologieën en ze de kans geven om verder te ontwikkelen (World Nuclear Association, 2009; VMM,



2007). Tot de 3e generatie wordt ook wel de Hoge Temperatuur Reactor (HTR) gerekend die waarschijnlijk tegen 2015 beschikbaar zal zijn. Dit type reactor heeft een relatief klein vermogen, maar is inherent veilig omdat in deze reactor het splijtstof niet kan smelten. Door het geringe vermogen wordt de kosteneffectiviteit van dit soort centrales in vraag gesteld. Een eerste prototype werd reeds besteld door Zuid-Afrika (VOKA, 2006; VROM, 2008).

Onder leiding van de VS is in 2000 zelfs al het onderzoek gestart naar centrales van de 4<sup>e</sup> generatie in het kader van het 'Generation IV'-project. Deze centrales beloven nog veiliger, minder vervuilend en financieel aantrekkelijker te worden. Men streeft ernaar om deze reactoren in 2030 inzetbaar te maken (VROM, 2008). De nieuwe generaties hebben ook een potentieel gunstig effect op de energievoorziening voor elektriciteitsproductie. FORATOM (2009) schat dat men op termijn tot 60 maal meer energie uit uranium kan halen. Daardoor zouden de natuurlijke voorraden van uranium wereldwijd genoeg zijn om de behoefte van de volgende 10 000 tot 50 000 jaar te dekken.

Bij de keuze tussen fossiele brandstoffen en uranium als energiebron voor de elektriciteitsproductie moet men verder nog rekening houden met één belangrijk aspect. Uranium en andere kernbrandstoffen kunnen bijna uitsluitend gebruikt worden voor het opwekken van energie. Fossiele brandstoffen kunnen echter ook gebruikt worden als grondstof in de steenkoolchemie en petrochemie (Commissie AMPERE, 2000).

#### **5.4.7. Kernfusie**

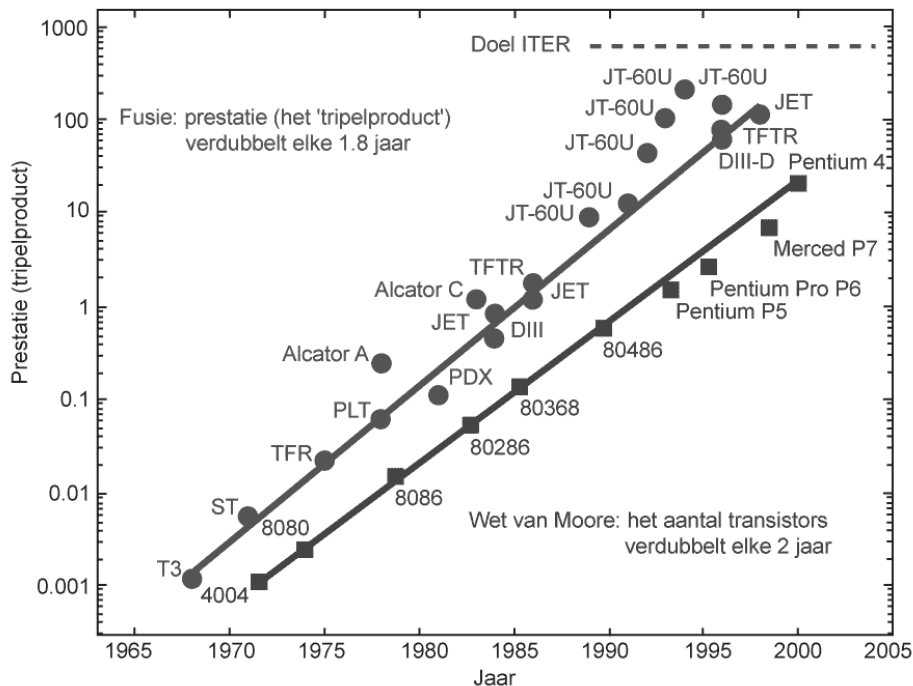
In tegenstelling tot bij de gewone kerncentrales, waarbij uraniumatomen en plutoniumatomen gesplitst worden en als grondstof dienen om warmte op te wekken, worden er bij kernfusie twee atoomkernen samengesmolten. Hierbij wordt een gedeelte van de massa omgezet in energie die men bijvoorbeeld kan gebruiken om water tot stoom te verhitten (VMM, 2007).

De grondstoffen (lithium en deuterium) die nodig zijn om de fusiereacties te voeden en in stand te houden zijn in overvloed aanwezig op de aarde. Met de huidige reserves van lithium en deuterium is het volgens ITER-Belgium (z.d.) nog mogelijk om te genieten van deze vorm van energie voor miljoenen jaren. Zo levert 1 gram reactiemateriaal ongeveer een miljard meer aan energie op dan verbranding van fossiele brandstoffen. Een ander groot voordeel ten opzichte van gewone kerncentrales is dat er bijna geen radioactief afval wordt geproduceerd.

De grootste bestaande fusiereactor is de experimentele Joint European Torus (JET) reactor in Culham (Groot-Brittannië). Deze vraagt echter nog 33 % meer energie dan hij levert. Sinds 2006 wordt er gewerkt aan een nieuw internationaal fusie-experiment, de ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). De bouw van de ITER-reactor is in 2006 begonnen in Cadarache (Frankrijk). Deze experimentele fusiereactor zou tien keer zoveel energie moeten opleveren als er wordt ingestoken. Er staat ook al een opvolger gepland voor ITER tegen het jaar 2040. Deze reactor zou de eerste elektriciteit op basis van kernfusie aan het elektriciteitsnet moeten kunnen leveren (VMM, 2007). De toekomstige kosten van werkende kernfusiecentrales zijn op dit ogenblik nog niet te voorspellen. Het onderzoek naar kernfusie moet worden gestimuleerd door de overheden wereldwijd. De onderzoekskosten zijn immers veel te groot voor de private sector. Zo worden de kosten voor ITER geraamd op 10 miljard euro over 30 jaar. Dit bedrag vertegenwoordigt slechts een fractie van de jaarlijkse onderzoeksuitgaven naar kernfusie (FORATOM, 2009).

Op figuur 5.13 kan men de vooruitgang van het fusieonderzoek door de jaren heen zien. Men kan zien dat de prestaties van fusiereactoren gemiddeld verdubbelt elke 1,8 jaar. Dit is veelbelovend voor de toekomst. Op de grafiek haalt men ook de Wet van Moore aan die stelt dat het aantal transistoren op een computerchip door de technologische vooruitgang elke 2 jaar verdubbelt. De evolutie van kernfusie kan hier immers mee worden vergeleken.

*Figuur 5.13: Vooruitgang fusieonderzoek*



Bron: Kernfusie.nl (z.d.)

### 5.4.8. Elektriciteitsproductie met hernieuwbare energiebronnen

De vorige productiemethoden waren allemaal gebaseerd op energiebronnen die niet hernieuwbaar waren. Het VMM (2007) definieert niet-hernieuwbare energiebronnen als energiebronnen waarvan het gebruik leidt tot een vermindering van de voorraad op aarde en waarbij deze voorraad niet snel genoeg kan worden aangevuld omwille van trage geologische/astrofysische processen zodat ze in feite 'uitputbaar' zijn. De hernieuwbare energiebronnen zijn dan de bronnen waarbij het gebruik niet leidt tot een vermindering van de voorraden of waarbij de voorraden zeer snel door biologische processen kunnen worden aangevuld zodat het lijkt alsof ze onuitputtelijk zijn.

De volgende hernieuwbare energiebronnen worden verder afzonderlijk besproken: Windenergie, zonne-energie, waterkracht, biomassa en tenslotte brandstofcellen.

Energietechnologieën op basis van hernieuwbare energiebronnen delen enkele voordelige kenmerken met elkaar:

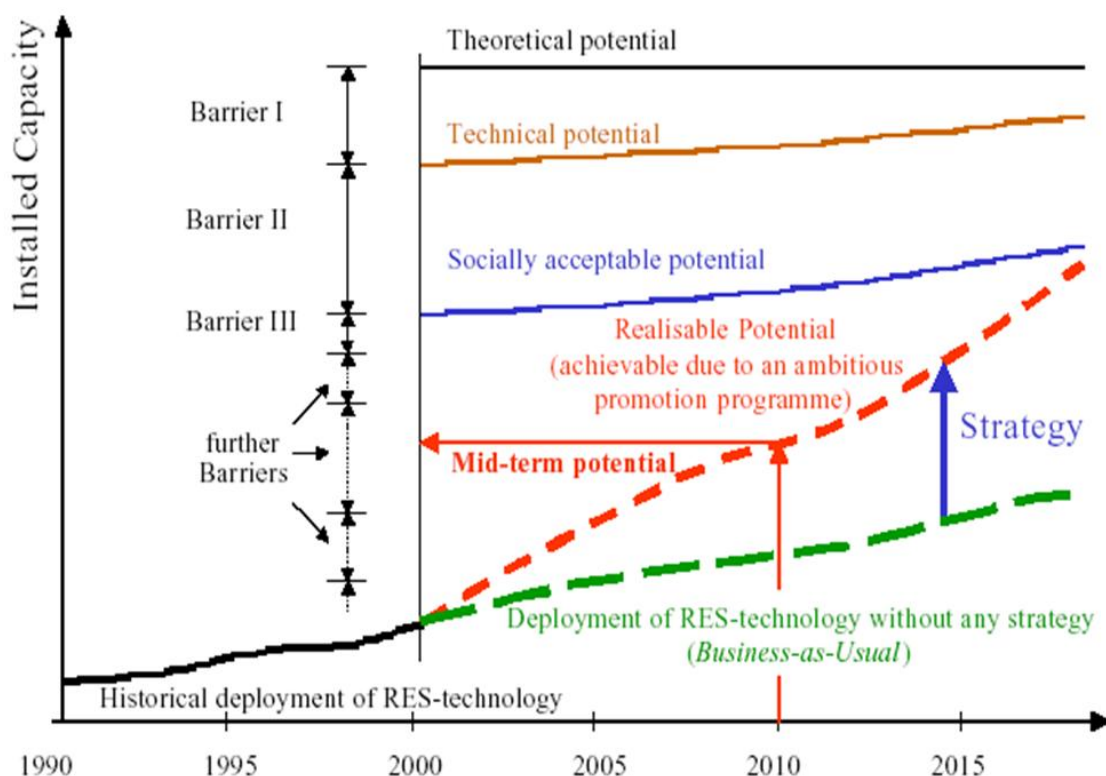
- Ze verbranden geen fossiele brandstoffen zodat ze geen of veel minder broeikasgassen en andere vervuilende stoffen uitstoten.
- Ze produceren zeer weinig afval en er is zeker geen sprake van radioactief afval.
- De buitenlandse afhankelijkheid van de energievoorziening wordt verminderd.
- Het vermogen is flexibel en kan worden aangepast aan de vraag
- Ze creëren arbeidsplaatsen op de lokale markt. De Europese Commissie verwacht dat er door de stijgende hernieuwbare elektriciteitsproductie meer dan 380 000 nieuwe jobs zullen ontstaan tegen 2020. Volgens schattingen van het Federale Planbureau (2009) en Agoria (2009) zou het in België gaan om 21 000 tot 40 000 nieuwe banen tegen 2020.
- Ze bieden de industrie kansen voor innovatie en export.

Ze hebben ook enkele gemeenschappelijke nadelen:

- De capaciteitsfactor ligt in het algemeen zeer laag bij hernieuwbare energiebronnen. De capaciteitsfactor bepaalt hoeveel elektriciteit men kan opwekken met een bepaald geïnstalleerd vermogen. Er moet dus meer geïnvesteerd worden om eenzelfde hoeveelheid stroom te kunnen aanmaken.
- De opgewekte elektriciteit is variabel. Hierdoor moet men investeren in reservecapaciteit.
- Het potentieel van de verschillende hernieuwbare energiebronnen in België wordt beperkt door allerlei factoren. België is klein en dichtbevolkt en alle vormen van hernieuwbare energie is sterk gebonden aan oppervlakte. Bovendien schikt de Belgische geografische ligging niet zo goed voor alle vormen. Zo heeft België niet het ideale klimaat om te investeren in zonne-energie en niet veel plaatsen waar

men gebruik kan maken van waterkrachtcentrales. Aan de hand van figuur 5.14 wordt de relatie tussen hernieuwbare energie en de verschillende niveaus van het begrip 'potentieel' geïllustreerd. Elk land heeft voor elke soort hernieuwbare energie een theoretisch potentieel, dit is met andere woorden de maximaal haalbare elektriciteitsproductie. De technologie en de techniek kunnen in sommige gevallen nog niet ver genoeg geëvolueerd zijn om gebruik te maken van dit volledige potentieel. Het technische potentieel geeft de maximaal haalbare elektriciteitsproductie weer, gegeven de technische beperkingen. Het maatschappelijke aanvaardbare potentieel geeft vervolgens de hoeveelheid weer die vanuit maatschappelijke standpunt wenselijk is. Dit is een belangrijke grens die de overheid moet nastreven door middel van haar beleidsinstrumenten. Tenzij anders vermeld wordt er verder telkens verwezen naar deze laatste interpretatie van het woord.

Figuur 5.14: Illustratie van diverse potentieelniveaus



Bron: ODE Vlaanderen (2008) op basis van Haas (2001)

- Een laatste gemeenschappelijk nadeel is dat de elektriciteitsproductie door hernieuwbare energiebronnen vooral decentraal gebeurt. Het Belgisch elektriciteitsnet is hier niet op voorzien en er zullen grote investeringen moeten worden gedaan om een grote decentrale productie mogelijk te maken.

#### **5.4.9. Windenergie**

Wind is lucht die beweegt van een plaats met een hogere luchtdruk naar een plaats met een lagere luchtdruk. Windturbines zetten deze kinetische energie van de wind uiteindelijk om in elektrische energie doordat de wind de wieken van deze windturbines in beweging brengt. Moderne windturbines hebben een vermogen van 3 MW. In Duitsland bestaan er al prototypes voor turbines met een vermogen van 5 MW. Het ECN (2008) verwacht dat er rond 2015 turbines met een vermogen van 15 MW kunnen worden gebouwd. Het vermogen neemt kwadratisch toe met de rotordiameter.

Het is echter niet het vermogen maar de capaciteitsfactor die de elektriciteitsopbrengst bepaald. Bij windturbines hangt deze af van de hoeveel wind op de bewuste locatie. VOKA (2006) schat dat de capaciteitsfactor voor windturbines op zee (offshore) tussen 40 en 45% bedraagt. Op het land variëren deze tussen 18% en 38%. Er moet dus veel meer geïnvesteerd worden om eenzelfde hoeveelheid stroom te kunnen aanmaken. De windhoeveelheid is daarboven zeer variabel en dus zal men ook nog reservecapaciteit moeten voorzien om windluwe periodes op te vangen. Men mag niet uit het oog verliezen dat deze bijkomende capaciteit zal bestaan uit meer flexibele maar ook meer vervuilende fossiele centrales.

In tabel 5.11 worden vervolgens de geschatte kosten van elektriciteitsproductie op basis van windenergie weergegeven. Als men de productiekosten vergelijkt kan men concluderen dat kerncentrales op basis van deze gegevens de meest aantrekkelijke optie blijven. De grote

bandbreedte in de kosten kan verklaard worden door grote verschillen tussen de verschillende mogelijke locaties van de windturbines. Enerzijds bepaalt de locatie, zoals eerder aangehaald, in sterke mate de capaciteitsfactor. Anderzijds bestaan er volgens het VMM (2007) ook grote verschillen in de investerings- en werkingskosten tussen bijvoorbeeld onshore en offshore windturbineparken. De European Wind Energy Association (2005) verwacht dat de productiekosten voor toekomstige windmolens verder zullen afnemen, omwille van de ervaring die men opdoet met windenergietechnologie. Op basis van enkele experimenten wordt geschat dat de kost voor windmolens op het land zal afnemen met 20 tot 25% tegen 2020, en offshore zelfs met 40%.

*Tabel 5.11: Geschatte kosten van elektriciteitsproductie met windenergie (EUR/MWh)*

	Private Kost	Externe Kost	Sociale Kost
Commissie AMPERE (2000)	45-79	0,5-2	45-81
IEA (2006)	25-98	n/a	/
VOKA (2006)	34-100	n/a	/
VMM (2006)**	30-125	0,6-2,5	30-128
Torfs et al. (2005)	n/a	1	/
Kuik (2007)	n/a	<1,1	/
Totale bandbreedte	25-125	0,5-2,5	25-128

Een groot voordeel van windenergie zijn de zeer lage externe kosten. Deze worden door sommige studies zelfs lager ingeschat als de externe kosten van kernenergie. De windmolens stoten tijdens hun werking immers geen broeikasgassen of andere schadelijke stoffen uit. Enkel bij de constructie van de windmolens komen er indirecte emissies vrij, maar deze zijn zeer beperkt (25-30 g/kWh). Het grootste deel van de externe kosten tijdens de productie omvatten volgens de geluids- en visuele hinder die ze veroorzaken, en in

mindere maten botsingen met vogels (VMM, 2007; Commissie AMPERE, 2000; Kuik, 2007).

Het technisch potentieel voor windenergie in België is beperkt. België is maar een klein land, het is dichtbevolkt en het heeft maar een kleine kustlijn. Het aantal economisch interessante plaatsen (windsnelheid gemiddeld 7m/s) zijn dan ook relatief schaars. De Commission On Energy 2030 (2006) schat dat er tegen 2030 in totaal een economisch potentieel voor windenergie bestaat van 3800 MW met een productie tot 15,8 TWh/jaar, wat ongeveer overeenkomt met meer dan 17% van het huidige elektriciteitsgebruik. ODE Vlaanderen (2008) houdt het op een totaal potentieel voor windenergie in België van zo'n 4500 MW of 10,7 TWh/jaar tegen 2020. Zoals eerder vermeld is het Belgische elektriciteitsnet echter niet voorbereid op grote volumes van decentrale productie en zullen er in de toekomst grote investeringen nodig zijn om verdere uitbreidingen mogelijk te maken.

Investeringen in windenergiesystemen zou ook nog een bijkomend positief socio-economisch effect kunnen hebben. De markt voor windenergieconstructeurs is immers een snel groeiende markt. We zien dat Deense bedrijven een groot marktaandeel veroverd hebben op deze markt. Niet toevallig zien we dat Denemarken meer dan 20% van zijn totale elektriciteit produceert met windenergie. Grote investeringen in windenergie in België zou lokale marktspelers ook de kans kunnen geven om te groeien. Investeringen in windenergie zouden ook goed zijn voor de werkgelegenheid in België. Op basis van gegevens van het EWEA en de Europese Commissie kan men volgens De Radiques (2001) besluiten dat het installeren van 1 MW windenergie tussen de 15 en de 19 extra arbeidsplaatsen zou creëren.



#### 5.4.10. Zonne-energie

Zonlicht kan rechtstreeks worden omgezet in elektriciteit. Dit noemt men ook wel de fofovoltaïsche zonne-energie, afgekort PV. Een fofovoltaïsch systeem bestaat uit panelen waarin zonnecellen zijn ingebouwd. Aan de basis van de fofovoltaïsche omzetting ligt de absorptie van licht in een halfgeleidermateriaal en de scheiding van de aldus gegenereerde ladingsdragers door middel van een inwendig elektrisch veld. Het rendement van commercieel geproduceerde zonnecellen varieert van 13% tot 15%. Met gesofisticeerde micro-elektronicatechnieken kunnen echter reeds zonnecellen met een rendement van 24 tot 25% gemaakt worden, maar deze zijn zeer duur. Onderzoeksteams van het Nationaal Laboratorium voor Duurzame Energie in Colorado (VS) hebben met een nieuwe techniek op basis van kwantumstippen het omzettingsrendement recent zelfs tot 40% kunnen verhogen (VMM, 2007).

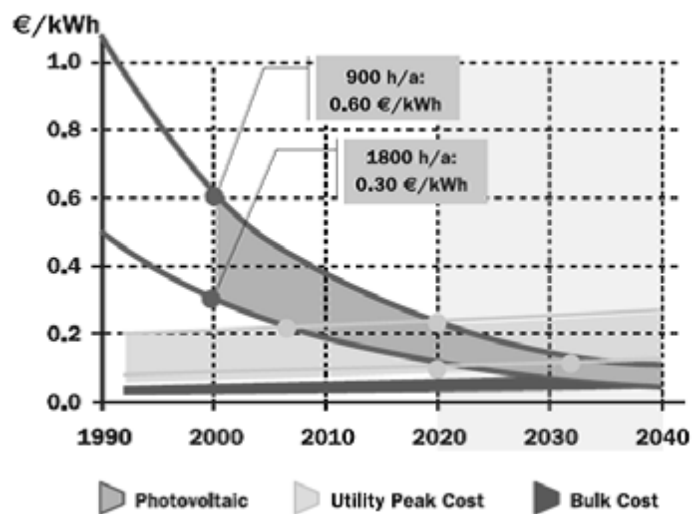
De hoge kostprijs van PV staat een grote doorbraak van de technologie alsnog in de weg. Dit wordt duidelijk aangetoond in tabel 5.12. Ook hier kan de grote bandbreedte weer deels verklaard worden door grote locatiegebonden verschillen. Zo zullen we verder zien dat het aantal zonne-uren in België sterk lager ligt dan in zuidere landen.

*Tabel 5.12: Geschatte kosten van elektriciteitsproductie met zonne-energie (EUR/MWh)*

	Private Kost	Externe Kost	Sociale Kost
Commissie AMPERE (2000)	371-620	n/a	/
IEA (2006)	104-529	n/a	/
VMM (2006)	375-625	3-7,5	378-633
Torfs et al. (2005)	n/a	5	/
PV-Trac (2005)	250-650	n/a	/
<b>Totale bandbreedte</b>	<b>104-650</b>	<b>3-7,5</b>	<b>107-657</b>

Op figuur 5.15 op de volgende pagina wordt echter geïllustreerd dat men verwacht dat de kosten snel zullen dalen door gebruik. PV-Trac (2005) verwacht dat de technologie rond 2030 competitief zal worden in België. Men verwacht dat de productiekost dan verder zal dalen tot ongeveer 50 €/MWh tegen dan. Na 2030 zal de kost waarschijnlijk nog verder blijven dalen. Op lange termijn heeft PV dus wel goede perspectieven.

Figuur 5.15: Evolutie van de productiekosten voor PV



Bron: PV-Trac (2005)

Net zoals bij windenergie is de aanvoer van elektriciteit variabel. Deze vorm van energie kan immers enkel geleverd worden overdag. Ook doorheen de dag is de intensiteit van de zonnestraling variabel. Men zou dus hier ook reservecapaciteit moeten voorzien. Ook het potentieel voor het opwekken van elektriciteit via zonnecellen is in België beperkt. De Commission on Energy 2030 (2006) schat dat maximaal 5% van de totale oppervlakte van België kan worden gebruikt om via deze methode elektriciteit op te wekken. Niet alleen is de plaats in België beperkt, maar ook het klimaat is een beperkende factor. Zo zijn er in België jaarlijks maar 1000 uren van zonlicht. In landen zoals Spanje kan dit oplopen tot 1800 uren per jaar. Rekening houdende met de huidige rendementen van de zonnecellen zou dit samen goed zijn voor een theoretisch van 10 000 MW, genoeg voor een elektriciteitsproductie van 10 TWh/jaar. Het

economisch potentieel blijft voorlopig echter beperkt. ODE Vlaanderen (2008) schat dit op ongeveer 0,5 TWh tegen 2020. Ten opzichte van 2006 zou dit wel een stijging van een kleine 2500% vertegenwoordigen.

Tenslotte kijken we nog even naar de geschatte externe kosten van zonnecellen. Deze liggen hoger als bij de andere hernieuwbare energiebronnen maar blijven toch een stuk onder de externe kosten van de klassieke centrales. Een groot deel van deze kosten worden gegenereerd gedurende de aanmaak en zuivering tot bruikbare Si-grondstof. Opmerkelijk is dat er tijdens de productie van elektriciteit 75 g/KWh aan CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten. Dit blijft relatief weinig maar is toch opvallend hoger dan bij de andere hernieuwbare energiebronnen.

#### **5.4.11. Waterkracht**

In waterkrachtcentrales doet de kracht van stromend of vallend water een turbine draaien. In waterkrachtcentrales zijn rendementen van 95% haalbaar doordat de turbine en de generator zonder tandwiel op één en dezelfde as kunnen worden gemonteerd. De elektriciteitsproductie van een waterkrachtcentrale is sterk afhankelijk van het hoogteverschil, de stromingssnelheid en de hoeveelheid water die de centrale passeert (VMM, 2007).

Het potentieel voor waterkrachtcentrales is zeer beperkt in België. In België zijn er niet veel gebieden waar er voldoende hoogteverschillen zijn om waterkrachtcentrales mogelijk te maken. België telt momenteel ongeveer 40 hydraulische centrales, die vrijwel allemaal ingeplant zijn in Wallonië. Samen hebben ze een geïnstalleerd vermogen van ongeveer 100 MW (exclusief de pompcentrales). Dit komt overeen met een jaarlijkse elektriciteitsproductie van ongeveer 0,3 TWh/jaar of zo'n 0,3% van de totale Belgische elektriciteitsproductie. In België bestaat er nauwelijks nog een mogelijkheid op de elektriciteitsproductie op basis van waterkracht uit te breiden. De

Commissie AMPERE (2000) schat dat er nog maximaal een extra vermogen van 25 MW kan worden geïnstalleerd.

In tabel 5.13 worden de kostenschattingen voor de productie van elektriciteit met behulp van waterkrachtcentrales weergegeven. Zoals eerder gezegd is de elektriciteitsproductie zeer afhankelijk van de locatie. Dit kan de bandbreedte deels verklaren. Een andere bepalende factor voor de kosten is de grootte van de centrale. De Commissie AMPERE (2000) schat zo dat de kosten 90 EUR/MWh zouden bedragen voor grote centrales (100 kWh) en dat die zouden kunnen oplopen tot 270 EUR/MWh voor kleine centrales (30 kWh). In de tabel zien we dat de schattingen van de Commissie AMPERE opvallend hoger liggen dan de andere schattingen. De schattingen van de Commissie AMPERE zijn specifiek voor de Belgische omstandigheden en kunnen dan ook een indicatie zijn dat elektriciteitsproductie met behulp van waterkrachtcentrales gemiddeld een pak duurder zijn. Niet toevallig zijn de laagste schattingen van het IEA (2006) gebaseerd op waterkrachtcentrales in landen zoals Oostenrijk, wiens geografische ligging zich perfect leent tot de productie van elektriciteit met waterkracht.

*Tabel 5.13: Geschatte kosten van elektriciteitsproductie met waterkracht (EUR/MWh)*

	Private Kost	Externe Kost	Sociale Kost
Commissie AMPERE (2000)	90-270	0,5-2	90-272
IEA (2006)	28-167	n/a	/
VMM (2006)	40-100	1-2,2	41-103
Torfs et al. (2005)	n/a	2,2	/
Totale bandbreedte	28-270	3-7,5	31-278

De externe kosten van waterkrachtcentrales zijn wel beperkt. Hierbij denken we onder andere aan de schade die een stuwdam kan toebrengen aan de natuur. Er is ook hier een kleine indirecte uitstoot van broeikasgassen en andere schadelijke stoffen van ca 10 g/kWh CO<sub>2</sub> en 30-40 mg/kWh voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>, afhankelijk van de grootte van de centrale (Commissie AMPERE, 2009).

#### **5.4.12. Biomassa**

Biomassa als energiebron is organisch materiaal dat afkomstig is van planten en dieren. Enkele voorbeelden van biomassa zijn hout, suikerriet, koolzaad, dierlijke mest, of groenten-, fruit- en tuinafval (GFT). Biomassa kan slechts worden beschouwd als een hernieuwbare energiebron als ze kan worden vernieuwd in dezelfde mate als dat ze worden verbruikt. Zo mag men bij het gebruik van bio-energie op basis van biomassa enkel CO<sub>2</sub> uitstoten die nog maar recent werd vastgelegd, zodat er geen toename is in de atmosferische concentratie van CO<sub>2</sub>. De operatie moet met andere woorden CO<sub>2</sub>-neutraal zijn (VMM, 2007).

De Commissie AMPERE (2000) heeft biomassa in haar onderzoek op een bredere wijze gedefinieerd. Ze beschouwt biomassa als alle brandstoffen die niet worden aanzien als fossiele brandstoffen. De volgende categorieën van biomassa worden onderscheiden:

- Energetische teelten
- Houtresidus
- Slib uit de waterzuivering
- Bermmaaisel
- Landbouwresidus
- Huishoudelijk en bedrijfsafval (hernieuwbare restfractie)
- Stortgas
- Industrieel afval (hernieuwbare restfractie)
- Mest uit de veeteelt

Al deze bronnen van biomassa worden uiteindelijk omgezet in bio-energie, in de vorm van warmte, elektriciteit of afgeleide brandstoffen door middel van verbranding, vergassing of vergisting. Het omzetrendement dat wordt behaald is afhankelijk van de bron zelf en van de gebruikte conversietechniek. Deze omzetting kan gebeuren in speciale biomassacentrales of in combinatie met andere fossiele brandstoffen in klassieke centrales. Het grote voordeel van biomassa is dat ze CO<sub>2</sub>-neutraal is en dat ze dus niet of nauwelijks bijdraagt aan het broeikas-effect. Dit betekent echter niet noodzakelijk dat de externe kosten in zijn totaliteit laag liggen. Zo komen er bijvoorbeeld bij de verbranding van rioolslib veel zware metalen terecht in het milieu. Zowel de private als de externe kosten variëren sterk tussen de verschillende mogelijke bronnen en de gebruikte conversiemethoden. Elke soort biomassa heeft specifieke eigenschappen, eigen voor- en nadelen, en onzekerheden. Dit maakt een eenduidige kostenschätzung quasi onmogelijk en wordt daarom ook achterwege gelaten (Milieu Centraal, z.d; Commissie AMPERE, 2000).

Het potentieel voor elektriciteitsproductie met behulp van biomassa werd geschat in een gezamenlijke studie van ODE Vlaanderen & EDORA (2008). Indien de overheid een proactief beleid zou voeren om het gebruik van biomassa te stimuleren zou er tegen 2020 een potentieel van ongeveer 6,6 TWh bestaan in België. Dit zou een meer dan een verdriedubbeling betekenen ten opzichte van 2006.

#### **5.4.12. Brandstofcellen**

Voor de volledigheid wordt ook het bestaan van brandstofcellen vermeldt. Een brandstofcel zet de chemische energie van een brandstof, meestal waterstof, op elektrochemische wijze direct om naar elektriciteit in tegenstelling tot de klassieke verbrandingsmotoren of stoommachines. Hierdoor zijn er betere rendementen mogelijk. Het elektrisch rendement bedraagt ongeveer 60 tot 70% (Commissie AMPERE, 2000). De technologie heeft ook nog enkele andere belangrijke voordelen. Doordat de brandstofcel geen bewegende onderdelen

bevat is deze geruisloos en minder onderhevig aan slijtage. Ook de modulaire opbouw is een voordeel omdat er zo voor ieder gewenst vermogen een oplossing kan gevonden worden. Misschien wel het belangrijkste voordeel is de beperkte impact op het milieu van de technologie. Wanneer waterstof als brandstof wordt gebruikt voor het proces is water het enige reactieproduct dat de brandstofcel verlaat. Het heeft dus geen negatieve impact op het milieu. De productie van waterstof gebeurt tot op heden nog wel grotendeels met behulp van aardgas, dus er is wel een indirecte impact op het milieu (Neven, 2008).

Brandstofcellen zijn een beloftevolle technologie voor onze toekomstige energievoorziening, maar voor commerciële toepassing is verdere ontwikkeling echter vereist, zowel op technisch als economisch vlak.

## **Hoofdstuk 6: Conclusies**

---

Tot slot wordt er in dit laatste hoofdstuk een antwoord geformuleerd op de verschillende onderzoeksvragen, worden er aanbevelingen gedaan voor de toekomst en worden er enkele bedenkingen bij deze eindverhandeling opgeworpen.

### **6.1. Bespreking van de onderzoeksvragen**

In hoofdstuk 2 wordt vastgesteld dat de atmosferische concentraties van broeikasgassen sinds het begin van de Industriële revolutie in de 18<sup>e</sup> eeuw sterk zijn gestegen als gevolg van menselijke activiteiten. De meeste wetenschappers zijn het erover eens dat deze toename zeer waarschijnlijk aan de basis ligt van de opwarming van de aarde sinds het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw. Deze evolutie van het klimaat kan verregaande en onomkeerbare gevolgen met zich meebrengen voor de natuur en voor de menselijke samenleving indien er geen maatregelen worden getroffen. Beleidsstudies schatten dat de kosten als gevolg van de klimaatverandering op lange termijn kunnen oplopen tot 20% van het mondiale BBP, terwijl preventie slechts 1 tot 5% van het mondiale BBP zou kosten. Het is dan ook belangrijk dat er snel wordt gehandeld om de opwarming van de aarde te beperken.

In hoofdstuk 3 bleek dat er op de vrije markt spontaan geen actie zal worden ondernomen om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen. De klimaatverandering als gevolg van de menselijke uitstoot van broeikasgassen is immers een extern effect waarmee spelers op de vrije markt geen rekening houden. Dit zal een negatief effect hebben op de maatschappelijke welvaart en het welzijn. Het is daarom de verantwoordelijkheid van de overheid om in te grijpen om het verlies aan maatschappelijke welvaart te beperken en een maatschappelijk optimum na te streven.



De overheid beschikt over verschillende beleidsinstrumenten waarmee ze dit kan bereiken. De volgende beleidsinstrumenten worden onderscheiden:

- Informeren
- Milieubelastingen
- Uitstootnormen
- Verhandelbare emissierechten
- Benchmarking
- Technische normen
- Subsidies

In elke situatie moet men nauwkeurig afwegen welke instrumenten het beste passen om een bepaalde doelstelling te behalen. In sommige gevallen zal het volstaan de producenten te informeren om ze te overtuigen om over te schakelen op productiemethoden die de maatschappelijke welvaart ten goede komt. Meestal zal het echter nodig zijn om meer dwingende maatregelen te nemen om het beoogde doel te bereiken. Het opzetten van een systeem van verhandelbare emissierechten is, indien mogelijk, de goedkoopste manier om een vooropgesteld emissieniveau te bereiken. Verhandelbare emissierechten, uitstootnormen, milieubelastingen en technische normen hebben het grote nadeel dat ze de concurrentiepositie van de Belgische bedrijven kunnen ondermijnen als de regelgeving in andere landen soepeler is.

Bij subsidies zijn het niet de bedrijven maar is het de overheid en dus indirect de belastingbetaler die opdraait voor de kosten van het reduceren van de uitstoot. Dit maakt subsidies interessant omdat het de concurrentiepositie van de bedrijven niet aantast. Bovendien heeft het ook nog een sociaal aspect. Iedereen in het land draagt immers zo bij volgens zijn vermogen aan het reduceren van de uitstoot. In België is er echter zo goed als geen budgettaire ruimte meer om subsidies uit te geven. De Belgische staatsschuld is relatief gezien één van de grootste wereldwijd en men verwacht dat deze de volgende jaren nog sterk zal stijgen, mede dankzij de economische crisis.

De opwarming van de aarde is een globaal probleem en vereist dus ook een internationale aanpak waarbij overheden wereldwijd moeten samenwerken. In 1997 werden reeds de eerste bescheiden stappen gezet naar een internationaal klimaatbeleid met het opstellen van het Kyoto-protocol. In het Kyoto-protocol verbinden alle ondertekende industrielanden zich ertoe om hun gezamenlijke broeikasgasemissies tegen 2008-2012 met 5,2% te verminderen ten opzichte 1990. België kreeg hierbij een reductiedoelstelling van 7,5% opgelegd. Uit de meest recente beschikbare gegevens blijkt dat België op schema zit om zijn reductiedoelstellingen te halen, rekening houdende met het gebruik van de flexibele mechanismen. Ondanks de inspanningen van België en andere Annex-I landen blijven de concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer onverminderd stijgen.

De gegevens waarop deze voorgaande conclusies zijn gebaseerd dateren nog van voor het begin van de economische crisis. Men verwacht dat de uitstoot van broeikasgassen in 2008 wereldwijd relatief sterk zal zijn gedaald als gevolg van de dalende economische activiteiten. Hoewel dit kan helpen om aan de Kyoto-normen te voldoen, is het geen duurzame oplossing voor het probleem. Wanneer de economie terug aantrekt zal de uitstoot snel terug stijgen naar het vorige niveau en dit waarschijnlijk zelfs overtreffen omdat er geen inspanningen werden gedaan om de productiemethoden milieuvriendelijker te maken. De economische crisis bedreigt op die manier de goede werking van de internationale emissiehandel. Er gaan dan ook stemmen op om de emissiehandel te vervangen door milieubelastingen op de uitstoot van broeikasgassen.

Het Kyoto-protocol was een eerste stap in de goede richting maar het is zeker niet voldoende om de opwarming van de aarde in te perken. Om rampzalige en onomkeerbare gevolgen voor het milieu te voorkomen moet de opwarming van de aarde beperkt worden tot maximaal 2°C ten opzichte van de 18<sup>e</sup> eeuw. Dit betekent concreet dat men de atmosferische concentraties van broeikasgassen moet stabiliseren op maximum 450 ppm CO<sub>2</sub>-eq. Dit doel is

enkel nog mogelijk indien de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen begint te dalen tegen 2015. Tegen 2050 zou de werelduitstoot zelfs moeten worden gereduceerd met meer als 50%.

Deze ambitieuze doelstellingen zijn zeker nog haalbaar zijn, maar het zal veel politieke moed vergen om ze daadwerkelijk te halen. In december 2009 zal er in Denemarken een nieuwe klimaatconferentie plaatsvinden om een opvolger voor het Kyoto-protocol op te stellen. De Europese Unie heeft niet gewacht op deze opvolger en heeft in het kader van een ambitieus Europees klimaatplan reeds beslist om haar uitstoot van broeikasgassen te verminderen met 20% tegen 2020. België zal dus inspanningen moeten leveren om aan deze nieuwe reductiedoelstellingen te voldoen en om te anticiperen op de verdere toekomst.

De evoluties in de elektriciteitsproductie zullen in aanzienlijke mate mee de toekomstige uitstoot van broeikasgassen in België mee bepalen. De elektriciteitsproductie is immers verantwoordelijk voor ongeveer 17% van de totale uitstoot van broeikasgassen in België en de sector staat op een belangrijk keerpunt. De federale overheid heeft immers besloten om alle kerncentrales, goed voor meer dan de helft van de totale productiecapaciteit, te sluiten tussen 2015 en 2025. Bovendien moet een aanzienlijk aandeel van de overgebleven productiecapaciteit worden vervangen en moet men voor extra capaciteit zorgen om aan de toekomstige vraag naar elektriciteit te kunnen voldoen. Men schat dat er tegen 2030 tot 89% van de huidige capaciteit aan bijkomende productie moet worden voorzien (rekening houdende met de kernuitstap).

In hoofdstuk 5 werd er daarom een economische analyse uitgevoerd van de verschillende alternatieven voor elektriciteitsproductie. In de overzichtstabel op de volgende pagina worden de relatieve kwalitatieve en kwantitatieve scores van de terugkerende aspecten op basis van hoofdstuk 5 van de verschillende technologieën samengevat.

	Steenkool	STEG	WKK	Kern	Kernfusie	Wind	PV	Water	Biomassa	Brandstof cel
Sociale Kost (EUR/MWh)	36-89	26-70	19-159	16-43	?	25-128	107-657	31-278	?	?
Broeikasgas uitstoot (g/kWh)	670-900	350-450	?	10-16	Indirect	25-30	74-100	10	Indirect	Indirect
Techn. Toekomst visie	+	+	+	++	+++	+(+)	++(+)	(+)	+	?
Energie voorziening	-	---	?	++	++(+)	+++	+++	+++	+++	++
Gevoeligheid grondstof prijs	--	---	?	-	++	+++	+++	+++	?	?
Potentieel	100%	100%	25%	100%	?	12%	0,6%	0,4%	7,4%	?
Variabiliteit	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	--	++	+++
Flexibiliteit	--	++	?	---	?	++	++	++	?	?
Belasting elektriciteits net	+++	+++	---	+++	+++	---	---	--	++	+++

Bij de beoordeling van verschillende aspecten wordt er in deze tabel gebruik gemaakt van + en - tekens. Hoe beter een relatieve score, hoe meer + tekens er zullen verschijnen. Naarmate de score slechter is krijgt de technologie meer - tekens. De tabel biedt een mooi overzicht maar de wetenschappelijke waarde ervan is beperkt. De toegekende relatieve scores gebeurden op een eerder arbitraire wijze waarbij de waarde van bijvoorbeeld +++ niet noodzakelijk evenredig hoger zal liggen als de waarde van ++ en waarbij er nog significante verschillen kunnen bestaan tussen twee identieke scores bij verschillende technologieën. Voor een meer accuraat beeld is het aan te raden terug te gaan naar het desbetreffende onderdeel in hoofdstuk 5.

Op de eerste rij van de tabel worden de verschillende bandbreedtes van *sociale kostprijzen* voor de verschillende technologieën weergegeven. Ondanks de soms grote bandbreedten van de technologieën is het toch mogelijk om een beeld te vormen van de onderlinge verhoudingen en bepaalde conclusies te trekken. Voor kernfusie en brandstofcellen werden hierbij geen cijfers opgegeven, omwille van het feit dat deze technologieën nog maar in hun kinderschoenen staan. Zoals eerder gezegd is een eenduidige kostenschattingen voor biomassa ook quasi onmogelijk dankzij de grote verscheidenheid aan bronnen en conversiemethoden.

Op de tweede rij van de tabel wordt de *broeikasgasuitstoot* per geproduceerde eenheid elektriciteit weergegeven. In het kader van deze thesis is dit immers een belangrijk element. In de uiteindelijke conclusie moet hier echter apart niet of nauwelijks rekening mee worden gehouden aangezien de geschatte kosten van deze uitstoot ook al verwerkt zitten in de totale sociale productiekostprijs. De uitstoot(besparing) van WKK en is sterk afhankelijk van de gebruikte technologie en hier kan dus ook moeilijk een eenduidig cijfer op geplakt worden. Biomassa, brandstofcellen en kernfusie zijn in theorie CO<sub>2</sub>-neutraal en hebben enkel een indirecte uitstoot van broeikasgassen waarvoor de waarden niet bekend zijn.

Met de *technologische toekomstvisie* op de derde rij wordt er gekeken naar de technologische verbeteringen die nog mogelijk zijn voor de alternatieven. Dit omvat een combinatie van toekomstige innovaties die het rendement kunnen doen stijgen en de kosten die kunnen dalen door de toepassing van de technologie. De relatieve scores hier variëren van +, kleine verbeteringen mogelijk, tot +++, wat staat voor een enorm technologisch potentieel. De verbeteringsmarge van de klassieke centrales is relatief klein. Bij kernenergie kan er echter nog grote vooruitgang geboekt worden met centrales van de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> generatie. Het grootste potentieel ligt ongetwijfeld bij kernfusie. Windenergie heeft ook een grotere groeimarge dan de klassieke centrales. Elektriciteitsproductie op basis van PV heeft ook nog een lange weg te gaan en kan op vlak van rendement en kostprijs nog grote vooruitgang maken.

In de vierde rij wordt de *energievoorziening* beoordeeld, op een schaal van --- tot +++. Deze score is een combinatie van de uitputbaarheid van de grondstof, de bevoorradingszekerheid en dus ook de volatiliteit van de grondstofprijzen. De hernieuwbare energiebronnen scoren hier uiteraard het beste op aangezien deze gebruik maken van (in theorie) onuitputtelijke energiebronnen. Kernenergie scoort ook hier nog zeer goed dankzij de overvloedige aanwezigheid van uranium op aarde, de grote energiedichtheid van uranium en de geografische gunstige spreiding van vindplaatsen van de grondstof. Aan de andere kant van het spectrum vinden we de STEG-centrales die (voornamelijk) afhankelijk zijn van aardgas. In hoofdstuk 5 werd al aangetoond dat de reserves hiervan snel slinken, dat Europa meer en meer afhankelijk wordt van landen zoals Rusland en de OPEC en dat de prijs van gas zeer volatiel kan bewegen omwille van zijn link met de olieprijs.

Een vijfde aspect is de *gevoeligheid van de technologie van de grondstofprijs*. Hier wordt opnieuw een schaal van --- tot +++ toegepast. Hernieuwbare energiebronnen (behalve biomassa) zijn natuurlijk helemaal niet afhankelijk van de kostprijs van hun energiebron en krijgen dan ook een score van +++. De kostprijs van de geproduceerde elektriciteit is bij STEG-centrales het meest

gevoelig voor de brandstofkost (gas). Van de traditionele vormen van elektriciteitsproductie is kernenergie het minst gevoelig voor de brandstofkost.

Op de zesde rij wordt het maatschappelijke *potentieel* van de alternatieven met elkaar vergeleken (tijdshorizon 2020). Het potentieel wordt uitgedrukt in termen van % van de huidige elektriciteitsproductie. De klassieke vormen (steenkool, STEG, kern) kunnen in principe allemaal volledig in de elektriciteitsvoorziening voorzien. Het potentieel van de hernieuwbare bronnen is echter economisch en technisch beperkt. Het werkelijke potentieel voor technologieën zoals kernenergie en steenkool kan ook nooit oplopen tot 100%. Ze zijn immers niet flexibel genoeg om veranderingen in de vraag op te vangen. Hier komen we verder nog kort op terug.

Op de volgende rij staat er een overzicht van de *variabiliteit* van de aanvoer voor de verschillende technologieën. Dit is vooral bij hernieuwbare energie (wind, water en zon) een probleem. Deze zijn immers afhankelijk van factoren zoals het aantal uren zon, de windsnelheid en de regenval.

Een zevende aspect dat is opgenomen in de tabel is de *flexibiliteit* van de technologieën. De vraag naar elektriciteit is immers niet constant en om problemen met het elektriciteitsnet te voorkomen moet het aanbod elektriciteit gelijk zijn aan de vraag. Kerncentrales en steenkoolcentrales zijn bijvoorbeeld echter helemaal niet flexibel om aan zulke schommelingen te voldoen. Ze zijn dan ook alleen maar geschikt om in te staan voor een bepaalde basislast en moeten verder worden aangevuld met meer flexibele vormen zoals STEG-centrales, gasturbines en hernieuwbare energiebronnen.

Een laatste aspect is de *belasting van het elektriciteitsnet*. Dit is een aspect waar vaak geen rekening mee wordt gehouden. In België is het elektriciteitsnet niet voorzien op grootschalige decentrale elektriciteitsproductie. Grote investeringen zullen plaatselijk nodig zijn om dit

mogelijk te kunnen maken. In de tabel worden de technologieën die hiermee geconfronteerd worden een score tussen de – en --- aangerekend.

Het is niet makkelijk om een eenduidige aanbeveling te doen naar een evenwichtige energiemix voor België in de toekomst. De elektriciteitsproductie zal nooit afhankelijk zijn van één bron maar zal bestaan uit een combinatie van technologieën. Men zou moeten streven naar een energiemix die de sterke punten van verschillende technologieën met elkaar combineert om zo een optimale energiemix te creëren.

Het belangrijkste knelpunt in deze discussie is zonder twijfel de **kernuitstap**. In de analyse in hoofdstuk 5 zijn er zeer weinig economische argumenten terug te vinden die de uitstap zouden rechtvaardigen. Uit de beschikbare gegevens blijkt namelijk dat kernenergie meer dan waarschijnlijk de laagste sociale productiekostprijs heeft, en dit is toch het voornaamste aspect waarop beleidsbeslissingen zouden moeten worden gebaseerd. Hierbij wordt opgemerkt dat voorstanders van de kernuitstap argumenteren dat de risico's in verband met terrorisme, afvalverwerking en ongevallen de kernuitstap vaak te laag worden ingeschat door economische analyses. De vraag is echter of deze argumenten opwegen tegen de schijnbare grote voordelen van het langer openhouden van de kerncentrales.

België is immers tot op heden voor meer dan 50% afhankelijk van kernenergie en heeft nu al een gebrek aan productiecapaciteit. Het Federale Planbureau (2008) verwacht dan ook dat we tegen 2020 al meer dan 14 GWh aan elektriciteit zullen moeten invoeren uit Frankrijk en Nederland, mede dankzij het wegvallen van de eerste kerncentrales. Bovendien zou het zonder kerncentrales bijna onmogelijk zijn om te voldoen aan onze klimaatdoelstellingen. Tegen 2020 alleen al zou de uitstoot van broeikasgassen in de elektriciteitssector stijgen met 31% volgens het Federaal Planbureau (2008) omdat de kerncentrales voornamelijk zullen worden vervangen door de meer vervuilende STEG-centrales. Verder hebben we ook



gezien dat het langer openhouden van de reeds afgeschreven kerncentrales ook een belangrijk budgettair voordeel oplevert voor de overheid, maar ook voor de bevolking en de economie in zijn geheel. De private kost bij kernenergie ligt gevoelig lager wat op zijn beurt een milderend effect kan hebben op de hoge elektriciteitsprijzen in België. In de toekomst moet men het bouwen van nieuwe kerncentrales ook zeker niet uitsluiten. We hebben immers gezien dat kerncentrales van de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> generatie veelbelovende opties kunnen zijn in de toekomst voor de verzekering van de Belgische elektriciteitsvoorziening.

Ook op de andere aspecten scoort kernenergie aanvaardbaar tot zeer goed. De enige grote beperking van kernenergie is het gebrek aan flexibiliteit. Kerncentrales moeten altijd draaien tegen hun volledig vermogen en het duurt meer dan 24u om een kerncentrale op te starten. Kerncentrales zijn dus niet geschikt om veranderingen in de vraag naar elektriciteit op te vangen. De vraag naar elektriciteit in België schommelt tussen 13 GW en 6,5 GW. Kernenergie moet daarom worden aangevuld met meer flexibele vormen van elektriciteitsproductie.

Een ander belangrijk onderdeel van de Belgische elektriciteitsproductie in de toekomst zullen de **hernieuwbare energiebronnen** worden. Voor de termijn 2020 is het duidelijk dat enkel windenergie en biomassa een significant potentieel hebben in de Belgische elektriciteitsproductie. Zonne-energie heeft ongetwijfeld het grootste technisch potentieel, maar is een optie voor de langere termijn. De bijdrage van waterkracht is eerder marginaal en andere vormen van hernieuwbare energie zijn in België quasi verwaarloosbaar. Een groot voordeel van de hernieuwbare energiebronnen zijn de lage externe kosten. Bovendien zorgen ze ervoor dat België minder afhankelijk wordt van andere landen voor zijn energievoorziening.

Voorstanders van hernieuwbare energiebronnen en de kernuitstap zien kernenergie al te vaak als een concurrent voor hernieuwbare energie.

Schattingen van het Federaal Planbureau (2008) ontkrachten echter deze stelling. Verschillende scenario's wijzen volgens hen uit dat de aanwezigheid van nucleaire eenheden de uitbouw van hernieuwbare energie niet in de weg staat.

Dankzij het beperkte potentieel en de variabiliteit van de opgewekte energie bij hernieuwbare energiebronnen moeten ook **klassieke thermische centrales** een belangrijke rol blijven spelen in de energiemix. STEG-centrales zijn een goedkope manier om elektriciteit op te wekken en in vergelijking met de steenkoolcentrales blijft de uitstoot van broeikasgassen relatief beperkt. STEG-centrales zijn bovendien flexibel waardoor ze makkelijk kunnen inspelen op veranderingen in de vraag naar elektriciteit en op de variabele elektriciteitsproductie van de hernieuwbare energiebronnen. STEG-centrales hebben momenteel de voorkeur op kolencentrales maar dit kan in de toekomst veranderen. De gasprijzen zijn immers volatiel en zullen in de toekomst waarschijnlijk sneller stijgen dan de steenkoolprijzen. Enkelvoudige gasturbines in een enkelvoudige cyclus zijn zowel duur als vervuilend, maar kunnen uitermate geschikt zijn om plotse schokken in de vraag op te vangen. Gasturbines hebben immers de kortste opstarttijd.

Ook **WKK** zal in de toekomst een steeds belangrijkere rol opeisen in de Belgische elektriciteitsproductie. De energiebesparing en de vermeden uitstoot van onder andere broeikasgassen ten opzichte van de klassieke thermische centrales maakt het een zeer aantrekkelijk alternatief. Het potentieel van WKK wordt beperkt door twee factoren. Enerzijds is de elektriciteitsproductie met WKK afhankelijk van de vraag naar warmte en anderzijds is het elektriciteitsnet niet voorzien op grootschalige toepassing van decentrale WKK-installaties. Toch schat men dat WKK een potentieel heeft van 25% van de totale elektriciteitsproductie in België tegen 2020.

Op basis van bovenstaande gegevens zou men een evenwichtige energiemix moeten kunnen bereiken waarin kernenergie, windenergie, biomassa en WKK een belangrijke rol spelen, aangevuld door STEG en kolencentrales. De overheid moet gebruik maken van haar beleidsinstrumenten om er voor te zorgen dat de gewenste energiemix kan worden bereikt. Zonder overheidsoptreden zullen de economische potentiëlen voor onder andere windenergie, biomassa en WKK niet bereikt worden volgens het Federale Planbureau (2008). De overheid moet een proactief beleid voeren om deze niveaus te bereiken. De overheid zal hiervoor gebruik moeten maken van quota en subsidies om dit te bereiken.

Op lange termijn moet men ook de ontwikkelingen van technologieën zoals kernfusie, brandstofcellen en photovoltaïsche cellen nauwlettend opvolgen. Deze technologieën hebben immers op lange termijn een groot potentieel. Het is dus ook interessant om de ontwikkeling van deze technologieën te ondersteunen. Ook hier zijn het uitgeven van subsidies of het opleggen van quota door de overheid zijn gepaste manieren om dit te bespoedigen.

## **6.2. Bedenkingen**

Tenslotte worden nog de volgende bedenkingen vermeld in verband met deze eindverhandeling:

- In deze thesis werd er enkel aandacht besteed aan de maatregelen die er mogelijk zijn in de elektriciteitsproductie. Dit is slechts één sector die bijdraagt aan de uitstoot van broeikasgassen. Men moet deze maatregelen dan ook afwegen tegen maatregelen uit andere sectoren vooraleer men beslissingen neemt.
- Men moet ook niet alleen naar de aanbodkant van de elektriciteitsmarkt kijken. Ook aan de vraagkant kunnen er maatregelen worden genomen

om het verbruik van elektriciteit in te dijken. Dit kan ook een bijdrage leveren aan de strijd tegen de klimaatverandering.

- Tijdens het schrijven van deze thesis woedt er economische crisis doorheen de wereld. Het is op dit moment moeilijk in te schatten welk effect deze crisis precies zal hebben op bepaalde elementen (uitstoot broeikasgassen, grondstofprijzen, ...) in deze thesis. Dit zal pas achteraf volledig duidelijk worden.
- In deze thesis is er nauwelijks aandacht besteed aan de beleidsinstrumenten die de overheid momenteel reeds toepast in de elektriciteitssector. Het kan interessant zijn om deze te vergelijken met de bevindingen van deze masterproef.
- Er werd binnen het bestek van deze masterproef voor geopteerd voor een kosten-effectiviteitanalyse. Men mag echter ook niet vergeten dat er ook baten zijn die niet werden opgenomen in deze analyse.
- Het had ook een mogelijkheid kunnen zijn om de probleemstelling te analyseren met behulp van een multicriteria beslissingsanalyse.

## Lijst van geraadpleegde werken

---

Agoria (2009). *Groene technologiesector in 2020 goed voor 40.000 jobs*. Opgevraagd op 11 augustus, 2009, via <http://www.ingenieur-job.stepstone.be/content/be/bnl/Agoria-Groene-technologiesector-in-2020-goed-voor-40000-jobs.cfm>

Alterra (2005). *Inwerkingtreding en uitvoering van het Kyoto-protocol*. Opgevraagd op 17 maart, 2009, via <http://www2.alterra.wur.nl/webdocs/internet/corporate/prodpubl/boekjesbrochures/kyoto.pdf>

Auffhammer, M. & Carson, R.T. (2008) *Forecasting the Path of China's CO2 Emissions Using Province Level Information*. Opgevraagd op 23 maart, 2009, via [http://repositories.cdlib.org/are\\_ucb/971/](http://repositories.cdlib.org/are_ucb/971/)

APS Vlaanderen (2003). *Van Kyoto naar Vlaanderen*. Opgevraagd op 17 september, 2008, via [http://aps.vlaanderen.be/statistiek/dossiers/stat\\_dossiers\\_kyoto.htm](http://aps.vlaanderen.be/statistiek/dossiers/stat_dossiers_kyoto.htm)

Arnott, S. (2009, 9 Februari). Plunging price of carbon may threaten investment. *The independent*. Opgevraagd op 18 maart, 2009, via <http://www.independent.co.uk/news/business/news/plunging-price-of-carbon-may-threaten-investment-1604649.html>

Baede, A.P.M. (1992). Energie en het broeikaseffect. In J. Weerdenbrug, *Energie in de toekomst: een brandende kwestie* (pp. 29-42). Utrecht: Igitur.

Begrotingstekort loopt op tot 3,4% (2009, 20 februari). *De Morgen*. Opgevraagd op 29 april, 2009, via Mediargus database

Begrotingstekort VS naar 1,8 biljoen (2009, 20 maart). *De Morgen*.  
Opgevraagd op 28 april, 2009, via Mediargus database

Belgische Senaat (2007). *Wetsontwerp houdende instemming met het samenwerkingsakkoord tussen de Federale Overheid, het Waalse Gewest, het Vlaamse Gewest en het Brusselse Hoofdstedelijke Gewest inzake de uitvoering van sommige bepalingen van het protocol van Kyoto, afgesloten te Brussel, op 19 februari 2007*. Opgevraagd op 25 oktober, 2008, via  
<http://www.senate.be/www/?MIval=/publications/viewPub&COLL=S&LEG=3&NR=2411&PUID=50336430&LANG=nl>

Blanford, G.J., Richels, R.G. & Rutherford, T.F. (2008). *Revised Emissions Growth Projections: Why Post-Kyoto Climate Policy Must Look East*.  
Opgevraagd op 23 maart, 2009, via  
[http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/18581/revised\\_emissions\\_growth\\_projections.html](http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/18581/revised_emissions_growth_projections.html)

Boardman, A.E., Greenberg, D.H., Vining, A.R. & Weimer, D.L (2006). *Cost-Benefit Analysis*. New Jersey: Pearson Prentice Hall

BP (2008). *Statistical review of World energy*. Opgevraagd op 5 mei, 2009, via  
[http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2008/STAGING/local\\_assets/downloads/pdf/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_review\\_2008.pdf](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_review_2008.pdf)

Brahic, C. (2007). *Climate myths: Human CO2 emissions are too tiny to matter*. Opgevraagd op 3 februari, 2009, via  
<http://www.newscientist.com/article/dn11638>

Buelens, W. (2009). *Presentatie: Toekomst milieuvriendelijke energie Vlaanderen*. Opgevraagd op 13 augustus, 2009, via  
<http://www.minaraad.be/hoorzittingen/2008/hoorzitting-het-potentieel-van->

hernieuwbare-energie-in-vlaanderen/de-vlaamse-overheid-en-de-hernieuwbare-energie/ifest-wim-buelens.pdf/download

Burchfield, J. (1981). *John Tyndall, Essays on a Natural Philosopher.*

Opgevraagd op 11 maart, 2009, via

[http://www.tyndall.ac.uk/general/history/john\\_tyndall\\_biography.shtml](http://www.tyndall.ac.uk/general/history/john_tyndall_biography.shtml)

Carbon Positive (2009). *CER Market reports.* Opgevraagd op 29 april, 2009, via

<http://www.carbonpositive.net/searchnewsarticles.aspx?menu=1&s=1&categoryID=3&subcategoryID=13>

Carbon Positive (2009). *EU carbon rally ends in June.* Opgevraagd op 9 juli, 2009, via <http://www.carbonpositive.net/viewarticle.aspx?articleID=1572>

CE Delft (2007). *Nieuwe elektriciteitscentrale in Nederland: De vergeten kosten.* Opgevraagd op 15 augustus, 2009, via

[http://www.ce2030.be/public/documents\\_publ/REN\\_for\\_CE2030\\_V5.pdf](http://www.ce2030.be/public/documents_publ/REN_for_CE2030_V5.pdf)

CEESE (2004). *Les implications du Protocole de Kyoto pour la Belgique.*

Opgevraagd op 18 maart, 2009, via

[http://dev.ulb.ac.be/ceese/CEESE/documents/Kyoto\\_Rapport%20final\\_2004\\_1ast.pdf](http://dev.ulb.ac.be/ceese/CEESE/documents/Kyoto_Rapport%20final_2004_1ast.pdf)

Centrale Planbureau (2006). *Liberalisation of European energy markets: challenges and policy options.* Opgevraagd op 9 mei, 2009, via

<http://www.cpb.nl/nl/pub/cpbreeksen/document/138/doc138.pdf>

Cleutinx (2009). *The energy challenge of the European Union.* Opgevraagd op 11 mei, 2009, via <http://ec.europa.eu/euratom/docs/2008-12-15-CC-Louvain-speechfinal.pdf>

Coal prices in Europe hovers at lower levels than in Asia (27 april, 2009). *Coal explorer*. Opgevraagd op 12 mei, 2009, via <http://74.125.77.132/search?q=cache:WDwr05SH44UJ:www.coalexplorer.com/20092604/coal-prices-europe-hovers-lower-levels-asia+coal+prices+EU&cd=1&hl=nl&ct=clnk&gl=be>

Commissie Benchmarking (2009). *Energiebenchmarking in Vlaanderen*. Opgevraagd op 28 april, 2009, via <http://www.benchmarking.be/>

Commission Energy 2030 (2006). *Renewable energies*. Opgevraagd op 12 mei, 2009, via [http://www.ce2030.be/public/documents\\_publ/REN\\_for\\_CE2030\\_V5.pdf](http://www.ce2030.be/public/documents_publ/REN_for_CE2030_V5.pdf)

Commission Energy 2030 (2007). *Belgium's energy challenges towards 2030*. Opgevraagd op 12 april, 2009, via [http://www.ce2030.be/public/documents\\_publ/CE2030%20Report\\_FINAL.pdf](http://www.ce2030.be/public/documents_publ/CE2030%20Report_FINAL.pdf)

Conway, D. (1998). *Classical liberalism: The unvanquished ideal*. Opgevraagd op 3 maart, 2009, via [http://books.google.be/books?id=35I\\_bV-fovkC&dq=Classical+liberalism:+The+unvanquished+ideal&printsec=frontcover&source=bl&ots=W6VsKA8kRJ&sig=9TYFsmbQ0oqEApir\\_Fo\\_2HX93\\_U&hl=nl&ei=38IkSsWSFMKO-AbU4tncBg&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=2](http://books.google.be/books?id=35I_bV-fovkC&dq=Classical+liberalism:+The+unvanquished+ideal&printsec=frontcover&source=bl&ots=W6VsKA8kRJ&sig=9TYFsmbQ0oqEApir_Fo_2HX93_U&hl=nl&ei=38IkSsWSFMKO-AbU4tncBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2)

CREG (2007). *De ontoereikende productiecapaciteit van elektriciteit in België*. Opgevraagd op 2 mei, 2009, via <http://www.creg.info/pdf/Studies/F715NL.pdf>

CREG (2008). *Jaarverslag 2008*. Opgevraagd op 2 mei, 2009, via <http://www.creg.info/pdf/Ra/2008/rep2008nl.pdf>

CREG (2009). *de falende prijsvorming in de vrijgemaakte Belgische elektriciteitsmarkt en de elementen die aan de oorsprong ervan liggen*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via <http://www.creg.info/pdf/Studies/F811NL.pdf>



Crevits, H. (2008). *Uitstoot broeikasgassen voor het eerst onder Kyotodoelstelling: 7% onder het niveau van 1990*. Opgevraagd op 21 maart, 2009, via <http://www.hildecrevits.be/nieuw/04pers/persbDetail.php?id=233>

De Borger, B. & Van Poeck, A. (2004). *Algemene Economie*. Antwerpen: De Boeck.

De Clerq, M. (2006). *Economie toegelicht*. Apeldoorn: Garant.

De Wit, W. (2009, 22 april). Stop de relanceplannen, vergeet Keynes. *De Standaard*. Opgevraagd op 28 april, 2009, via Mediargus database

Deconinck, E. & Gillard, W. (2005). De liberalisering van de elektriciteitsmarkt in België [elektronische versie]. *Jura falconis*, 413, 453-538

Departement Leefmilieu, Natuur en Energie (z.d.). *Europees beleidskader*. Opgevraagd op 27 oktober, 2008, via <http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatbeleid/europees-beleidskader>

Departement Leefmilieu, Natuur en Energie [LNE] (2005). *Vlaams klimaatsbeleidsplan 2006-2012*. Opgevraagd op 30 oktober, 2008, via [http://www.mina.be/uploads/060720\\_VKP\\_2006-2012.pdf](http://www.mina.be/uploads/060720_VKP_2006-2012.pdf)

D'haeseleer (2002). *Future Electricity Generation in Belgium and its GHG consequences*. Opgevraagd op 12 augustus, 2009, via [http://www.kuleuven.be/ei/Public/publications/kviv-ovl\\_nov21-2002.ppt](http://www.kuleuven.be/ei/Public/publications/kviv-ovl_nov21-2002.ppt)

Devriendt, N., Dooms, G., Liekens, J., Nijs, W. & Pelkmans L. (2005). *Prognoses voor hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling tot 2020*. Opgevraagd op 23 juli, 2009, via

[http://www.ode.be/images/stories/Rapporten/prognosestudie\\_vito\\_definitief\\_rapport\\_051213.pdf](http://www.ode.be/images/stories/Rapporten/prognosestudie_vito_definitief_rapport_051213.pdf)

ECN (2008). *Kosten duurzame elektriciteit*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via <http://www.ecn.nl/publicaties/default.aspx?nr=ECN-M--08-1060>

Eeckhoudt et al (1999). *Risk aversion and the external cost of a nuclear accident*. Opgevraagd op 3 augustus, 2009, via [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6WJ7-45FCBFG-27&\\_user=10&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=984145948&\\_rerunOrigin=scholar.google&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=f46611e706b84f24489bd09e86ff8e9d](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WJ7-45FCBFG-27&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=984145948&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=f46611e706b84f24489bd09e86ff8e9d)

Electrabel (z.d.). *Informatiefolder productietechnieken*. Opgevraagd op 12 mei, 2009, via <http://www.Electrabel.be/whoarewe/activities/generation.aspx>

Ellerman, A.D. & Decaux, A. (1998) *Analysis of Post-Kyoto CO2 Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves*. Opgevraagd op 18 maart, 2009, via [http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/3608/MITJPSPGC\\_Rpt40.pdf?sequence=1](http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/3608/MITJPSPGC_Rpt40.pdf?sequence=1)

ELIA (2009). *Jaarverslag 2008*. Opgevraagd op 22 mei, 2009, via [http://www.elia.be/repository/Lists/Library/Attachments/777/ELIA-Jaarverslag\\_2008-NL.pdf](http://www.elia.be/repository/Lists/Library/Attachments/777/ELIA-Jaarverslag_2008-NL.pdf)

Energy: Coal prices rise on European sale (11 augustus, 2009). *Business report*. Opgevraagd op 12 augustus, 2009, via <http://www.busrep.co.za/index.php?fSectionId=564&fArticleId=5120657>

Environmental Protection Agency (2008). *Climate change*. Opgevraagd op 3 oktober, 2008, via <http://www.epa.gov/climatechange/>

Eurogas (2008). *Annual report 2007-2008*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via <http://www.eurogas.org/uploaded/Final%20version%20Annual%20Report%20as%20of%20231208.pdf>

European Environmental Agency (2008) *Global and European temperature CSI 012*. Opgevraagd op 10 december, 2008, via <http://ims.eionet.europa.eu/>

European Environmental Agency (2008). *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2008*. Opgevraagd op 20 maart, 2009, via [http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2008\\_5](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_5)

European Wind Energy Association (2005). *LARGE SCALE INTEGRATION OF WIND ENERGY IN THE EUROPEAN POWER SUPPLY: analysis, issues and recommendations*. Opgevraagd op 1 mei, 2009, via [http://www.eurosfaire.prd.fr/7pc/doc/1158127424\\_ewea\\_051215\\_grid\\_report.pdf](http://www.eurosfaire.prd.fr/7pc/doc/1158127424_ewea_051215_grid_report.pdf)

Europees Parlement (2004). *RICHTLIJN 2004/101/EG*. Opgevraagd op 18 maart, 2009, via [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/nl/oj/2004/l\\_338/l\\_33820041113nl00180023.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/nl/oj/2004/l_338/l_33820041113nl00180023.pdf)

Europese Commissie (2006). *A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via [http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=en&type\\_doc=COMfinal&an\\_doc=2006&nu\\_doc=105](http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=en&type_doc=COMfinal&an_doc=2006&nu_doc=105)

Europese Commissie (2007). *EU action against climate change: Leading global action to 2020 and beyond*. Opgevraagd op 10 oktober, 2008, via

[http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/eu\\_action\\_against\\_climate\\_change.pdf](http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/eu_action_against_climate_change.pdf)

Europese Commissie (2008). *Emission Trading Scheme (EU ETS)*. Opgevraagd op 18 maart, 2009, via [http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/index_en.htm)

Europese Commissie (2009). *Quarterly Report on European Electricity Markets*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via [http://ec.europa.eu/energy/observatory/doc/electricity/qreem\\_2008\\_quarter4.pdf](http://ec.europa.eu/energy/observatory/doc/electricity/qreem_2008_quarter4.pdf)

Europese Commissie (2009). *Verslag over de vooruitgang die is geboekt bij de totstandbrenging van de interne markt voor gas en elektriciteit*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0115:FIN:NL:PDF>

EU Milieuraad (1998). *Burden sharing agreement*. Opgevraagd op 3 oktober, 2008, via <http://ec.europa.eu/environment/resources/euburden.htm>

EU en België zitten op Kyoto-schema (2008, 16 oktober). *De Morgen*. Opgevraagd op 16 oktober, 2008, via Mediargus database

Eyckmans, P. & Pepermans, G. (2003). *IS ER EEN TOEKOMST VOOR KERNENERGIE IN BELGIË?* Opgevraagd op 3 augustus, 2009, via [http://www.econ.kuleuven.ac.be/fetew/pdf\\_publicaties/3195.pdf](http://www.econ.kuleuven.ac.be/fetew/pdf_publicaties/3195.pdf)

Eyckmans, J. & Proost, S. (1998). *Klimaatonderhandelingen in Rio en Kyoto: een succesverhaal of een maat voor niets*. Leuven: Centrum voor Economische Studiën.

Federaal Planbureau (2008). *Impact van het Energie/Klimaatpakket op het Belgisch energetisch en economisch systeem*. Opgevraagd op 2 mei, 2009, via [http://www.plan.be/press/press\\_det.php?lang=nl&TM=45&IS=67&KeyPub=764](http://www.plan.be/press/press_det.php?lang=nl&TM=45&IS=67&KeyPub=764)

Federaal planbureau (2008). *Perspectieven van elektriciteitsbevoorrading*. Opgevraagd op 2 augustus, 2009, via [http://www.reactricity.fgov.be/fw\\_files/File/EPE\\_Projet%20de%20rapport\\_NL\\_081203\\_Erratum%20incorpore.pdf](http://www.reactricity.fgov.be/fw_files/File/EPE_Projet%20de%20rapport_NL_081203_Erratum%20incorpore.pdf)

Federaal Planbureau (2009). *Energievooruitzichten voor België tegen 2030 in een tijdperk van klimaatverandering*. Opgevraagd op 30 april, 2009, via <http://www.plan.be/admin/uploaded/200711281030130.persnl.pdf>  
Federale Overheidsdienst voor Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu [FOD VVVL] (2009). *Klimaatverandering*. Opgevraagd op 1 februari, 2009, via <http://www.climatechange.be/>

Federaal Planbureau (2009). *Impact van het Energie/Klimaatpakket op het Belgisch energetisch en economisch systeem*. Opgevraagd op 11 augustus, 2009, via [http://www.plan.be/press/press\\_det.php?lang=nl&IS=67&KeyPub=764](http://www.plan.be/press/press_det.php?lang=nl&IS=67&KeyPub=764)

FORATOM (2009). *Kernenergie op weg naar meer duurzaamheid*. Opgevraagd op 12 mei, 2009, via <http://www.nuclearforum.be/nl/themas/toekomst/kernenergie-op-weg-naar-meer-duurzaamheid>

G20 akkoord over betere regulering financiële markten (2008, 15 november). *De standaard*. Opgevraagd op 28 april, 2009, via Mediargus database

Gazprom stopt gasleveringen Oekraïne (1 januari, 2006). *De standaard*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via

<http://www.standaard.be/Artikel/Detail.aspx?artikelId=b293464060101>

Gazprom onderzoekt sites in Loenhout en Poederlee (19 januari, 2009). *De standaard*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via Mediargus database

GDF Suez (2009). *Evolution prix du gaz*. Opgevraagd op 11 augustus, 2009, via <http://www.gdfsuez.com/fr/finance/prix-du-gaz/evolution-prix-du-gaz.aspx?Culture=fr>

Geen beslissing over kernuitstap voor regionale verkiezingen (12 november, 2008). *De standaard*. Opgevraagd op 5 mei, 2009, via Mediargus database

Global Resource Information Database-Arendal [GRID-Arendal] (2001). *Vital Climate Graphics*. Opgevraagd op 17 december, 2008, via <http://www.grida.no/>

Greenfacts (2009). *Glossary*. Opgevraagd op 12 januari, 2009, via <http://www.greenfacts.org/glossary>

Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva (2009). *Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD*. Opgevraagd op 30 maart, 2009, via <http://www.glaciology.net/Home/PDFs/Announcements/gslprojection>

Gusbin, D. & Hoornaert, B. (2005). *Energievoorzichten voor België tegen 2030*. Opgevraagd op 1 mei, 2009, via <http://www.plan.be/admin/uploaded/200605091448072.PP095nl.pdf>

Hansen et al. (2005). *Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications* [elektronische versie]. *Science*, 308, 1431-1435.

Hansen J., Ruedy R., Sato M. & Lo K. (2006). *GISS Surface Temperature Analysis: 2005 Summation*. New York: NASA GISS.

Harvey, D. (2005). *A brief history of neoliberalism*. Opgevraagd op 7 maart, 2009, via <http://fds.oup.com/www.oup.co.uk/pdf/0-19-928326-5.pdf>

Harvey, F. (2009, 12 April). Carbon trading prices stabilise. *The Financial Times*. Opgevraagd op 16 april, 2009, via <http://www.ft.com/cms/s/0/ed93eff0-2782-11de-9b77-00144feabdc0.html>

Hoernaet (1999). *De energiebronnen en kernenergie*. Leuven: Acco

Hoogerwerf, A. (2008). *Overheidsbeleid: Een inleiding in de beleidswetenschap*. Deventer: Kluwer

ICEDD (2007). *BILAN ENERGETIQUE DE LA REGION WALLONNE 2006*. Opgevraagd op 17 augustus, 2009, via <http://energie.wallonie.be/fr/la-cogeneration.html?IDC=6222>

Industriële productie eurozone voor het eerst sinds augustus gestegen (2009, 14 juli). *De Morgen*. Opgevraagd op 19 juli, 2009, via Mediargus database

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Climate change 2007: Working Group I Fourth assessment report 'The Physical Science Basis'*.

Opgevraagd op 30 september, 2008, via

<http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Climate change 2007: Working Group II Fourth assessment report 'Impacts, Adaptation and Vulnerability'*.

Opgevraagd op 30 september, 2008, via

<http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Climate change 2007: Group III Fourth assessment report 'Mitigation of Climate Change'*.

Opgevraagd op 30 september, 2008, via  
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

International Energy Agency (2006). *Projected costs of generating electricity*.  
Opgevraagd op 12 mei, 2009, via  
[http://books.google.be/books?id=IBCJNmVWWMQC&dq=Projected+costs+of+generating+electricity+IEA&printsec=frontcover&source=bn&hl=nl&ei=JfclSRneH4LK-Aa40JSjBg&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=5](http://books.google.be/books?id=IBCJNmVWWMQC&dq=Projected+costs+of+generating+electricity+IEA&printsec=frontcover&source=bn&hl=nl&ei=JfclSRneH4LK-Aa40JSjBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=5)

International Energy Agency (2008). *World Energy Outlook 2008*. Opgevraagd op 8 mei, 2009, via  
[http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008\\_es\\_english.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_english.pdf)

International Energy Agency (2009). *Electricity/Heat in Belgium in 2006*.  
Opgevraagd op 2 mei, 2009, via  
[http://www.iea.org/Textbase/stats/electricitydata.asp?COUNTRY\\_CODE=BE](http://www.iea.org/Textbase/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=BE)

IMF ziet groot begrotingstekort tot 2014 (2009, 10 maart). *De Tijd*.  
Opgevraagd op 29 april, 2009, via Mediargus database

ITER Belgium (z.d.). *Kernfusie*. Opgevraagd op 14 mei, 2009, via  
<http://www.iterbelgium.be/nl/kernfusie>

Janssens, G. (2009). *De kredietwaardigheid van de Belgische Staat*.  
Opgevraagd op 29 april, 2009, via  
<http://polsslag.vkwmetena.be/index.php/opinies/146-hoe-kredietwaardig-blijft-de-staat>

Jacobson, C. (2000). *Kernenergie: Een stralende toekomst tegemoet?*  
Opgevraagd op 13 augustus, 2009, via  
[http://www.argusmilieu.be/NL/informeer\\_je/arguskenniscentrum/thema\\_s/kli](http://www.argusmilieu.be/NL/informeer_je/arguskenniscentrum/thema_s/kli)



maat\_en\_energie/kernenergie/kernenergie\_een\_stralende\_toekomst\_tegemoet.html#afval

Jones, T.P. (2004). *Is globale opwarming een 'massavernietigingswapen?'*. Opgevraagd op 14 maart, 2009, via <http://www.petertomjones.be/>

Kates, S. (1997). *On the True Meaning of Say's Law* [elektronische versie]. *Eastern Economic Journal*, 23, 191-202

Keynes, J.M. (1936). *The general theory of employment, interest and money*. Opgevraagd op 7 maart, 2009, via [http://books.google.be/books?id=dQD9o31F1N4C&dq=The+general+theory+of+employment,+interest+and+money&printsec=frontcover&source=bl&ots=l\\_kwHnII\\_C&sig=tKJt52uSX-zKb7T0KBwOp8eWmQI&hl=nl&ei=1MQkStmhMoXE-AbwoujXBg&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=3](http://books.google.be/books?id=dQD9o31F1N4C&dq=The+general+theory+of+employment,+interest+and+money&printsec=frontcover&source=bl&ots=l_kwHnII_C&sig=tKJt52uSX-zKb7T0KBwOp8eWmQI&hl=nl&ei=1MQkStmhMoXE-AbwoujXBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3)

Koninklijk Meteorologisch Instituut (2008). *Klimaat vanaf de 20<sup>e</sup> eeuw*. Opgevraagd op 10 december, 2008, via <http://www.meteo.be/meteo/view/nl/1078912-klimaat+vanaf+de+20e+eeuw.html>

Koninklijk Meteorologisch Instituut (2009). *Klimatologisch overzicht van 2008*. Opgevraagd op 21 maart, 2009, via <http://www.meteo.be/meteo/view/nl/1317239-Voorbije+jaren.html>

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut [KNMI] (2008). *Toelichting op het IPCC klimaatrapport*. Opgevraagd op 30 oktober, 2008, via [http://www.knmi.nl/kenniscentrum/ipcc\\_2007/](http://www.knmi.nl/kenniscentrum/ipcc_2007/).

Kennedy, D. & Hanson, B. (2006). *Ice and history* [elektronische versie]. *Science Magazine*, 311, 1673.

Melik, J. (2009). *Recession threatens carbon trading*. Opgevraagd op 29 april, 2009, via <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/7857771.stm>

Kernfusie.nl (z.d.). *Kernfusie, een zon op aarde*. Opgevraagd op 13 mei, 2009, via <http://www.kernfusie-energie.nl/watisker/watisker32.htm>

Kuik, O. (2007). *Maatschappelijke- en milieukosten van elektriciteitsvoorziening*. Opgevraagd op 19 juli, 2009, via [http://www.ivm.vu.nl/en/Images/report076B538103-DEBE-E049-0FDAA06A620D65C8\\_tcm53-87001.pdf](http://www.ivm.vu.nl/en/Images/report076B538103-DEBE-E049-0FDAA06A620D65C8_tcm53-87001.pdf)

Laes, E. (2006). *NUCLEAR ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT*. Opgevraagd op 15 augustus, 2009, via <http://www.cen.be/en/content/download/2206/21178/version/1/file/Nuclear+Energy+and+Sustainable+Development+-+Erik+Laes+2006.pdf>

Liberalisering energiemarkt grotendeels mislukt (14 december, 2008). *Express*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via <http://www.express.be/sectors/nl/energy/liberalisering-energiemarkt-grotendeels-mislukt/100774.htm>

Lijesen, M. & Zwart, G. (2005). *Op zoek naar een onzichtbaar vangnet*. Opgevraagd op 9 mei, 2009, via <http://www.cpb.nl/nl/pub/cpbreeksen/document/89/doc89.pdf>

Milieuloket (z.d.). *Broeikaseffect*. Opgevraagd op 18 december, 2008, via <http://www.milieuloket.nl/>

National Aeronautics and Space Administration [NASA] (2007). *World Book at*

*NASA : The Sun*. Opgevraagd op 19 december, 2008, via <http://www.nasa.gov/>

National Oceanic and Atmospheric Administration (2009). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide - Global*. Opgevraagd op 11 februari, 2009, via <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

National Research Council (2006). *Surface Temperature Reconstructions For the Last 2,000 Years*. Washington, DC: National Academy Press.

Nationale Bank van België (2009). *Tekort op handelsbalans in 2008*.

Opgevraagd op 19 mei, 2009, via

<http://www.nbb.be/DOC/DQ/N/DQ3/HISTO/ENP0902.PDF>

Nationale Klimaatcommissie (2007). *Broeikasgasemissies in België*.

Opgevraagd op 3 oktober, 2008, via

[http://www.climatechange.be/IMG/pdf/Broeikasgasemissies\\_2007.pdf](http://www.climatechange.be/IMG/pdf/Broeikasgasemissies_2007.pdf)

Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (2009).

*Composition of the atmosphere*. Opgevraagd op 11 januari, 2009, via

<http://www.ndacc.org/>

Neven, E (2008). *Kernenergie: Analyse van de argumenten pro-kernuitstap*.

Opgevraagd op 9 augustus, 2009, via

<http://uhdspace.uhasselt.be/dspace/bitstream/1942/8685/1/04220512007634c.pdf>

New Carbon Finance (2009). *Recession lowers cost of EU Emissions Trading Scheme by a half*. Opgevraagd op 1 mei, 2009, via

[http://www.newcarbonfinance.com/download.php?n=NCF\\_PressRelease\\_2009\\_20March\\_Costof\\_EU\\_ETS.pdf&f=fileName&t=NCF\\_downloads](http://www.newcarbonfinance.com/download.php?n=NCF_PressRelease_2009_20March_Costof_EU_ETS.pdf&f=fileName&t=NCF_downloads)

NIRAS (z.d.). *Radioactief afval*. Opgevraagd op 19 juli, 2009, via

<http://www.nirond.be/>

Nucleair Forum (z.d.). *Thema Kernafval*. Opgevraagd op 1 augustus, 2009, via

<http://www.nuclearforum.be/nl/themas/afval/>

OECD (2005). *Projected costs of generating electricity*. Opgevraagd op 12 juli, 2009, via <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/ElecCost.pdf>

Oil-price.net (2009). *Oil dashboard*. Opgevraagd op 12 mei, 2009, via <http://www.oil-price.net/>

Olie eindigt jaar meer dan 100 dollar onder record (31 december, 2008). *Het nieuwsblad*. Opgevraagd op 12 mei, 2009, via Mediargus database

Paltsev, S.V. (2000). *The Kyoto Protocol: Hot air for Russia*. Opgevraagd op 15 maart, 2009, via <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/1743.pdf>

Pindyck, R.S. & Rubinfeld, D.L. (2005). *Microeconomics*. Pearson Prentice Hall: New Jersey.

Point Carbon (2009). *European GHG emissions 2008*. Opgevraagd op 12 april, 2009, via <http://www.pointcarbon.com/news/1.1085424>

President condemns climate change treaty (2005, 30 Juni). *The associated press*. Opgevraagd op 13 maart, 2009, via <http://www.msnbc.msn.com/id/8422343/>

PV Trac (2005). *A vision for photovoltaic energy*. Opgevraagd op 5 mei, 2009, via [http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn\\_rt/nn\\_rt\\_pv/article\\_1933\\_en.htm](http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_pv/article_1933_en.htm)

Roques, F.A., Nuttal, W.J., Newberry, D.M. & De Neufville, R. (2006). *Nuclear power: A hedge against uncertain gas and carbon prices*. Opgevraagd op 12 augustus, 2009, via <http://www.dspace.cam.ac.uk/bitstream/1810/131607/1/eprg0509.pdf>

Scheepers et al. (2007). *Fact Finding Kernenergie*. Opgevraagd op 13 augustus, 2009, via <http://www.tegenstroom.nl/docs/ser/050308/pdf/factfinding.pdf>

Scotese, C.R. (2008). *The paleomap project*. Opgevraagd op 3 november, 2008, via <http://www.scotese.com/climate.htm>

Sereno, M. (2006). *Kyoto in het federale België*. Opgevraagd op 2 oktober, 2008, via <http://www.biw.kuleuven.be/klimaatpark/>

Soens, J. (2005). *IMPACT OF WIND ENERGY IN A FUTURE POWER GRID*. Opgevraagd op 16 augustus, 2009, via [https://repository.libis.kuleuven.ac.be/dspace/bitstream/1979/161/2/PhD\\_jsoens.pdf](https://repository.libis.kuleuven.ac.be/dspace/bitstream/1979/161/2/PhD_jsoens.pdf)

Steenkoolprijs op record door productieverstoringen (28 januari, 2008). *De Tijd*. Opgevraagd op 12 mei, 2009, via [http://www.tijd.be/artikel/Steenkoolprijs\\_op\\_record\\_door\\_productieverstoringen.6143153](http://www.tijd.be/artikel/Steenkoolprijs_op_record_door_productieverstoringen.6143153)

Stern, T. (2006). *Stern review: The economics of climate change*. Opgevraagd op 15 februari, 2009, via [http://www.hm-treasury.gov.uk/d/CLOSED\\_SHORT\\_executive\\_summary.pdf](http://www.hm-treasury.gov.uk/d/CLOSED_SHORT_executive_summary.pdf)

Tekort van 10,3 miljard op Belgische handelsbalans in 2008 (16 maart, 2009). *Het laatste nieuws*. Opgevraagd op 19 mei, 2009, via Mediargus database

Tol, R.S.J. (2005) *The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties* [elektronische versie]. *Energy policy*, 33, 2064-2074.

Torfs R., Schrooten L. & De Nocker L. (2005) *Internalisering van externe kosten voor de productie en de verdeling van elektriciteit in Vlaanderen.*

Opgevraagd op 12 april, 2009, via

[http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/01\\_SECTOREN/01\\_04/ENER\\_O&O\\_04.PDF](http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/01_SECTOREN/01_04/ENER_O&O_04.PDF)

UNEP (2005). *Vital Climate Change update.* Opgevraagd op 17 december, 2008, via <http://www.grida.no/>

UNEP (2008). *Global Green New Deal.* Opgevraagd op 28 april, 2009, via <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=548&ArticleID=5957&l=en>

UNFCCC (2008). *GHG data from UNFCCC.* Opgevraagd op 24 maart, 2009, via [http://unfccc.int/ghg\\_data/ghg\\_data\\_unfccc/items/4146.php](http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/items/4146.php)

UXC (2009). *Nuclear Fuel Price Indicators.* Opgevraagd op 12 augustus, 2009, via [http://www.uxc.com/review/uxc\\_Prices.aspx](http://www.uxc.com/review/uxc_Prices.aspx)

Van Dorland, R. & Jansen, B. (2006). *De staat van het klimaat 2006.* De Bilt/Wageningen: PCCC.

Van Velthoven, B.C.J. & Van Wijck, P.W. (2007). *Recht en efficiëntie.* Deventer: Kluwer

Van Dril, A.W.N. & Verdonck, M. (2008). *Kosten van elektriciteitsopwekking.* Opgevraagd op 17 juli, 2009, via <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/o08024.pdf>

Van Humbeek, P. & Bollen, A. (2005). *Klimaatverandering en klimaatbeleid.* Opgevraagd op 17 november, 2008, via <http://books.google.be/books?id=WtzEjFx3VlgC&pg=PA206&lpg=PA206&dq=h+ot+air+emissiehandel&source=bl&ots=o->

B1ArlWRD&sig=7wzmJJvZ\_qygjiYxhxlAuNSRNv0&hl=nl&ei=wbznSYjLJILU-Aayh7XIBQ&sa=X&oi=book\_result&ct=result&resnum=2#PPA102,M1

Van Rompuy koppelt kernenergie aan begroting (5 juli, 2009). *De Tijd*.  
Opgevraagd op 11 augustus, 2009, via  
[http://www.tijd.be/nieuws/binnenland/Van\\_Rompuy\\_koppelt\\_kernenergie\\_aan\\_begroting.8205017-438.art](http://www.tijd.be/nieuws/binnenland/Van_Rompuy_koppelt_kernenergie_aan_begroting.8205017-438.art)

Van Ypersele, J.P. & Marbaix, P. (2004). *Impact van de klimaatverandering in België*. Opgevraagd op 9 december, 2008, via  
<http://www.astr.ucl.ac.be/users/marbaix/impacts/docs/ImpactsGPvF-MR-NL.pdf>

Vanmarcke, H. et al. (2008). *Ioniserende straling*. Opgevraagd op 15 augustus, 2009, via  
[http://www.milieurapport.be/Upload/main/miradata/MIRA-T/02\\_themas/02\\_06/Ioniserende\\_MIRA-T2007.pdf](http://www.milieurapport.be/Upload/main/miradata/MIRA-T/02_themas/02_06/Ioniserende_MIRA-T2007.pdf)

Velders, G.J.M., Fahey, D.W., Daniel, J.S., McFarland, M. & Andersen, S.O. *The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing*. Opgevraagd op 9 juli, 2009, via  
<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0902817106>

Verbruik elektriciteit keldert door crisis (4 augustus, 2009). *De standaard*.  
Opgevraagd via  
<http://webnieuws1.standaard.be/Artikel/Detail.aspx?artikelId=DC2DBTND>

Verenigde Naties (1992). *United nations framework convention on climate change*. Opgevraagd op 21 september, 2008, via  
[http://unfccc.int/essential\\_background/convention/background/items/2853.php](http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/2853.php)  
p

Verenigde Naties (1997). *Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention on Climate Change*. Opgevraagd op 21 september, 2008, via <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

Verenigde Naties (2009). *The Mechanisms under the Kyoto Protocol*. Opgevraagd op 16 maart, 2009, via [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/mechanisms/items/1673.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/items/1673.php)

Vlaams Energieagentschap (z.d.). *Warmtekrachtkoppeling*. Opgevraagd op 14 april, 2009, via <http://www.energiesparen.be/milieuvriendelijke/wkk>

Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek [VITO] (2003). *Hoe het Kyoto objectief halen in België/Vlaanderen*. Opgevraagd op 18 maart, 2009, via [http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/economie\\_pme1\\_2.ppt](http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/economie_pme1_2.ppt)

Vlaamse Milieu Maatschappij [VMM] (2006). *Lozingen in de lucht 2006*. Opgevraagd op 20 Januari, 2009, via <http://www.milieurapport.be>

Vlaamse Milieu Maatschappij [VMM] (2007). *MIRA Vlaanderen achtergronddocument sector energie*. Opgevraagd op 1 mei, 2009, via [http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/01\\_SECTOREN/01\\_04/AG\\_ENERGIE.PDF](http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/01_SECTOREN/01_04/AG_ENERGIE.PDF)

Vlaamse Milieu Maatschappij [VMM] (2008). *MIRA Vlaanderen achtergronddocument thema klimaatverandering*. Opgevraagd op 1 oktober, 2008, via <http://www.milieurapport.be>

Vlaamse Milieu Maatschappij [VMM] (z.d.). *Thema broeikaseffect*. Opgevraagd op 18 Februari, 2008, via [http://www.vmm.be/lucht/bronnen-van-luchtverontreiniging/themas/thema\\_broeikaseffect.html](http://www.vmm.be/lucht/bronnen-van-luchtverontreiniging/themas/thema_broeikaseffect.html)



VOKA (2006). *Elektriciteit nu en in de toekomst*. Opgevraagd op 30 april, 2009, via

<http://www.voka.be/startpagina/media/publicaties/Documents/Voka-studie04.pdf>

VROM (2008). *Randvoorwaarden voor nieuwe kerncentrales*. Opgevraagd op 13 mei, 2009, via

<http://www.vrom.nl/get.asp?file=docs/kamerstukken/Thu28Sep20061849120200/2006296794bijlageB.pdf>

Watkiss et al. (2005) *The social cost of carbon, review, AEAT*. Opgevraagd op 13 februari, 2009, via

<http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/research/carboncost/pdf/aeat-scc-report.pdf>

World Meteorological Organisation (2008). *WMO Greenhouse Gas Bulletin*.

Opgevraagd op 12 februari, 2009, via <http://www.wmo.int/>

World Nuclear Association (2008). *Supply of Uranium*. Opgevraagd op 5 mei, 2009, via <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>

World Nuclear Association (2009). *The economics of Nuclear Power*.

Opgevraagd op 9 mei, 2009, via <http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>

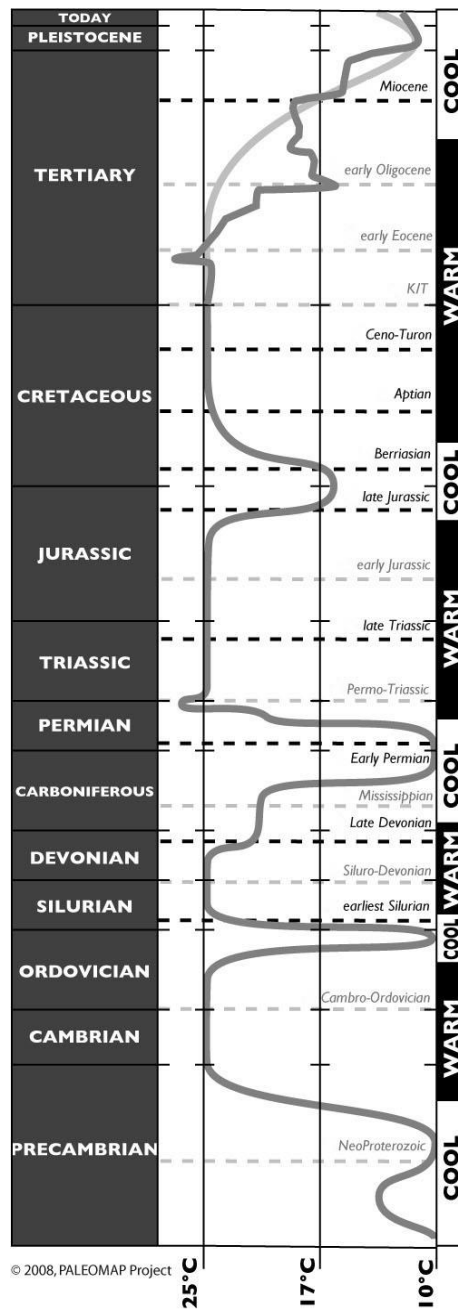
World Nuclear Association (2009). *Advanced nuclear power*. Opgevraagd op 14 mei, 2009, via <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>

World will not meet 2C warming target, climate change experts agree (2009, 14 april). *The Guardian*. Opgevraagd op 16 april, 2009, via

<http://www.guardian.co.uk/>

## Bijlagen

Bijlage 1 : Overzicht klimaatgeschiedenis vanaf het ontstaan van de aarde tot het heden



Bron: Scotese, C.R. (2008). *The paleomap project*.

Bijlage 2 : 'Global warming potential'-waarden van de verschillende broeikasgassen

broeikasgas		verblijftijd in atmosfeer (jaar)	direct global warming potential (GWP-100 jaar)
CO <sub>2</sub>		5 à 200	1
CH <sub>4</sub> *		12	25
N <sub>2</sub> O		114	298
PFK's	CF <sub>4</sub>	50 000	7 390
	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	10 000	12 200
	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	2 600	8 830
	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	2 600	8 860
	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	3 200	10 300
	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	4 100	9 160
	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	3 200	9 300
	C <sub>10</sub> F <sub>18</sub>	> 1 000	> 7 500
SF <sub>6</sub>		3 200	22 800
HFK's	HFK-23 of CHF <sub>3</sub>	270	14 800
	HFK-32 of CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	4,9	675
	HFK-125 of CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	29	3 500
	HFK-134a of CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	14	1 430
	HFK-143a of CF <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	52	4 470
	HFK-152a of CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	1,4	124
	HFK-227ea of CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	34,2	3 220
	HFK-236fa of CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	240	9 810
	HFK-245fa of CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7,6	1 030
	HFK-365mfc of CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	8,6	794
HFK-43-10mee of CF <sub>3</sub> CHFCH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	15,9	1 640	

\* De GWP van CH<sub>4</sub> omvat eveneens de indirecte bijdragen van de stratosferische H<sub>2</sub>O en O<sub>3</sub> productie. Afhankelijk van het gebruik van bepaalde PFK's en HFK's, verschilt de gemiddelde GWP van de PFK-mix en HFK-mix van land tot land.

Bron: VMM (2008). *MIRA Vlaanderen achtergronddocument thema klimaatverandering*. Gebaseerd op IPCC (2007).

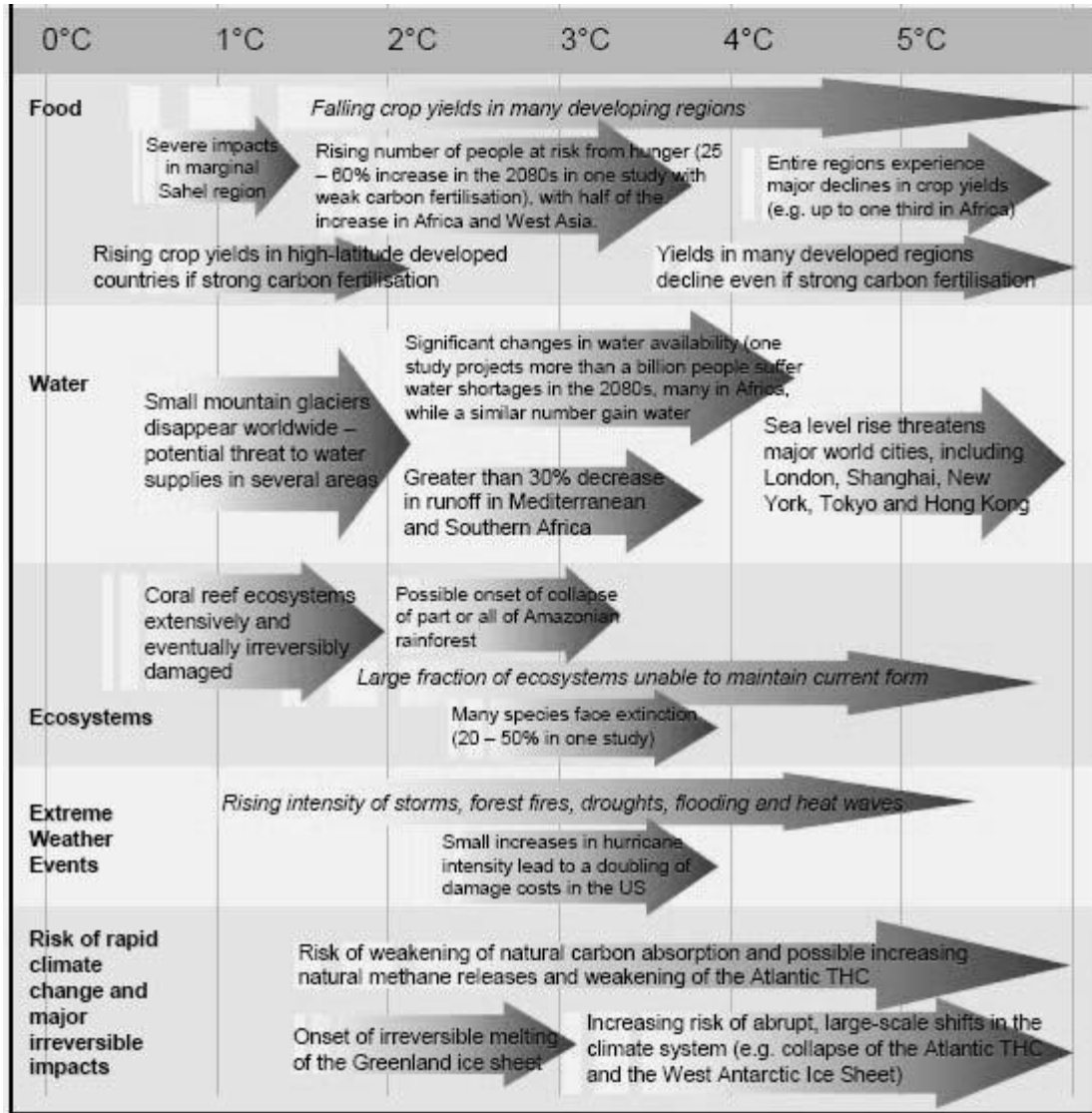
### Bijlage 3 : Mogelijke toekomstige gevolgen in functie van de toenemende temperatuur

Temperatuurstijging °C >1990					
0	1	2	3	4	5
water	toename irrigatievraag  toename waterbeschikbaarheid in natte tropen en op hogere breedten afname waterbeschikbaarheid en droogte in gebieden dicht bij de evenaar  honderden miljoenen mensen blootgesteld aan een toegenomen waterstress				ca. 20% van de wereldbevolking heeft last van overstromingen
ecosystemen	toename uitsterven amfibieën  toename koraalverbleking  toename verandering in soorten-samenstelling van leefgemeenschappen  toename bosbranden	20-30% van de soorten loopt groot gevaar om uit te sterven  meeste koraal verbleekt  15% van oppervlak ondergaat veranderingen	wijdverbreid afsterven koraal  terrestrische ecosystemen worden een netto koolstofbron		verdwijning van soorten  40% van het oppervlak ondergaat veranderingen
voedsel	gewasopbrengst neemt af op lagere breedten  gewasopbrengst neemt toe op hogere breedten		adaptief vermogen van veel gewassen wordt op lagere breedten overschreden		
kusten	toename schade door overstromingen en stormen	miljoenen meer mensen lopen risico door overstromingen	30% verlies aan kust en wetlands		
gezondheid	verandering in verspreiding van ziekten en plagen en allergene pollen  toename gevolgen van ondervoeding, diarree, hart- en vaatziekten en infectieziekten  toename ziekte en sterfte door hittegolven, overstromingen en droogte			aanzienlijke belasting op gezondheidsdiensten	
stijging zeespiegel	6-9 cm	15-24 cm	29-45 cm		
Temperatuurstijging °C >1861-1890					
1	2	3	4	5	

\*Temperatuurstijgingen zijn relatief tov 1990.

Bron: Van Dorland, R. & Jansen, B. (2006). *De staat van het klimaat 2006*.

Bijlage 4 : Voorbeelden van de voornaamste effecten van klimaatverandering in functie van de temperatuurstijging



Bron: Stern (2006). *The Economics of Climate Change*.

## Bijlage 5: Annex-I landen

Australia	Latvia
Austria	Liechtenstein
Belarus	Lithuania
Belgium	Luxembourg
Bulgaria	Monaco
Canada	Netherlands
Croatia	New Zealand
Czech Republic	Norway
Denmark	Poland
Estonia	Portugal
European Community	Romania
Finland	Russian Federation
France	Slovakia
Germany	Slovenia
Greece	Spain
Hungary	Sweden
Iceland	Switzerland
Ireland	Turkey
Italy	Ukraine
Japan	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
	United States of America

Bijlage 6: CO2-reductiedoelstellingen van de Europese lidstaten na het Burden Sharing Agreement

<b>Burden-sharing target of the EU</b>			
	%Target 2008-2012		%Target 2008-2012
Zwitserland	-13	Italië	-6.5
België	-7.5	Luxemburg	-28
Denemarken	-21	Nederland	-6
Finland	0	Portugal	27
Frankrijk	0	Spanje	15
Duitsland	-21	Zweden	4
Griekenland	25	Verenigd Koninkrijk	-12.5
Ierland	13	EU	-8

Bron: Climate action network (z.d.)

## Bijlage 7 : Trends en projecties broeikasgassen in a) De EU-15 en b) België

## a) Trend en projectie uitstoot broeikasgassen voor de EU-15

<b>Current and projected progress towards 2008–2012 Kyoto targets <sup>(4)</sup></b>	<b>Absolute (Mt CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Relative to BY emissions</b>
Base-year (BY) emissions	4 265.5	
GHG target under the Kyoto Protocol	3 924.3	– 8.0 %
2006 emissions	4 151.1	– 2.7 %
Average GHG during the last 5-year period (2002–2006)	4 180.0	– 2.0 %
Projected 2010 emissions (existing measures in place)	4 110.2	– 3.6 %
<i>Projected effect of the (planned) additional measures</i>	<i>– 140.9</i>	<i>– 3.3 %</i>
<i>Projected effect of carbon sink activities</i>	<i>– 57.5</i>	<i>– 1.35 %</i>
<i>Projected use of Kyoto mechanisms</i>	<i>– 126.5</i>	<i>– 3.0 %</i>
Projected 2010 emissions, taking into account existing and additional measures, carbon sinks and Kyoto mechanisms	3 785.3	– 11.3 %

## a) Trend en projectie uitstoot broeikasgassen voor België

<b>Current and projected progress towards 2008–2012 Kyoto targets <sup>(4)</sup></b>	<b>Absolute (Mt CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Relative to BY emissions</b>	<b>EU-15 average</b>
Base-year (BY) emissions	145.7		
GHG target under the Kyoto Protocol	134.8	– 7.5 %	– 8.0 %
2006 emissions	137.0	– 6.0 %	– 2.7 %
Average GHG during the last 5-year period (2002–2006)	143.0	– 1.8 %	– 2.0 %
Projected 2010 emissions (existing measures in place)	140.3	– 3.7 %	– 3.6 %
<i>Projected effect of the (planned) additional measures</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0 %</i>	<i>– 3.3 %</i>
<i>Projected effect of carbon sink activities</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0 %</i>	<i>– 1.3 %</i>
<i>Projected use of Kyoto mechanisms</i>	<i>– 7.0</i>	<i>– 4.8 %</i>	<i>– 3.0 %</i>
Projected 2010 emissions, taking into account existing and additional measures, carbon sinks and Kyoto mechanisms	133.3	– 8.5 %	– 11.3 %

Bron: EEA (2008). *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2008*.