

Woord vooraf

Het schrijven van deze eindverhandeling betekent het einde van mijn opleiding Handelsingenieur in de Technologie aan het Limburgs Universitair Centrum, vanaf volgend jaar Universiteit Hasselt.

Als onderwerp heb ik gekozen voor de kernuitstap en Kyoto, enerzijds omdat kernenergie mij enorm boeit en anderzijds omdat het Kyoto-Protocol en de milieuproblematiek vandaag een belangrijk onderdeel van de actualiteit vormt.

Deze thesis heb ik zelf geschreven, maar hij zou nooit tot stand zijn gekomen zonder de hulp van een aantal mensen. Daarom zou ik iedereen willen bedanken die mij geholpen heeft om deze thesis te maken tot wat ze nu is.

Vooreerst wil ik Prof. Dr. Ir. Frans Lemeire bedanken voor het boeiende onderwerp, zijn interesse die hij voortdurend toonde en zijn deskundige uitleg.

Mijn vrienden, die van mijn studiejaren de beste studententijd hebben gemaakt. De ontspannende tijd die ze me hebben bezorgd in Diepenbeek heeft er mede voor gezorgd dat ik dit jaar afstudeer.

Mijn vader, zus en broer, die me onvoorwaardelijk hebben gesteund doorheen mijn studies. Ze waren er steeds bij de moeilijke momenten en zonder hun ondersteuning was ik nooit zover geraakt.

Mijn moeder, die me altijd de kans heeft gegeven om te doen wat ik wilde doen en altijd in mij geloofd heeft.

Samenvatting

Op 31 mei 2002 heeft België het Kyoto-Protocol ondertekend en op 1 januari 2005 is het in werking getreden. Door ratificering van het Protocol verbindt België zich ertoe de uitstoot van broeikasgassen die bijdragen tot de opwarming van de aarde te reduceren. Tegen 2010 moet de uitstoot van broeikasgassen met 7,5% verminderd zijn. Om deze doelstelling te halen zijn er verschillende plannen op federaal en gewestelijk niveau uitgewerkt. Verder is de federale overheid van plan emissierechten aan te kopen in Rusland.

Energiegebruik brengt niet alleen de uitstoot van broeikasgassen met zich mee, maar ook schadelijke gevolgen voor de menselijke gezondheid, gebouwen, teelten en bossen. De kosten die hiermee vervonden zijn worden externe kosten genoemd en worden niet opgenomen in het prijzensysteem. Om meer te weten te komen over deze externe kosten heeft Europa een project opgericht, het Externe Kosten Energie Project, dat 1991 van start is gegaan.

Kernenergie levert ongeveer 56% van de elektriciteit in België. Huidige kerncentrales werken op basis van kernsplitsing, waarbij uranium als brandstof wordt gebruikt. Dit metaal wordt over heel de wereld gevonden, en de reserves zijn dan ook voldoende om de komende duizenden jaren als grondstof voor kernsplitsing te dienen. Door kerncentrales als elektriciteitsproducenten te gebruiken kan België zijn CO₂-uitstoot verbonden met de elektriciteitsproductie in bedwang houden en zelfs verminderen. Naast kernsplitsing wordt er momenteel onderzoek gedaan naar kernfusie, waarbij waterstof als brandstof gebruikt wordt. Verwacht wordt dat tegen 2050 het kernfusieproces klaar is voor commercieel gebruik, en dan zou kernenergie de wereld voor miljarden jaren kunnen voorzien in energie. Dit zou de uitstoot van CO₂ enorm verminderen.

Naast kernenergie wordt er ook intensief gebruik gemaakt van aardolie, aardgas en steenkool als niet-hernieuwbare energiebron. Deze brandstoffen hebben zich miljoenen

jaren geleden gevormd, en met het huidige gebruik ervan zullen ze nog slechts een aantal tientallen jaren kunnen voorzien in onze energiebehoefte. Het gebruik van deze brandstoffen heeft verder een hoge uitstoot van CO₂ tot gevolg, en ze zijn daardoor een belangrijke oorzaak in de opwarming van de aarde.

In het licht van broeikas effecten wordt er de laatste jaren veel gebruik en reclame gemaakt van alternatieve energiebronnen: windenergie, zonne-energie, waterkracht, geothermische energie, biomassa. Deze energiebronnen zijn milieuvriendelijker dan de niet-hernieuwbare bronnen doordat ze veel minder CO₂ en andere schadelijke gassen uitstoten. Het nadeel is echter dat ze een veel lager rendement hebben en het gebruik ervan is vaak afhankelijk van het landschap. Ze zullen waarschijnlijk nooit de energie kunnen leveren die nu geleverd wordt door kernenergie en fossiele brandstoffen. Toch is het belangrijk dat ook deze energievormen gepromoot worden. Elektriciteitsproducenten zijn verplicht een gedeelte van de elektriciteit die ze produceren uit hernieuwbare energie te halen. Op deze wijze kan de CO₂-uitstoot toch voor een gedeelte vermeden worden.

Bij het energiegebruik moet er niet alleen gekeken worden naar de broeikasgassen die ze uitstoten. Met het oog op de volgende generaties moet er onderzoek worden gedaan naar de technologieën die gebruikt worden om alternatieve energie op te wekken. Er mogen dan nog voor een tiental jaren niet-hernieuwbare energiebronnen aanwezig zijn, zodat de huidige generatie rustig het dagelijks energieverbruik kan aanhouden, niet enkel het "nu" telt. We moeten er vandaag al voor zorgen dat de komende generaties voldoende energie beschikbaar zullen hebben.

In België is de kernuitstap en het naleven van het Kyoto-protocol niet verenigbaar. Het Belgische landschap is niet geschikt om optimaal en in grote hoeveelheden gebruik te maken van alternatieve energiebronnen. De niet-hernieuwbare energiebronnen aan de andere kant hebben een te grote uitstoot van broeikasgassen zodat het verminderen van het niveau van uitstoot niet haalbaar is. De enige mogelijkheid om de Kyoto-norm te halen en geen energietekorten te creëren is de nucleaire productie te behouden.

Inhoudsopgave

Woord vooraf

Samenvatting

Hoofdstuk 1: Inleiding en methodologische aspecten	1
1.1 Inleiding	1
1.2 Methodologische aspecten	4
1.2.1 Probleemstelling	4
1.2.2 Onderzoeksvragen	6
1.2.2.1 Centrale onderzoeksvraag	6
1.2.2.2 Deelvragen	6
1.2.3 Onderzoeksstrategieën	7
Hoofdstuk 2: Het Verdrag van Kyoto	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Het Kyoto Protocol	9
2.3 Kyoto en België	10
2.4 Kyoto na 2012	12
Hoofdstuk 3: Externe kosten	13
Hoofdstuk 4: Energievoorziening in België	17
4.1 De klassieke thermische centrale	19
4.2 STEG-centrale	19
4.3 Warmtekrachtkoppeling (WKK)	20
4.4 Turbojets	22
Hoofdstuk 5: Kernenergie	23
5.1 Kernsplitsing	23
5.1.1 Werking	23
5.1.2 Grondstoffen	25
5.1.2.1 Uranium	25

5.1.1.2	Plutonium.....	26
5.1.1.3.	Thorium	26
5.1.2	Voordelen	27
5.1.3	Nadelen	30
5.2	Kernfusie.....	32
5.2.1	Werking	32
5.2.2	Grondstoffen	34
5.2.2.1	Deuterium.....	34
5.2.2.2	Tritium.....	34
5.2.3	Voordelen	35
5.2.4	ITER.....	36
Hoofdstuk 6:	Energiebronnen ter vervanging van kernenergie	38
6.1	Niet-hernieuwbare energiebronnen.....	38
6.1.1	Aardolie.....	38
6.1.2	Aardgas	41
6.1.3	Steenkool.....	45
6.1.4	Fossiele brandstoffen en kernenergie: een overzicht	47
6.2	Hernieuwbare energie	49
6.2.1	Zonne-energie	49
6.2.2	Windenergie	53
6.2.3	Waterkracht.....	55
6.2.4	Biomassa	58
6.2.5	Geothermische energie	60
6.2.6	Groenestroomcertificaten.....	61
Hoofdstuk 7:	Toekomstvisie	64
Hoofdstuk 8:	Overzicht van kernenergie in Europa	66
Hoofdstuk 9:	Algemeen besluit	70
Vragen voor verder onderzoek		74

Lijst van de geraadpleegde werken	75
Lijst van de in de tekst opgenomen figuren	79
Lijst van de in de tekst opgenomen tabellen	80
Bijlagen	81

Hoofdstuk 1: Inleiding en methodologische aspecten

1.1 Inleiding

Energie is een essentieel onderdeel in het leven van planten, dieren en mensen. Het heeft de kosmos en de natuur vorm gegeven, en het is met die energie dat mensen hebben gewerkt aan de maatschappij waarin we vandaag leven. Ons welzijn, ons comfort en onze mobiliteit worden in sterke mate positief beïnvloed door energie, maar hier is wel een prijs aan verbonden: energieverbruik heeft een grote invloed op het milieu, het leven van de medemens en van toekomstige generaties.

Energie is in allerlei vormen beschikbaar voor de mens. Het gebruik ervan vereist dus een aantal keuzen die we moeten maken, en de beslissingen die we hieromtrent nemen heeft weerslag op het milieu en op de toekomst van de mens. Er zijn eindige energiebronnen, die afkomstig zijn van voorraden in de aardbodem en die miljoenen jaren geleden gevormd zijn uit organische resten. Daarnaast zijn er hernieuwbare energiebronnen, zoals wind -en waterkracht, zonne-energie, biomassa, geothermische energie.

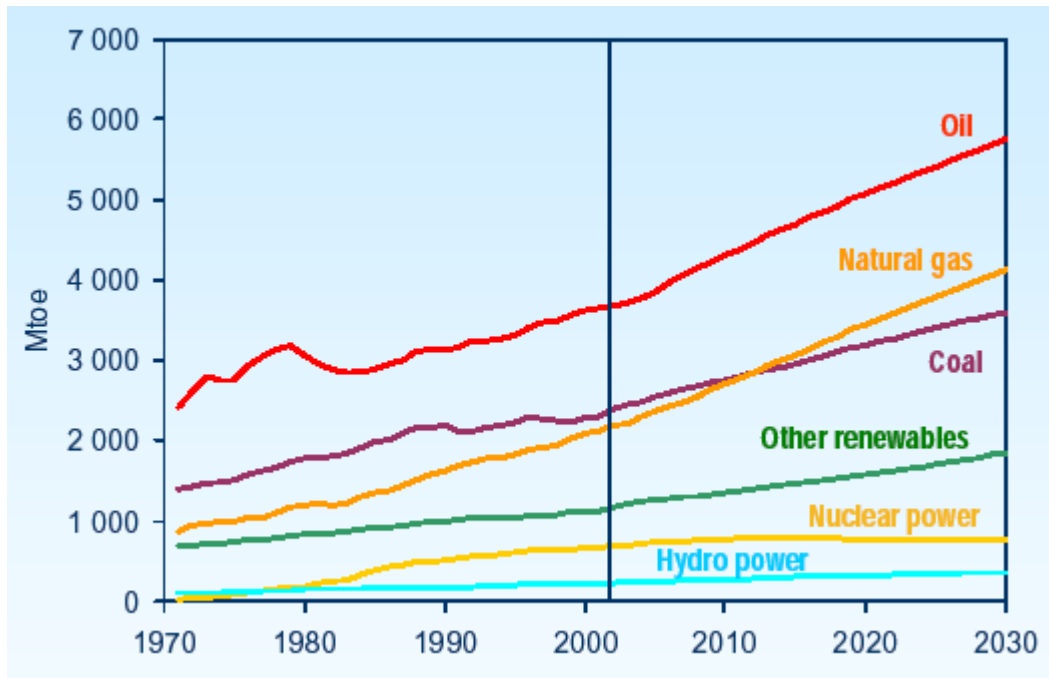
De mens heeft altijd al energie gebruikt, maar het is pas sinds twee eeuwen, vanaf de Industriële Revolutie, dat er qua energiegebruik veel veranderd is. Dit is gekomen door een aantal belangrijke uitvindingen: de stoommachine, de verbrandingsmotor en elektriciteit. De Westeuropeaan is sindsdien veel meer afgesteld op automatisering en zijn levenswijze is er enorm op verbeterd. Op het einde van de 19^{de} eeuw was steenkool de belangrijkste energiebron en aardolie en aardgas werden bijna niet gebruikt. Na Wereld Oorlog Twee vond er een tweede industriële expansie plaats die gedreven werd door olie en aardgas. Ten tijde van de eerste oliecrisis in 1973 waren olie en aardgas geëvolueerd tot de belangrijkste energiebronnen (zie figuur 1). Ondertussen waren er twee nieuwe producttypes op de markt gekomen: huishoudelektra en de individuele auto. Het energieverbruik begon dan ook enorm

te stijgen, en door de gestegen olie- en aardgasprijs (door de oliecrisis) was er een nieuwe soort energie nodig om dit energieverbruik te kunnen voorzien tegen een betaalbare prijs.

Deze nieuwe energievorm heeft zijn intrede gedaan tijdens WO 2, toen de Duitsers Otto Hahn en Fritz Strassmann erin slaagden om energie door middel van kernsplitsing op te wekken. De eerste commerciële kerncentrales werden reeds in de jaren 50 gebouwd. Vanaf deze periode is de vraag naar kernenergie traag gestegen. Het is pas in de jaren '80 dat er een sterke stijging plaatsvindt die tot midden jaren '90 heeft geduurd.

Twee ongevallen die het smelten van de reactor tot gevolg hadden, hebben de kernenergiesector in de jaren 80 grondig doorheen geschud. Het eerste ongeval vond plaats op 28 maart 1979 in de kerncentrale Three-Mile-Island (TMI) in de Verenigde Staten, het tweede op 26 april 1986 in de kerncentrale van Tsjernobyl in de voormalig Sovjet-Unie. Bij het ongeval in TMI hielden het reactorvat en het veiligheidsomhulsel stand, waardoor de stralingsbelasting voor de omliggende bevolking en het personeel van de centrale beperkt bleef. Bij het ongeval met de kernreactor in Tsjernobyl kwam er echter wel een aanzienlijke hoeveelheid radioactieve stoffen vrij met enorme gevolgen voor werknemers, brandweerlieden en omwonenden (VIWTA 2005). Deze ongevallen liggen mede aan de basis van de stagnering van kernenergie vanaf eind jaren 80. Vanaf 2000 blijft het aandeel van kernenergie in het totale energiegebruik ongeveer constant.

Figuur 1: Evolutie wereldenergiegebruik



Bron: IEA 2003

Op wereldvlak wordt jaarlijks tot 8 miljard toe energie verbruikt, waarvan 87% fossiele brandstoffen, 6% kernenergie en 7% hydraulische en hernieuwbare energiebronnen. Het elektriciteitsaandeel in het wereldenergiegebruik bedraagt 36% en verdeelt zich als volgt: 10% aardolie, 16% aardgas, 38% kolen, 17% kernenergie en 19% hydraulische en hernieuwbare energiebronnen (Hoenraet, 1999). Ieder jaar stijgt het wereld primair energieverbruik, en de komende jaren gaat deze stijging eens zo hoog zijn door de sterk groeiende economie in China en Indië. De reserves van fossiele brandstoffen, vandaag de belangrijkste energiebron, zijn echter beperkt, en verwacht wordt dat we nog ongeveer 100 jaar verder kunnen met deze reserves. Onderzoek naar nieuwe technologieën, zoals kernfusie, is belangrijk, evenals het verder ontwikkelen van de bestaande alternatieve energiebronnen.

Ook in België stijgt ieder jaar het energieverbruik. De overheid probeert de bevolking duidelijk te maken dat ook wij niet onbeperkt fossiele brandstoffen kunnen gebruiken door REG (Rationeel EnergieGebruik) en groene stroom te promoten. Door het Kyoto-Protocol te

tekenen en de Wet op de Kernuitstap goed te keuren staan we echter aan het begin van een grote uitdaging. Kernenergie verzorgt momenteel ongeveer 60% van de totale elektriciteitsproductie, een aandeel dat we de komende jaren gaan moeten vervangen door fossiele brandstoffen die beperkt aanwezig zijn en bovendien enorme hoeveelheden schadelijk broeikasgassen uitstoten, en alternatieve energie, dat enorme investeringen vereist en waarvoor het Belgische landschap niet voldoende geschikt is.

1.2 Methodologische aspecten

In dit deel zullen de methodologische aspecten van het onderzoek verder worden uitgediept. De probleemstelling zal eerst worden weergegeven. Daarna zullen we een centrale onderzoeksvraag opstellen en hieruit enkele deelvragen afleiden. Vervolgens verduidelijken we hoe het onderzoek juist gedaan zal worden, welke strategieën we zullen volgen.

1.2.1 Probleemstelling

De Belgische federale regering heeft in haar regeerakkoord van juli 1999 beslist om op termijn de elektriciteitsproductie bekomen door kernenergie geleidelijk af te bouwen. Op 1 maart 2002 is de regering dan ook tot een akkoord gekomen om de Belgische kerncentrales na 40 jaar uitbating buiten werking te stellen. Dit wetsontwerp werd op 16 januari 2002 goedgekeurd door de Senaat, eerder was het al door de Kamer aanvaard.

Concreet houdt dit ontwerp in dat de oudste (industriële) Belgische kerncentrale in 2015 zijn deuren zal moeten sluiten, en in 2025 zal België definitief stoppen met produceren van kernenergie. Verder mag er volgens dit ontwerp geen nieuwe kerncentrale gebouwd worden.

Een geleidelijke kernuitstap van 40 jaar zou voldoende tijd moeten zijn om de technologieën voor hernieuwbare en zuivere energiebronnen op grote schaal op punt te zetten. België moet zich immers ook engageren om de broeikasgassen drastisch te verminderen (Protocol van Kyoto, 1997). Sinds 1973 is de CO₂-uitstoot in België voor de elektriciteitsproductie praktisch niet veranderd en is nu zelfs iets lager dan in 1973, en dit door de installatie van de kerncentrales.

De Belgische elektriciteitsbehoefte werd in 2003 voor bijna 56% voorzien door kernenergie, 26% door aardgas, 11% door steenkool en slechts 1,7% door andere bronnen (BFE 2003). Door de wet van geleidelijke uitstap uit kernenergie goed te keuren, met het oog op het Protocol van Kyoto en rekening houdend met een verwachte stijging van de vraag naar energie de komende jaren zijn er drie mogelijkheden:

1. ofwel zal de voorziening van onze elektriciteitsbehoefte door andere, duurdere bronnen met meer dan 50% moeten stijgen.
2. ofwel zal België emissierechten in het buitenland moeten kopen.
3. ofwel moet er meer inspanning geleverd worden om REG te promoten om zo het energieverbruik te doen dalen.

Als er gekozen wordt voor de eerste 2 mogelijkheden zal het resultaat altijd duurder zijn dan met de huidige voorziening door kernenergie, een prijskaartje dat doorgerekend zal worden naar de belastingbetaler of de energieverbruiker.

1.2.2 Onderzoeksvragen

1.2.2.1 Centrale onderzoeksvraag

De energieproblematiek en de kernuitstap zijn een internationaal gegeven. Om het onderzoek niet te uitgebreid te houden beperken we deze eindverhandeling tot België, gezien vanuit een internationale context.

De centrale onderzoeksvraag voor deze eindverhandeling luidt als volgt: **“De kernuitstap en Kyoto: een Externe, Economische en Ecologische analyse. Is op lange termijn en met gelijkblijvende energieconsumptie kernenergie de beste oplossing?”**

We zullen onderzoeken wat de externe en ecologische kost is van de verschillende technologieën om elektriciteit te produceren. Omdat de elektriciteitsproductie in een stijgende energieconsumptie moet kunnen voorzien zullen we voor iedere toepassing de maximale hoeveelheid energie die geleverd kan worden bepalen.

1.2.2.2 Deelvragen

Bij de centrale onderzoeksvraag kunnen we volgende deelvragen afleiden:

- Wat is de betekenis van kernenergie?
- Wat is de huidige toestand van het energieverbruik en de energievoorraden?
- Wat is de ecologische en economische kost van de verschillende energiebronnen?
- Hoe is de algemene toestand van energievoorziening in België?
- Kan er bij een sluiting van de kerncentrales nog sprake zijn van energievoorziening op lange termijn?

1.2.3 Onderzoeksstrategieën

Onder deze alinea wordt aangegeven welke strategieën we zullen aanwenden om tot een bevredigend antwoord te komen op de gestelde onderzoeksvraag.

Eerst gaan we een korte bespreking geven van het Kyoto-Protocol, wat dit inhoudt voor de landen die getekend hebben en wat dit betekent voor België. Daarna halen we kort aan wat het begrip “Externe Kost” inhoudt en hoeveel deze in België bedragen. In een volgend hoofdstuk gaan we een algemeen overzicht geven van de energievoorziening in België. Vervolgens gaan we de verschillende energiebronnen bespreken. Kernenergie wordt uitvoerig besproken, zowel kernsplitsing als kernfusie. We gaan in op de werking van deze processen, de brandstoffen die gebruikt worden en hun reserves. De energievormen ter vervanging van kernenergie worden in een volgend hoofdstuk besproken, met telkens een overzicht van de bestaande reserves en hun kostprijs.

De belangrijkste bron van informatie die we zullen gebruiken zijn officiële websites, omdat hier de meest actuele informatie te vinden is en ook het nodige cijfermateriaal bevatten. Verder worden ook krantenartikels als informatiebron gebruikt, omdat zij weergeven hoe de bevolking de energieproblematiek ervaart

Hoofdstuk 2: Het Verdrag van Kyoto

2.1 Inleiding

De opwarming van de aarde en klimaatsveranderingen zijn al jaren het onderwerp van discussies wereldwijd. Pessimistische scenario's voorspellen dat de temperatuur van de aarde de komende honderd jaar met 5,8°C zal stijgen. Deze temperatuurstijging zou leiden tot onomkeerbare veranderingen in ecosystemen, zou negatieve gevolgen voor het globale milieu en een stijging van het zeeniveau hebben met overstromingen, het verdwijnen van steden en massale voedseltekorten als gevolg. Klimaatsveranderingen, ijstijden, stijging van de temperatuur zijn altijd een onderdeel geweest van de geologische evolutie van de aarde.

De voorbije honderd jaar kende het klimaat een versnelde opwarming van de aarde, wat hoogstwaarschijnlijk het gevolg was van menselijke activiteiten. Sinds de opkomst van de industrie worden er dagelijks miljoenen tonnen broeikasgassen meer dan voorheen uitgestoten, waarvan CO₂, methaan (CH₄) en stikstofdioxide (NO₂) het meeste bijdragen tot de globale opwarming (Oksana K., The Kyoto Protocol: Universal concern for climate change, 2004). Voor de industrialisatie bedroeg het niveau aan CO₂ in de atmosfeer ongeveer 270 ppm, vandaag is dit al gestegen tot 379 ppm. Sinds de Industriële Revolutie is er dus een continue stijging van de CO₂-uitstoot. Willen we vermijden dat de temperatuur de komende tientallen jaren met niet meer dan 2°C stijgt, moet dit niveau van uitstoot beneden de 400 ppm gehouden worden (Greenpeace, 2005).

In 1992 vond in Rio de Janeiro de VN Conferentie inzake Milieu en Ontwikkeling plaats. Een belangrijk onderdeel van deze conferentie was de tot standkoming van het Klimaatverdrag. Dit verdrag voorziet in een regeling die de geïndustrialiseerde landen ertoe moet aanzetten hun uitstoot van broeikasgassen te verminderen en te streven naar een stabilisatie op lange

termijn ten opzichte van het referentiejaar 1990. Na deze conferentie vonden er nog een aantal opvolgingsconferenties plaats, met het Kyoto Protocol als belangrijkste resultaat.

2.2 Het Kyoto Protocol

In 1997 vond in het Japanse Kyoto de 3^{de} opvolgingsconferentie van Rio '92 plaats. Tijdens deze conferentie kwamen de geïndustrialiseerde landen overeen dat gedurende de periode 2008-2012 de uitstoot van broeikasgassen met 5% moet dalen ten opzichte van het niveau van 1990. Het Verdrag zou pas in werking treden als 55 landen het Protocol ondertekenen, waaronder een reeks landen die samen verantwoordelijk zijn voor 55% van de uitstoot van broeikasgassen in 1990. De uitvoering kwam echter in het gedrang door de weigering van de Verenigde Staten en Rusland om het Protocol te ratificeren. De VS, in 1991 nog goed voor 36,1% van de totale uitstoot aan broeikasgassen, beschouwen het Verdrag als schadelijk voor de economie en willen pas na de eerste periode van uitstootvermindering, in 2012, het Verdrag opnieuw in beschouwing nemen.

De ratificering van het Verdrag door Japan in 2001 en door Rusland in 2004 betekende een einde aan de lange lijdensweg van het Protocol. Op 16 februari 2005 kon het Kyoto-protocol eindelijk van start gaan. De enige landen die niet getekend hebben zijn de Verenigde Staten en Australië, maar ook de landen die in een overgangseconomie zitten, zoals de economische tijgers China en India moeten zich nog niet aan het Verdrag houden. Peking is echter van plan vrijwillig maatregelen te nemen.

Aan het behalen van de uitstootnorm van broeikasgassen is wel een achterpoort verbonden. Sinds de Klimaatconferentie van Den Haag in 2000 wordt er gesproken van een handel in emissierechten. Dit houdt in dat bedrijven en landen die de opgelegde norm relatief gemakkelijk kunnen behalen emissierechten (vergunningen voor koolstofdioxide) kunnen verkopen aan bedrijven en landen die zware investeringen moeten doen om hun uitstoot te verminderen. Door dit systeem van verkoop van emissierechten is er meer zekerheid dat

landen hun uitstoot kunnen verminderen. Dit zou wel eens een heel lucratieve handel in emissierechten kunnen veroorzaken. Rusland bijvoorbeeld heeft een enorm overschot aan schone lucht omdat de industrie er voor een groot deel is ingestort. De laatste jaren is er echter een sterke economische groei in Rusland, dus het blijft afwachten hoe de industrie en de uitstoot van schadelijke gassen gaat evolueren. Verder mag het zijn enorme wouden in rekening brengen, omdat deze de koolstofdioxide uit de lucht halen.

In 2012 loopt de eerste ronde van het Kyoto Protocol af. Hoe het hierna verder moet met de uitstoot van broeikasgassen is onderwerp van vele discussies. De Verenigde Staten hebben gesteld dat zij tegen dan het Protocol willen herzien, en Europa wil streefdoelen voopstellen om zo beperkingsdoelstellingen op lange termijn te halen. Dit houdt in dat tegen 2020 de uitstoot met 20% moet verminderen en tegen 2050 zelfs met 60 tot 80% (De Standaard, 21/03/2005).

2.3 Kyoto en België

Op 31 mei 2002 heeft ook België het Kyoto Protocol definitief geratificeerd. Hiermee verbindt België zich ertoe om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren. Om de uitstoot van schadelijke broeikasgassen te verminderen hebben alle landen van de Europese Unie een gezamenlijk systeem opgesteld dat door de Europese Commissie wordt beheerd. Het systeem ligt vast in een richtlijn van oktober 2003 en is in werking getreden op 1 januari 2005. De eerste fase loopt tot 2008 (De Standaard, 20/10/2004).

Het gemeenschappelijk plan bepaalt in welke mate de lidstaten hun uitstoot moeten verminderen om de beperkingen opgelegd in Kyoto te halen. In het kader van dit gemeenschappelijk systeem moet iedere lidstaat een eigen Kyoto-plan opstellen. Hierin moeten uitstootbeperkingen worden opgelegd aan alle installaties die aanzienlijke hoeveelheden CO₂ uitstoten. De Europese Commissie heeft het vanaf 1 januari 2005 ook

mogelijk gemaakt om uistootrechten te verhandelen. Zo kunnen installaties die hun normen niet halen emissierechten kopen van installaties binnen de Unie die minder uitstoten.

België moet volgens het systeem zijn uitstoot van broeikasgassen tegen 2010 met 7,5% verminderen. Om deze doelstelling te halen zijn er 4 plannen opgesteld: een federaal plan waarin de kerncentrales en de hulp-en veiligheidsinstallaties zijn ondergebracht en drie gewestelijke plannen (Vlaanderen, Brussel en Wallonië). De gewesten hebben de bevoegdheid om vergunningen toe te kennen voor de uitstoot van broeikasgassen en toewijzingsplannen per installatie op te stellen.

Het akkoord tussen de federale regering en de gewestregeringen bepaalt dat Vlaanderen vanaf 2008 nog 83,37 Mton/jaar CO₂ mag uitstoten, Wallonië 50,23 Mton/jaar en Brussel 4,13 Mton/jaar. In totaal moet er jaarlijks 14,03 Mton CO₂ minder uitgestoten worden om een vermindering van 7,5% voor de periode 2008-2012 te realiseren. Per inwoner komt dit neer op een vermindering van 1,4 ton CO₂/jaar. Naast de maatregelen die bedrijven nemen om hun uitstoot te beperken zijn ook individuele inspanningen belangrijk. Door energiezuinig te wonen, meer gebruik te maken van het openbaar vervoer en het elektriciteitsverbruik te minimaliseren kunnen huishoudens bijdragen tot de jaarlijkse vermindering van CO₂ uitstoot. Energiebesparingen moeten doorgevoerd worden, en de federale overheid is daarnaast ook van plan om emissierechten aan te kopen in Rusland.

De uitstoot van broeikasgassen is in de periode 1990-2001 gestegen van 146,24 Mton CO₂-eq tot 149,30 Mton CO₂-eq (Federale Overheidsdienst 2005). Industriële emissies, wegtransport en verwarming hebben het grootste aandeel in de totale emissie van broeikasgassen. Toekomststramingen van de broeikasgasemissies in België geven aan dat als het huidig beleid wordt voortgezet, het niet mogelijk is om de Kyoto-doelstelling te halen. In plaats van een vermindering van 7,5% zou er tegen 2010 zelfs een stijging zijn, die verklaard kan worden door de economische expansie en de toenemende vraag naar elektriciteit en vervoer.

2.4 Kyoto na 2012

De afspraken gemaakt door de landen die het Protocol van Kyoto hebben ondertekend gelden slechts tot 2012. Europa moet zijn uitstoot in de periode 2008-2012 met 5,2% ten opzichte van 1990 verminderen, maar voor de periode na 2012 is nog niets bepaald. De Europese lidstaten zijn het niet eens of er enkel eindnormen voor 2050 moeten worden vastgelegd, of ook tussen-normen om na te gaan of de lidstaten voldoende inspanning leveren om het einddoel te halen. Wel is er een compromis bereikt over de doelstellingen: tegen 2020 zou er een vermindering moeten zijn van 15 tot 30% en tegen 2050 zou dit 60 tot 80% moeten bedragen. Het behalen van deze normen is mogelijk door fossiele brandstoffen te vervangen door kernenergie (tegen 2050 zou kernfusie mogelijk zijn, zie verder) en H₂-technologie.

Hoofdstuk 3: Externe kosten

De uitstoot van schadelijke gassen brengt schade toe aan het milieu en gebouwen en heeft gevolgen voor de menselijke gezondheid. De financiële gevolgen die hieruit voortvloeien en direct kunnen worden toegewezen (bijvoorbeeld restauratie van monumenten aangetast door zure regen, dokterskosten,...) worden de externe kosten genoemd. Elektriciteitsproducenten verrekenen deze kosten niet in het prijzensysteem maar ze worden aan de maatschappij opgelegd.

De belangrijkste externe kosten zijn de milieukosten. Het is belangrijk dat de externe kosten van verschillende elektriciteitscentrales in een gemeenschappelijke monetaire eenheid worden omgezet. Op deze manier is het mogelijk om duurdere maar propere technologie te vergelijken met goedkopere maar meer vervuilende procédés.. Alle centrales moeten voldoen aan de geldende of te verwachten milieunormen. Deze normen verschillen naargelang de gebruikte technologie, en het niet in rekening brengen van de externe kosten zou neerkomen op het veronachtzamen van de voordelen van bepaalde technologieën voor het milieu (Een politiek economische analyse van de afschaffing van kernenergie in België, Ignace de Nollin, 2003).

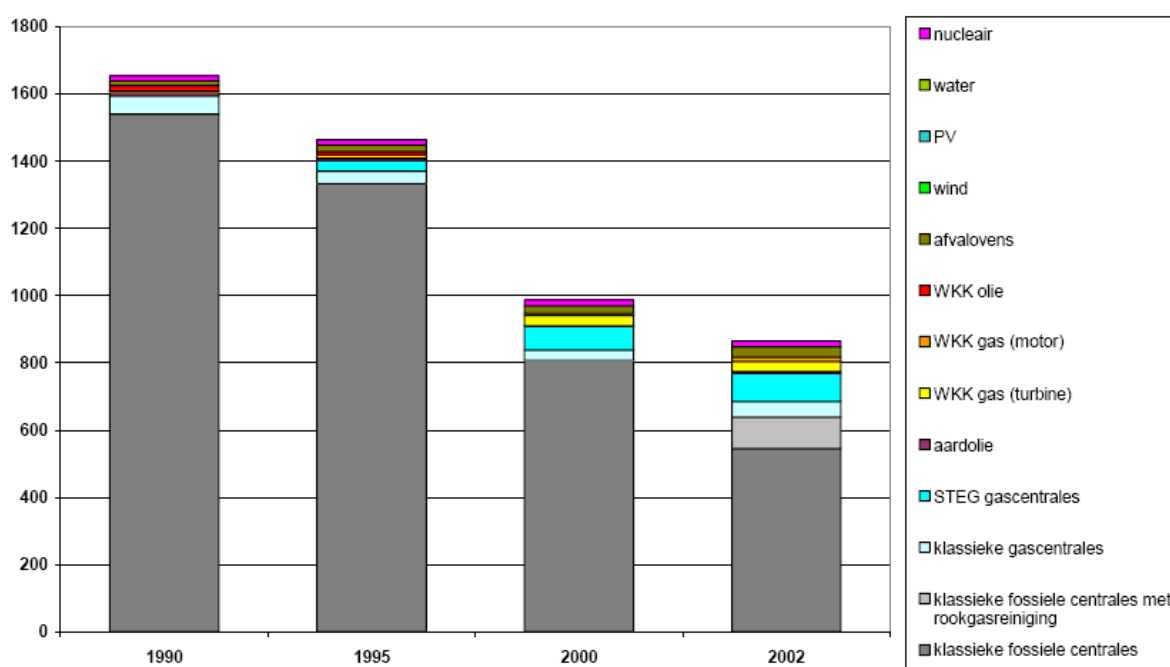
De Europese Commissie van 1995 heeft een studie verricht naar de externe kosten van verschillende energiebronnen. Het resultaat was dat kernenergie de laagste externe kost veroorzaakt, en steenkoolcentrales de hoogste. Hiertussen zitten dan nog de andere primaire energiebronnen, evenals wind en het gebruik van biomassa. Bij de bepaling van de externe kost van windenergie is nog niet volledig rekening gehouden met lekkages, gezondheids - en andere niet-direct observeerbare gevolgen. In de toekomst zal hier meer onderzoek naar gedaan worden om een zo objectief mogelijk beeld te geven. De externe kost van zonne-energie is niet opgenomen in de studie omdat ze in België nog niet volledig gekend is. Met uitzondering van de externe kost is zonne-energie enorm duur en momenteel

niet rendabel in België (Een politiek economische analyse van de afschaffing van kernenergie in België, Ignace de Nollin, 2003).

In april 2005 is in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij een studie verricht naar de externe kosten voor de productie en verdeling van elektriciteit in Vlaanderen. Volgende figuur geeft een overzicht van de resultaten.

Figuur 2: evolutie van de totale externe kosten over verschillende jaren voor verschillende type centrales

Externe kosten totale elektriciteitsproductie (miljoen euro)



Bron: Milieurapport 2005

Sinds 1990 kennen de externe kosten in Vlaanderen een dalende trend. Centrales die gebruik maken van fossiele brandstoffen zijn de belangrijkste bron van externe kosten. Wel is duidelijk dat het aandeel van STEG-centrales de voorbije jaren toegenomen is. Net als in Europa is ook in Vlaanderen het aandeel van kernenergie in de totale externe kosten het geringst. Drie belangrijke factoren verklaren de daling van 1990 tot 2002:

- o de afbouw van steenkool ten voordele van STEGs
- o de opkomst van WKK op aardgas

- o de installatie van rookgaszuivering in de steenkoolcentrale van Langerlo

Tabel 1: Overzicht externe kosten per eenheid van effectief opgewekte elektriciteit in Vlaanderen over verschillende jaren (in euro/MWh)

	1990	1995	2000	2002
Externe kost via SO ₂	23,8	19,2	7,7	6,2
Externe kost via NO _x	7,4	6,1	4,0	2,9
Externe kost via PM ₁₀	3,7	1,7	1,0	1,0
Externe kost via CO ₂	8,7	8,8	7,4	7,5
Externe kost via andere impacts	1,7	1,6	1,4	1,4
Totaal	45	37	22	19

Bron: Milieurapport 2005

Ondanks de daling van de totale externe kosten is het aandeel van CO₂ slechts minimaal gedaald en sinds 2000 is er zelfs geen daling meer zichtbaar (tabel x).

Externaliteiten zijn steeds vaker de kern van beslissingen genomen op het Europese maar ook op nationale niveau's. Er is echter maar weinig informatie over deze externe kosten, en om meer te weten te komen hierover heeft Europa een project gefinancierd, het ExterneE Project.

Het Externe Kosten Energie project is de eerste poging om externe kosten verbonden aan verschillende brandstofcyclussen te evalueren. Een brandstofcyclus bestaat uit een keten van processen verbonden aan de opwekking van elektriciteit uit een bepaalde brandstofbron. De behandeling van de steenkoolcyclus bijvoorbeeld bestaat uit een evaluatie van de impact verbonden aan de bouw van een nieuwe fabriek, het ophalen van de steenkool uit de mijnen, transport van steenkool, afval en andere materialen, opwekking van energie, afvalverwerking en transport van elektriciteit.

De Europese Commissie heeft het project in 1991 opgestart in samenwerking met het Departement van Energie van de Verenigde Staten. Tijdens de eerste fase van het project heeft Europa zich geconcentreerd op nucleaire en steenkool als brandstoffen. In december 1997 is de laatste fase van het project beëindigd.

Hoofstuk 4: Energievoorziening in België

Volgende tabel geeft een overzicht van het primair energieverbruik in België voor de periode 1998-2003:

Tabel 2: Evolutie van het primair energieverbruik

Ktoe (PCI)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	JGG in % ⁽²⁾
Vaste brandstoffen	8.552	7.479	8.382	7.718	6.539	6.210	-5,2
Aardolie	23.951	23.610	23.690	24.033	22.338	24.153	+0,1
Aardgas	12.508	13.371	13.405	13.216	13.414	14.441	+2,4
Kernenergie	12.029	12.772	12.548	12.077	12.340	12.345	+0,4
Overige (Primaire elektriciteit)	154	104	413	824	688	580	+24,7
Brandstoffen uit hernieuw bare energieën en uit recuperatie	374	453	516	535	517	631	+9,1
Totaal	57.568	57.789	58.954	58.403	55.836	58.361	+0,2

(2) JGG=Jaarlijks gemiddeld groeicijfer in %, berekend over de periode 1998-2002

Bron: FOD 2004

Uit de tabel blijkt duidelijk dat het elektriciteitsverbruik een enorme stijging kent gedurende deze periode. Deze groei van de eindvraag naar elektriciteit is vooral het gevolg van een gestegen vraag in de industrie en in de transportsector. Verder is er ook een grote vooruitgang van de hernieuwbare energievormen. Dit is een mogelijk gevolg van de subsidies die door de overheid betaald worden aan bedrijven en particulieren die gebruik maken van alternatieve energievormen. De overige energievormen zijn licht gestegen, behalve de vaste brandstoffen. Sinds 1998 kent de vraag naar steenkool een continue daling in België veroorzaakt door een lager verbruik van de industrie en de elektriciteitsproductie. Het algemeen energieverbruik kent slechts een lichte stijging sinds 1998 (Federale Overheidsdienst 2005).

De belangrijkste leverancier van elektriciteit in België zijn de kerncentrales, die in 2003 56% van de geproduceerde elektriciteit leverden (tabel x). Op de tweede plaats staan de gasachtige brandstoffen, die 27,9% van de elektriciteit leverden. De elektriciteitsproductie

op basis van vaste brandstoffen kent de laatste jaren een continue daling, en de overige bronnen hebben slechts een minimaal aandeel in de totale elektriciteitsproductie.

Tabel 3: Structuur van de bruto elektriciteitsproductie

In % van de totale productie	2002	2003
Kernenergie	57,7	56,0
Vaste brandstoffen	12,2	11,4
Gasachtige brandstoffen	25,0	27,9
Vloeibare brandstoffen	1,2	1,2
Hernieuwbare brandstoffen en recuperaties	2,0	1,9
Waterkrachtenergie en pompcentrales	1,9	1,7

Bron: FOD Economie 2004

Voor de elektriciteitsproductie wordt in België gebruik gemaakt van volgende centrales:

- De klassieke thermische centrale
- De stoom – en gascentrale
- Warmtekrachteenheden
- Turbojets en diesels
- De kerncentrale
- De waterkrachtcentrale en spaarbekken centrales
- Windmolenparken
- Energierecuperatie (biomassa)

In dit hoofdstuk worden de klassieke thermische centrale, turbojets en diesels, de stoom – en gascentrale en warmtekrachteenheden besproken. De overige centrales worden in het volgende hoofdstuk bij de bespreking van de verschillende energiebronnen aangehaald.

4.1 De klassieke thermische centrale

Klassieke thermische centrales zijn polyvalente centrales die zowel op steenkool, aardolie of aardgas werken. Sinds de oliecrisis wordt aardolie echter praktisch niet meer gebruikt als grondstof om de afhankelijkheid van de OPEC-landen te verminderen. Een groot voordeel van deze centrales is dat ze hun geproduceerd vermogen kunnen aanpassen aan de schommelende vraag naar elektriciteit. De bestaande centrales voldoen aan de basisvraag naar elektriciteit en kunnen verbruikspieken opvangen (Hoenraet, 1999).

In een thermische centrale wordt de brandstof verbrand en de warmte die daarbij vrijkomt wordt gebruikt om water te verdampen. Deze stoom gaat onder hoge druk en bij hoge temperatuur naar een turbine. De schoepbladen van deze turbine beginnen hierdoor te draaien en thermische energie wordt dan omgezet in mechanische energie. Een alternator die verbonden is met de turbine gaat de mechanische energie omzetten in elektriciteit. Aan de uitgang van de turbine blijft een deel stoom over dat langs koude tussenschotten wordt gevoerd om zo terug in water over te gaan. Het water keert terug naar de verwarmingsketel en de cyclus begint opnieuw. Restwarmte die in de condensor achterblijft wordt afgevoerd naar een waterloop of een koeltoren. In het laatste geval keert een groot deel van het koelwater in een gesloten kringloop naar de centrale terug.

4.2 STEG-centrale

STEG-centrales of stoom-en gasturbines zijn centrales met 2 thermische cycli. Een eerste cyclus heeft plaats in de gasturbine. Het verbrandingsgas dat de gasturbine verlaat heeft een vrij hoge temperatuur van 560°C tot 640°C. Het gas is hierdoor geschikt om gebruikt te worden als warmtebron in een tweede thermische cyclus: een stoomcyclus. In de tweede cyclus wordt een recuperatieketel aangedreven door de hete uitlaatgassen van de gasturbine om water in stoom om te zetten. Deze stoom wordt gebruikt om een bijkomende

stoomturbine aan te drijven. De gas-en stoomturbine zijn beide verbonden met een alternator die de bekomen mechanische energie omzet in elektriciteit.

Het rendement van een STEG-centrale is vandaag ongeveer 58%, met een turbine-inlaattemperatuur van het gas van 1.260°C tot 1.430°C. Bij gebruik van stoomkoeling is het mogelijk dit rendement te verhogen tot 60%, wat reeds in het jaar 2000 werd gehaald. Door rekening te houden met mogelijke verbeteringen van de gasturbine wordt verwacht dat het rendement tegen 2020 in de orde van 63% zou kunnen liggen. Deze verbeteringen bestaan uit betere koelsystemen, waardoor er meer warmte onttrokken kan worden in de gasturbinecyclus die dan aan de stoomcyclus wordt toegevoerd.

Gasturbines zijn machines die zeer snel opgestart kan worden en bij koude start in ongeveer 20 tot 30 minuten op vollast kan komen. Vermogensveranderingen zijn zeer snel te volgen met een gasturbine. De stoomturbine in een STEG-centrale is trager dan de gascomponent. Bij warme start na 8 uur stilstand duurt het ongeveer 60 minuten om op vollast te komen. Na 36 uur stilstand is dit al gestegen tot 100 minuten en na 72 uur zelfs 180 minuten. Deze gecombineerde eenheden zijn hierdoor niet geschikt om snelle veranderingen te volgen. Interessant is wel de korte constructietijd van een STEG-centrale: 24 tot 30 maanden tussen bestelling en ingebruikneming. Hierbij is de investeringskost redelijk laag van 350 tot 400 EUR/kW. STEG-centrales werken enkel op aardgas, een goedkope brandstof waardoor de uitbatingskost laag is. Het gebruik van een enkele brandstof maakt wel dat de productieprijs sterk afhankelijk is van de aardgasprijs (nl. 60 % van de kWh-kost).

4.3 Warmtekrachtkoppeling (WKK)

Warmtekrachtkoppeling is een conversietechniek waarbij de gelijktijdige omzetting in twee bruikbare energievormen wordt nagestreefd, elektriciteit en warmte. Bij WKK zijn er twee mogelijkheden:

1. elektriciteit-gestuurd: de productie van elektriciteit primeert, de geproduceerde warmte wordt erbij genomen.
2. warmte-gestuurd: de bedoeling is warmteproductie, de elektriciteit die ook geproduceerd wordt is ondergeschikt.

Bij elektriciteit-gestuurde WKK wordt de gasturbine gebruikt voor de productie van elektriciteit, en de hete uitlaatgassen die deze turbine verlaten worden naar een recuperatieketel geleid waar water wordt omgezet tot stoom. Deze stoom kan gebruikt worden voor de verwarming van gebouwen, of voor bepaalde industriële processen.

Een WKK-installatie gaat op ieder moment zowel elektriciteit als warmte produceren, maar de vraag naar elektriciteit en warmte is niet op ieder moment even groot. Om geen energie verloren te laten gaan zou de WKK-installatie optimaal gedimensioneerd moeten zijn. Er wordt dan zoveel mogelijk constant vermogen geleverd zonder warmte te moeten wegkoelen (rationeel energiegebruik, REG), zonder te veel op deellast te moeten werken, of voortdurend te moeten worden stilgelegd. De warmtevraag gaat in een dergelijke installatie de werking bepalen (warmte-gestuurde WKK). Is de vraag naar elektriciteit groter dan de vraag naar warmte, wordt er bij het openbare net elektriciteit aangekocht. Wordt er te veel elektriciteit geproduceerd, dan wordt dit overschot terugverkocht aan het net. In beide gevallen wordt er op deze manier nooit warmte weggegooid.

Warmtekrachtkoppeling bestaat in verschillende varianten: WKK met dieselmotor, Stirlingmotor, gasmotor, microturbines, Organic Rankine Cycle.

De enige beperking aan WKK-centrales is dat de klant die de warmte gebruikt in de onmiddellijke buurt van de centrale gelegen moet zijn. Bovendien moet de klant een stabiel en intensief warmteverbruik hebben.

4.4 Turbojets

Turbojets hebben hetzelfde werkingsprincipe als gasturbines. Uit de omgeving wordt lucht aangezogen, samengeperst en naar een verbrandingskamer gevoerd waar ze met kerosine vermengd wordt. Dit mengsel wordt op zeer hoge temperatuur verbrand, en de verbrandingsgassen die daarbij ontstaan drijven een turbine aan. Turbojets kunnen heel snel worden opgestart en hebben een lage inversteringskost. De brandstof die ze gebruiken is echter duur en daarom worden ze enkel gebruikt om plotse stijgingen in het verbruik of een mogelijke tijdelijke storing in een andere centrale op te vangen (Hoenraet, 1999).

Hoofdstuk 5: Kernenergie

5.1 Kernsplitsing

5.1.1 Werking

De klassieke thermische centrale en een kerncentrale gebruiken beide hetzelfde principe om elektriciteit te produceren. Water wordt verwarmd om zo stoom te produceren die een turbine doet draaien, die op haar beurt een alternator aandrijft. Het grote verschil tussen een klassieke thermische centrale en een kerncentrale (die werkt op basis van het principe van kernsplitsing) is de manier waarop warmte wordt geproduceerd. De fossiele brandstoffen die bij een klassieke centrale worden gebruikt zijn vervangen door uranium- en plutoniumatomen.

Een kerncentrale bestaat uit meerdere delen, ook wel kringen genoemd. De primaire kring is het hart van de kerncentrale. Hier bevindt zich de kernreactor, waar de uranium-en plutoniumatomen gesplitst worden. Deze worden gebruikt als splijtstofstiften die zich in een met water gevulde reactorkuip bevinden. Door het splitsingsproces komt er een grote hoeveelheid warmte vrij, die door de splijtstofhoudende stiften aan het omringende water wordt afgegeven. Door het op- en neerlaten van regelstaven kan het splijtingsproces en de vrijkomende warmte geregeld worden. Water van de primaire kring wordt zo uiteindelijk tot 320° verwarmd, maar zal niet beginnen koken en verdampen omdat het water onder een hoge druk van ongeveer 150 bar wordt gehouden.

Een buizensysteem gaat dit verhitte water naar de stoomgenerator leiden. Hier gaat het zijn warmte afstaan aan water van een tweede of secundaire kring. Het water en de stoom van de secundaire kring komen niet in contact met het water uit de reactor. Op die manier

vormt de stoomgenerator een extra veiligheidsbarrière tussen de kernreactor en de buitenwereld.

Het verhitte water van de secundaire kring gaat wel over in stoom omdat de druk hier veel lager is dan in de primaire kring. De stoom wordt gebruikt om een turbine waaraan een alternator is gekoppeld, aan te drijven. In dit deel van het proces zijn de temperatuur en de druk waaronder het water wordt verwarmd van groot belang. Water dat op hoge druk wordt opgewarmd tot het begint te koken gaat over in vochtige stoom en condenseert gedeeltelijk. Deze vochtige stoom tast de bladen van de turbine aan en heeft vroegtijdige slijtage voor gevolg. Het is dan ook nodig om het vochtige stoom verder te verhitten waardoor het overgaat in 'droge' stoom dat de turbineschoepen niet zo zwaar belast.

Het is belangrijk dat de verhitting van de vochtige stoom onder de juiste druk en temperatuur gebeurt. Wordt water verwarmd tot boven 374°C onder een druk van meer dan 218 bar, dan bereikt het zijn superkritisch gebied. Vanaf dit moment bestaat water nog enkel in de gasvormige fase. Het voordeel van deze superkritische temperatuur is dat er een hoger rendement kan bereikt worden (maximum rendement = $T - T_0 / T$) en er kan vermeden worden dat er vloeistof op de schoepen ontstaat. Nadeel is dat werken onder dergelijke temperatuur en druk gevaarlijk is, en veiligheid staat centraal bij de werking van een kerncentrale.

De onbruikbare stoom die de turbine verlaat moet gekoeld worden, wat gebeurt in de condensor. Dit is een warmtewisselaar met duizenden buisjes waardoor het water van de tertiaire kring stroomt. Alle centrales, zowel nucleaire als thermische, hebben koelwater nodig om deze stoom te condenseren. Daarom worden elektriciteitscentrales in de buurt van rivieren en kanalen (oppervlaktewateren) gebouwd. Het koelwater dat in de tertiaire koelkring circuleert zet de gebruikte stoom terug om in water, dat terug gebruikt kan worden in de koelkring (gesloten kringloop) of geloosd kan worden. In dit geval hebben we te maken met "thermische belasting" van het oppervlaktewater. Als het geloosde water te warm is gaat het zuurstofgehalte van het oppervlaktewater afnemen, waardoor organisch leven bemoeilijkt wordt. De overheid heeft dan ook een aantal normen vastgelegd (Vlarem

II) die betrekking hebben tot de temperatuur van het geloosde water, de zuurtegraad, de hoeveelheid opgeloste zuurstof en het kiemgetal.

5.1.2 Grondstoffen

5.1.2.1 Uranium

De belangrijkste brandstof van kernsplijting is uranium. Het is een metaal dat in weinig geconcentreerde vorm aanwezig is en meestal vermengd is met andere mineralen. Het kan zowat op heel de aarde gevonden worden, zowel op land als in zee. De belangrijkste producenten zijn Australië, Canada, de Verenigde Staten, China, Namibië, Niger.

Uranium zoals het in de natuur voorkomt bestaat uit 3 isotopen: U-234 (zeer kleine fractie), U-235 (ongeveer 0,711%) en U-238 (bijna 99%). Het is U-235 dat gebruikt wordt voor de splijtingreactie, U-238 is niet splitsbaar.

Vooraleer uranium gebruikt kan worden in de kerncentrales moet het een reeks bewerkingen ondergaan. Het mineraal moet gezuiverd worden en de concentratie van U-235 verhoogd tot 3 à 4%. Dit verrijkt uranium kan dan omgevormd worden tot splijtstoftabletten die na eventuele opslag in de kerncentrale in de reactor geladen worden.

Door de U-235 kernen te beschieten met neutronen gaan deze splitsen en komt er energie vrij. De uiteengevallen kernen sturen op hun beurt neutronen uit zodat nieuwe splijtingen kunnen gebeuren. Het resultaat is een gecontroleerde kettingreactie. Tijdens dit splijtingsproces komt er een enorme warmte-energie vrij die in het verdere proces gebruikt wordt om water om te zetten in stoom.

De uraniumreserves zijn , zoals alle grondstoffen, beperkt. Aangetoonde reserves (Ra¹) bedragen 31 Gtoe². De basisreserves worden op 149 Gtoe geschat en de mogelijke reserves op 23.890 Gtoe. Wordt het productieritme constant gehouden op 0,056 toe/jaar.inwoner, dan is er nog genoeg uranium voor de komende 92 jaar(cijfers op basis van 1995). Deze reserves worden gebruikt in het splijtingsproces waardoor uranium de komende miljoenen of zelfs miljarden jaren als grondstof voor kernenergie kan dienen (Hoenraet, 1999).

5.1.1.2 Plutonium

Naast uranium kan ook plutonium gebruikt worden voor kernsplitsing. Het komt echter slechts zelden voor in de natuur en ontstaat doordat sommige U-238 kernen een neutron opvangen en in plutoniumatoom veranderen.

5.1.1.3. Thorium

Thorium wordt in veel gesteenten aangetroffen in lage concentraties. Geschat wordt dat de totale hoeveel thorium op aarde ongeveer drie maal zo groot is als de hoeveelheid uranium. In kerncentrales kan thorium omgezet worden in uranium waardoor het gebruikt kan worden om kernenergie op te wekken. Thoriumreactoren zijn nooit belangrijk geworden omdat er bij gebruik van thorium geen splijtstoffen geproduceerd worden en kan dus niet gebruikt worden voor militaire doeleinden. Hierdoor is er veel minder geld beschikbaar voor wetenschappelijk en technologisch onderzoek (Wikipedia Encyclopedie).

¹ Zie bijlage 1

² 1 toe= 42 GJ=11,7 MWh

5.1.2 Voordelen

Ons land heeft zelf bijna geen energiebronnen en is daarom voor een groot deel afhankelijk van het buitenland. In 2001 hebben we voor een totaal van 14,4 MEUR energieproducten moeten invoeren, waarvan meer dan 10,4 MEUR aan aardolie en aardolieproducten. De uitvoer van energieproducten in datzelfde jaar bedroeg slechts ongeveer 7 MEUR, een verschil van 7,4 MEUR (tabel 4).

Tabel 4: Handelsbalans van de energieproducten (in MEUR)

	2000		2001	
	<i>Invoer</i>	<i>Uitvoer</i>	<i>Invoer</i>	<i>Uitvoer</i>
Vaste brandstoffen	0,637	0,201	0,767	0,212
Waarvan steenkool en agglomeraten	0,508	0,138	0,609	0,145
Aardolie en aardolieproducten	10,492	5,392	10,474	5,083
Ruwe aardolie	7,003	0,095	7,331	0,054
Afgeleide producten	3,488	5,296	3,143	5,028
Aardgas + fabrieksgas	2,363	0,431	2,831	0,672
Waarvan aardgas	2,363	0,431	2,828	0,672
Elektriciteit	0,339	0,342	0,294	0,383
Andere	0,043	0,626	0,066	0,643
Totaal	13,876	6,994	14,435	6,994
Saldo	-6,881		-7,441	

Bron: Trefpunt Economie 2003/2-3A

Het gebruik van kernenergie zorgt ervoor dat we ieder jaar boven deze kost voor meer dan 500 MEUR uitsparen door de aankoop van geïmporteerde aardolie, aardgas en steenkool te vermijden. Voor de productie van 1 MWh elektriciteit is er:

- ofwel 350 kg steenkool
- ofwel 250 liter aardolie

- ofwel 300m³ aardgas
- of ongeveer 4 gram uranium

nodig. Het gemiddeld elektriciteitsverbruik van een Vlaams gezin bedraagt ongeveer 3,5 MWh/jaar, en indien er verwarmd wordt met elektriciteit kan dit verbruik nog oplopen (VREG 2005). Het gebruik van fossiele brandstoffen die nodig zouden zijn om onze kerncentrales te vervangen is dus enorm.

De productie van kernenergie zorgt voor een stabiele en relatief lage kWh-prijs. De splijtstof die als grondstof dient in de kerncentrale komt voor slechts 23% tussenbeide in de kostprijs van het kWh, terwijl voor de klassieke kWh de brandstof voor 50% of meer tussenkomt. In de kWh uit kernenergie zijn alle kosten begrepen, ook de kosten voor de ontmanteling van de installaties en het beheer van het radioactief afval. Verder zijn de vaste kosten het belangrijkste bij kerncentrales, de proportionele kosten, waarvan de grondstofkost een onderdeel is, vormen maar een klein deel van de financiële last.

Tabel 5: de vergelijking van de elektrische produktiekosten in een kerncentrale en een klassieke centrale

Produktiekost EUR/MWh	Kernenergie 1.000 Mwe³	Kolen 1.000 MWe	Steg – Aardgas 1.000 MWe
Vaste kosten ³	33	45	37
Proportionele kosten ⁴	8	37	97
Totaal	41	82	134

Bron: Hoenraet 1999

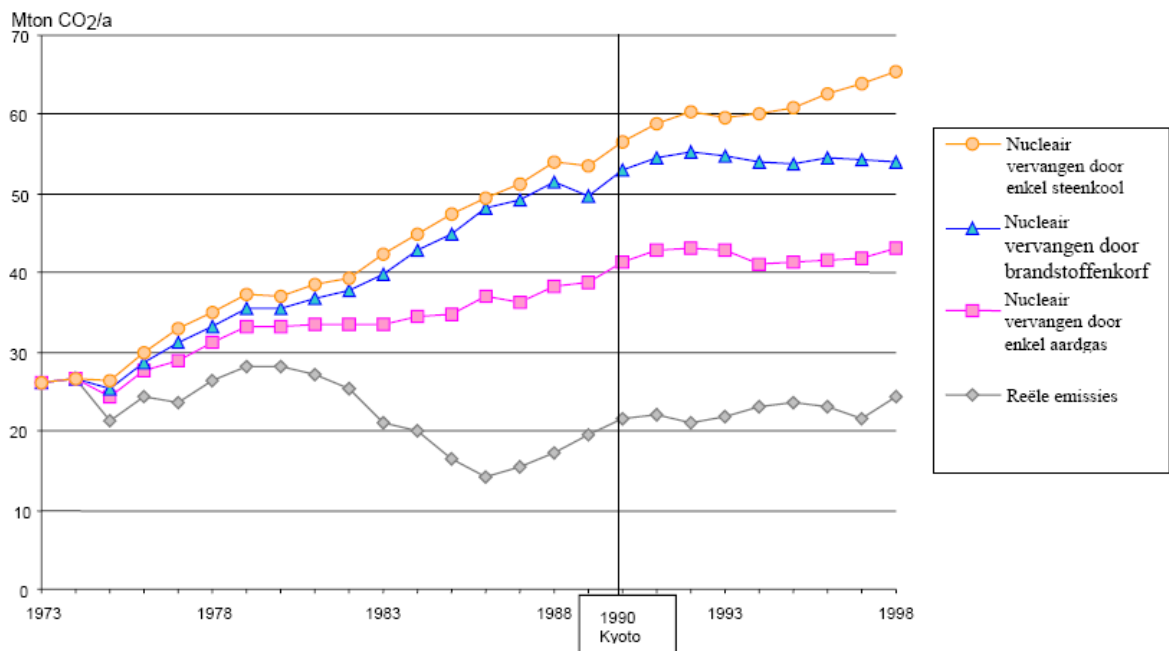
De productie van elektriciteit zorgt voor een aanzienlijke milieuproblematiek. Alleen al in 1997 werd er ongeveer 22 miljoen ton CO₂ uitgestoten door de elektriciteitscentrales. Door kerncentrales als elektriciteitsproducenten te gebruiken kan de evolutie van de CO₂-emissies

³ Vaste kosten: bouwkosten, investeringskosten, financiële lasten, vaste exploitatiekosten, enzovoort. Bij kernenergie zijn bij de vaste kosten de ontmantelingskosten inbegrepen.

⁴ Proportionele kosten: brandstof-splijtstofkosten, specifiek verbruik. Bij kernenergie zijn bij de proportionele kosten de opslag-en bergingskosten van het radioactief afval inbegrepen.

in sterke mate beïnvloed worden. Het aandeel van de kerncentrales in de totale elektriciteitsproductie bereikte zijn maximum van 67,2% in 1986. De totale emissie van CO₂ door elektriciteitscentrales bedroeg in 1980 31,6 Mt, in 2003 was dit gedaald tot 18,7 Mt (Electrabel 2005). Deze daling is voor een groot deel het gevolg van het gebruik van kernenergie. De CO₂-uitstoot verbonden met de elektriciteitsproductie kan hierdoor in bedwang worden gehouden. Met een hypothetische mix van gas en steenkool om de huidige elektriciteitsproductie van kerncentrales te vervangen zou de CO₂-emissie dubbel zo hoog zijn geweest. Hierdoor staat België op de 2^{de} plaats in Europa van landen met de laagste CO₂-emissies. Alleen Frankrijk scoort beter doordat kernenergie voor 79% in de elektriciteitsproductie voorziet.

Figuur 3: evolutie van de CO₂-emissies t.g.v. elektriciteitsproductie in België indien er nooit nucleaire productie zou zijn geweest



Bron: AMPERE 2000

Niet alleen de uitstoot van CO₂ kan door gebruik te maken van kerncentrales worden verminderd. Ook de uitstoot SO₂ en NO_x kan voor een groot deel worden vermeden door elektronucleaire productie.

Om een volledig beeld van de voordelen van kernenergie te geven moeten ook de externe kosten in rekening worden genomen. De Europese Commissie heeft tussen 1991 en 1995 een methodologie ontwikkeld om de externe kost voor iedere energieproductievorm te bepalen. De resultaten van deze studie worden in volgende tabel weergegeven.

Tabel 6: Externe kost van verschillende energiebronnen

Energievorm	Externe kost EUR/MWh(*)	Equivalent dodenaantal per GWj
Kolen	15	37
Ligniet	10	27
Aardolie	12	32
Aardgas	0.6	2
Wind	2.2	0.3
Hydro	2.2	0.8
Kernenergie ⁵	0.4	1

Bron: Hoenraet 1999

(*) De externe kost met betrekking tot de CO₂-emissies is niet inbegrepen. De evaluatie van deze kost, gezien zijn complexiteit, is niet afgerond. Men nu al stellen dat voor fossiele brandstoffen - met uitzondering van aardgas - de externe kost van dezelfde orde van grootte is als die van de brandstofprijs. Wat aardgas betreft, ligt deze kost wel lager. Voor kernenergie en de hernieuwbare energieën is deze kost te verwaarlozen.

5.1.3 Nadelen

De splijtstoffen die in een kernreactor gebruikt worden als grondstof om warmte te leveren zijn na 3 à 4 jaar energetisch uitgeput en moeten dan ook verwijderd worden. Dit gebeurt in cyclussen van drie of vier jaar, waarbij na een jaar 1/3, respectievelijk 1/4 van deze elementen vervangen wordt. Na verwijdering worden de splijtstofstaven naar een opslagplaats gebracht waar ze verscheidene jaren afkoelen. Tijdens deze afkoelingsperiode zal

⁵ Er werd rekening gehouden met zware accidenten zoals Tsjernobyl.

de radioactiviteit en de restwarmte verminderen. De splijtstofelementen, die in het begin slechts uit uranium bestonden, bevatten na de definitieve ontlading 96% uranium, 1% plutonium en 3% splijtstofproducten.

Zijn de splijtstofelementen voldoende afgekoeld, dan kunnen ze geconditioneerd worden in verzegelde containers. Deze containers kunnen dan als hoogradioactief afval geborgen worden. Dit wordt ook wel open cyclus genoemd.

Naast een definitieve berging van de elementen kan er ook gekozen worden voor opwerking, wat ook wel gesloten cyclus wordt genoemd. Het uranium en plutonium wordt op deze wijze gescheiden en teruggewonnen, en de niet meer bruikbare splijttingsproducten worden geconditioneerd en later definitief geborgen. Dit is dus eigenlijk niet meer dan een soort recyclageprocédé. Door gebruik te maken van opwerking kan bespaard worden op natuurlijk uranium en het door kernsplijting geproduceerd plutonium. Het uranium en plutonium dat teruggewonnen wordt kan gebruikt worden om een belangrijke hoeveelheid elektriciteit te produceren en de natuurlijke grondstoffen blijven gespaard. Verder wordt het beheer van de afvalstoffen vergemakkelijkt: het bijzonder giftige plutonium en het radioactieve uranium komen op deze manier immers niet in het milieu terecht.

De kernafvalproblematiek blijft een actueel onderwerp en is voor velen een verontrustend gegeven. Als er echter gekeken wordt naar de totale hoeveelheid afval die in de Europese Unie wordt geproduceerd, blijkt dat radioactief afval slechts 1% van de totale hoeveelheid industrieel toxisch afval vertegenwoordigt. De grote hoeveelheden industrieel toxisch afval dat in Europa wordt geproduceerd bevatten metalen en chemische bestanddelen die voor onbepaalde duur gevaarlijk zijn voor de mens en milieu. Radioactiviteit van een stof dooft met de tijd uit, en dus ook de mogelijke schadelijke gevolgen voor mens en milieu.

5.2 Kernfusie

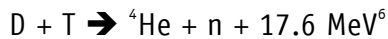
5.2.1 Werking

Bij kernsplitsing worden gesplitste uranium-en plutoniumatomen gebruikt als grondstof voor de opwekking van warmte. Kernfusie, de energiebron van de zon en de sterren daarentegen is het proces waarbij lichte kernen samensmelten tot zwaardere. Er zijn verschillende fusiereacties mogelijk: in sterren wordt vertrokken van het lichtste element -waterstof- en worden zo steeds zwaardere kernen gevormd, een proces dat zich voortzet tot het element ijzer.

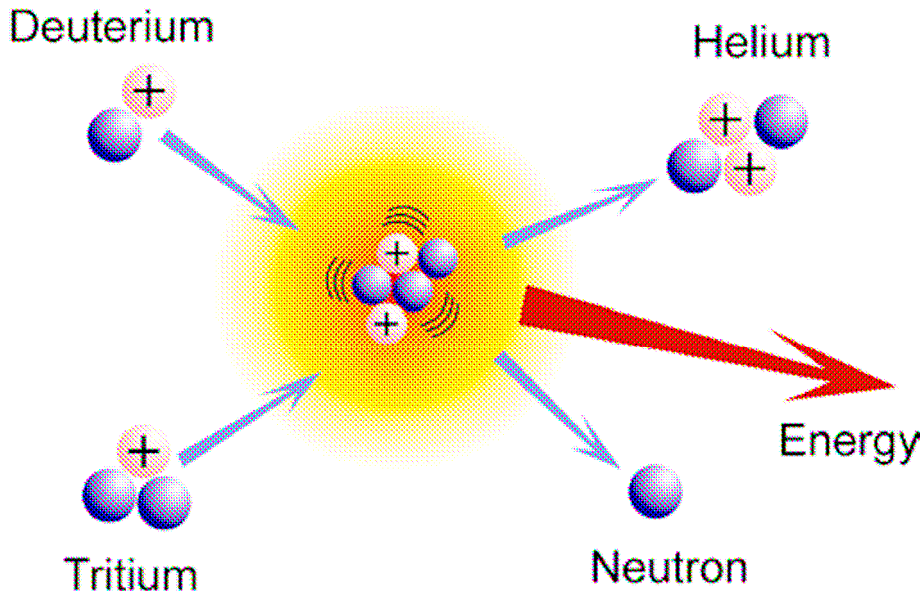
Om een fusiereactie te laten verlopen moeten de atoomkernen zeer dicht bij elkaar gebracht worden. De kernkracht die de protonen (en neutronen) samenhoudt ondanks de elektrische afstoting is immers alleen op korte afstand voelbaar. Van zodra de afstand te groot wordt gaat de elektrische kracht overheersen en gaan de positief geladen kernen elkaar afstoten. Om ervoor te zorgen dat de atoomkernen dicht genoeg bij elkaar komen en met hoge snelheid tegen elkaar botsen, moet de temperatuur tot 150 MK gebracht kunnen worden.

Materie met een dergelijk hoge temperatuur bevindt zich in een bijzondere toestand, plasma of ook wel de vierde toestand van de materie genoemd. In deze toestand bewegen de elektronen en de kernen los van elkaar en vormen een gas van geladen deeltjes. Een plasma gedraagt zich als een turbulente vloeistof, waarin elektrische en magnetische velden een belangrijke rol spelen. Dat maakt plasma tot een ingewikkeld medium dat zeer complex gedrag kan vertonen.

De fusie van waterstofkernen zoals dit gebeurt in sterren is niet geschikt om op aarde te gebruiken omdat dit proces slechts heel langzaam verloopt. De reactie die op aarde gebruikt kan worden is de fusie tussen de waterstof-isotopen deuterium en tritium (zie figuur 2):



Figuur 4: Fusie tussen Deuterium en Tritium



Bron: Westra, Kernfusie, een zon op aarde, 2004

Andere typische fusiereacties zijn

- Fusie tussen een deuterium- en heliumkern
- Fusie tussen twee deuteriumkernen

De temperatuur van het plasma moet ongeveer 150 MK bedragen zodat er voldoende fusiereacties geproduceerd kunnen worden. Bij een fusiereactie komt ongeveer vier miljoen maal meer energie vrij dan bij een chemische reactie, zoals bijvoorbeeld bij de verbranding van koolstof. Dat enorme verschil zorgt er voor dat een fusiecentrale – vergeleken met bijvoorbeeld een kolencentrale – slechts een minimale hoeveelheid brandstof nodig heeft. Om een elektriciteitscentrale van 1 GW (de grootte van een gemiddelde kolencentrale) een jaar lang aan de gang te houden, moet ongeveer 2,7 Mton steenkool worden verbrand. Dezelfde hoeveelheid energie kan in een fusiecentrale worden opgewekt door de fusie van

⁶ 1 MeV= 1,602 10⁻¹³ Joule

slechts 250 kilogram van een deuterium-tritium mengsel. (Kernfusie, een zon op aarde, Westra, 2004).

5.2.2 Grondstoffen

In principe kunnen alle elementen lichter dan Fe als brandstof gebruikt worden voor kernfusie. De elementen die zouden gebruikt worden voor kernfusie op aarde zijn deuterium, tritium en lithium (Kernfusie, een zon op aarde, Westra, 2004).

5.2.2.1 Deuterium

Deuterium is het niet-radioactieve isotoop van waterstof en 0,015% van alle water op aarde bevat deuterium. Het aardoppervlak bestaat voor 2/3 uit water, en de voorraden aan deuterium in de wereldzeeën zijn dan ook enorm: geschat wordt dat er $4,6 \cdot 10^{13}$ ton aanwezig is op aarde. Volledige verbranding van 1 ton deuterium levert een energie-inhoud van $350 \cdot 10^{15}$ J, en de aanwezige reserves zijn dan ook goed voor ongeveer $5,7 \cdot 10^4$ TWh aan energie. In 2002 verbruikte de wereld 1,56 GWh aan energie. De energie-inhoud van het deuterium in het zeewater zou voldoende zijn voor 40 miljard jaar energievoorziening (Kernfusie, een zon op aarde, Westra, 2004).

5.2.2.2 Tritium

Het radioactieve isotoop van waterstof komt niet in de natuur voor. Het kan eenvoudig gemaakt worden door lithium-6 met neutronen te bestralen. Natuurlijk lithium bestaat ongeveer voor 7,4% uit lithium-6. Lithium is aanwezig in een mantel rond het plasma in een fusiecentrale, en het wordt daar bestraald met de neutronen die uit de fusiereactie in het plasma komen (Kernfusie, een zon op aarde, Westra 2004).

5.1.1.1 Lithium

Lithium is een metaal dat overvloedig aanwezig is op aarde. De voorraden worden geschat op 15 miljoen ton in erts, en 200 miljard ton opgelost in zeewater, wat voldoende is om voor respectievelijk 1.000 jaar en 12 miljoen jaar het gehele wereldenergiegebruik te kunnen dekken op het niveau van het jaar 2002.

5.2.3 Voordelen

Zoals vermeld in de bespreking van de grondstoffen zijn de voorraden aan brandstoffen die voor kernfusie gebruikt kunnen worden voldoende aanwezig om de komende $40 \cdot 10^9$ jaar de mensheid van energie te voorzien.

Het radioactieve tritium wordt in het kernfusieproces in de centrale aangemaakt en onmiddellijk als brandstof verbruikt. Deuterium en lithium zijn de enige brandstoffen die de centrale verlaten, en er is dus geen transport van radioactieve brandstoffen nodig. Zou er toch een hoeveelheid tritium ontsnappen dan verdwijnt het door zijn korte halfwaardetijd relatief snel uit het milieu. In het menselijk lichaam heeft het een halfwaardetijd van 10 dagen en zou bij opname weer snel worden uitgescheiden.

Het fusieproces zelf veroorzaakt geen radioactief afval, en er is dus geen vervoer van radioactieve afvalstoffen nodig. Het wandmateriaal van de fusiecentrale wordt echter radioactief tijdens het proces doordat het bestraald wordt met neutronen. De keuze van het materiaal bepaalt de radiologische eigenschappen zoals vervaltime. Tijdens de levensduur van de centrale zal het wandmateriaal door vervanging en ontmanteling een even grote hoeveelheid afval opleveren als een kerncentrale. De aard van het afval is echter zeer verschillend. Na een afkoelperiode (er is geen actieve koeling nodig) van 50 tot 100 jaar is de radioactiviteit een factor 3.000 tot 100.000 lager. Na deze periode is de activiteit van

het afval vergelijkbaar met dat van de as van een kolencentrale (Kernfusie, een zon op aarde, Westra, 2004).

Fusie-energie is een CO₂-vrije energiebron, en ook de uitstoot van andere schadelijk gassen zoals SO₂ en NO_x worden vermeden. Bij het fusieproces komt alleen helium voor als bijproduct, een onschadelijk inert gas.

5.2.4 ITER

ITER of de International Tokamak Experimental Reactor is een internationaal samenwerkingsproject dat als doel heeft de wetenschappelijke en technische haalbaarheid van kernfusie als energiebron aan te tonen. De landen die participeren in dit project zijn Europa, Japan, Canada, China, de Verenigde Staten en de Russische Federatie. De plaats waar ITER gebouwd gaat worden ligt nog niet volledig vast. Momenteel zijn er nog 2 sites over van de oorspronkelijke 4 waartussen gekozen moet worden: Cadarache in Frankrijk en Rokkasho-mura in Japan. Eind 2005 zou beslist moeten worden welk gebied het wordt zodat in 2015 het eerste plasma gebruikt kan worden.

De reactor is een prototype fusiereactor waarin 500 MW aan fusievermogen moet worden geproduceerd in pulsen van 50 minuten. Fusie-experimenten zoals JET (Culham, UK), JT-60 (Naka, Japan), TFTR (Princeton, VS, gesloten in 1997) en de kleinere Europese machines hebben ITER de nodige hoeveelheid kennis fusiefysica en technologische onderbouw gegeven. ITER is de volgende beslissende stap in fusie-onderzoek: het bestuderen van de fysica van de brandende plasma's – die zichzelf onderhouden – en de technologieën aan te tonen en te testen die fusie als veilige en betrouwbare energiebron beschikbaar stelt.

De fysische en technologische kennis die met ITER wordt opgedaan gaat als basis dienen voor de bouw van een demonstratie-elektriciteitscentrale op basis van fusie (DEMO). 35 jaar na het begin van het ITER project zou DEMO netto elektriciteitsproductie kunnen bereiken

en, en fusie kan dan rond het midden van deze eeuw klaar zijn voor commerciële inzet. Dit referentie-tijdpad gaat uit van de parallelle ontwikkeling van geschikte constructieaterialen (ITER 2005; Kernfusie, een zon op aarde, Westra, 2004).

Hoofdstuk 6: Energiebronnen ter vervanging van kernenergie

6.1 Niet-hernieuwbare energiebronnen

6.1.1 Aardolie

De aardolie die wij gebruiken is een koolwaterstof die een hoofdzakelijk biochemische oorsprong heeft. Door sedimentatie werden miljoenen jaren geleden planten en dierlijke organismen op de zeebodem afgezet. Het grootste gedeelte van de aardolie heeft dan ook een mariene oorsprong: 95% van de aardolie is afkomstig uit gebieden waar mariene sedimentatie heeft plaatsgevonden, hetzij in gebieden waar de zee zich reeds lang heeft teruggetrokken (uitgedroogde zeeën), hetzij in gebieden zoals de continentale plaat die zich langs de kust van onze huidige zeeën en oceanen uitstrekt (Hoenraet 1999)

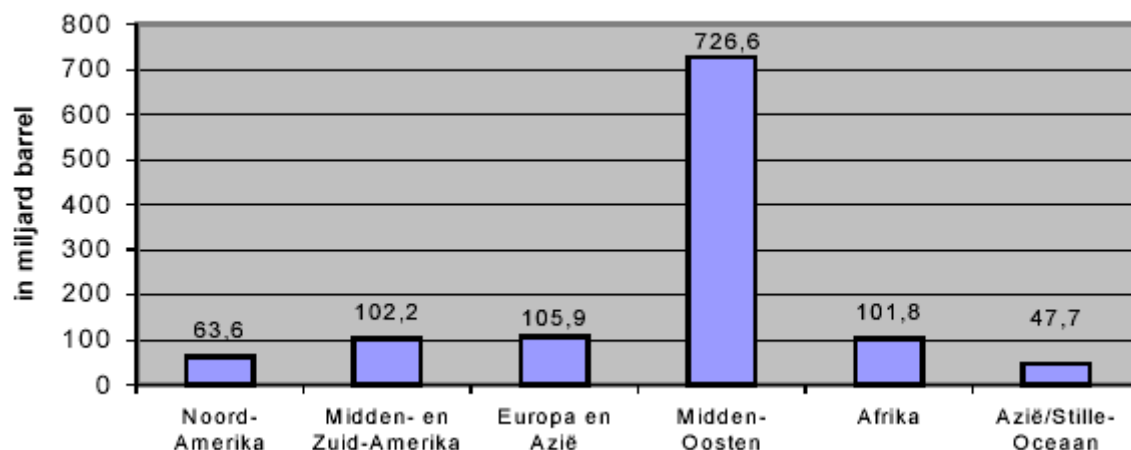
De huidige technologie laat toe om slechts een deel van de aardolie uit de vindplaatsen te halen. Momenteel wordt aardolie gehaald tot op een diepte van 3.000 m, en de kans om dieper nieuwe reserves te vinden is minimaal door de hoge druk en temperatuur. Willen we nieuwe olievelden ontdekken dan zullen we in diep water moeten gaan zoeken. Dit zal echter veel moeilijkheden met zich meebrengen en zal uiteindelijk de kostprijs van aardolie omhoog drijven. Het wereldenergiegebruik stijgt echter zo snel dat de petroleumreserves binnen minder dan 50 jaar uitgeput zullen zijn.

Om reserves aan te geven wordt vaak gebruik gemaakt van Reserves-to-Production (R/P) ratio's. Deze ratio's geven de tijdsduur aan dat de huidige reserves gebruikt kunnen worden om aardolie op te pompen indien de productie het niveau van het vorige jaar blijft aanhouden. Op basis hiervan worden de bewezen aardoliereserves in 2003 geschat op 156,7

miljard ton(25 ton/capita, 156,7 miljard barrel). In termen van jaarproductie in 2003 komt dit overeen met 41 jaar (Federale Overheidsdienst Energie 2003).

De aardoliereserves worden voornamelijk teruggevonden in het Midden-Oosten (figuur x). Hieruit blijkt dat Europa voor aardolie sterk afhankelijk is van andere landen. Deze afhankelijkheid kan grote gevolgen hebben voor zowel het aanbod als voor de prijs.

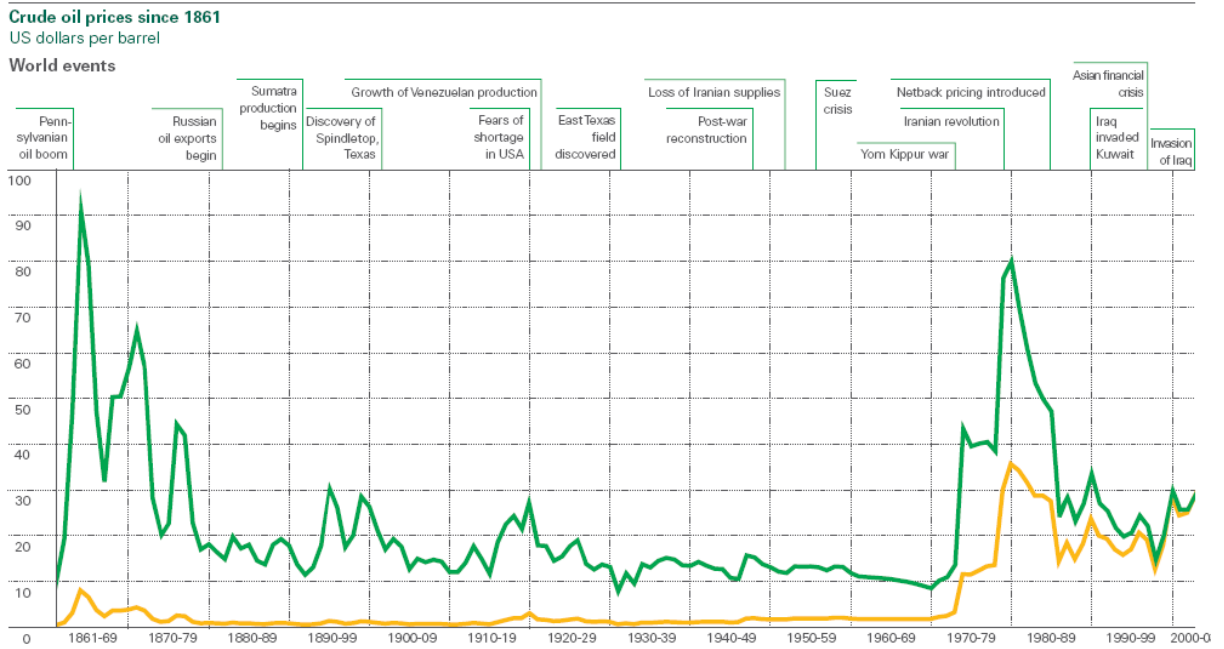
Figuur 5: de mondiale verdeling van de aardoliereserves



Bron: Federale Overheidsdienst 2004

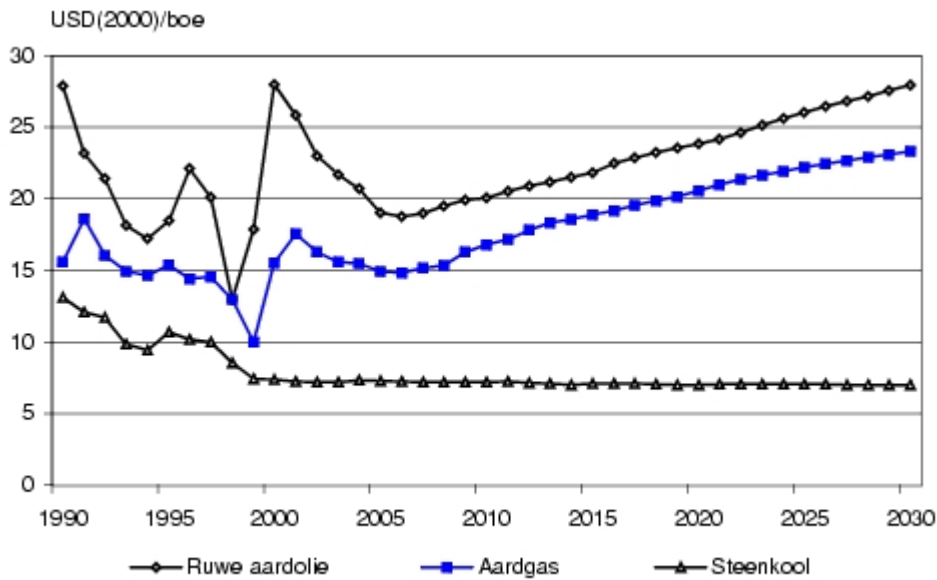
Bij een stijgende olieprijs wordt er uitgegaan van de idee dat het olieaanbod gaat vervangen worden door een toenemend gasaanbod, wat een verdere stijging van de olieprijs zal verhinderen. Echter, door de grote vraag en de gespannen geo-politieke toestand in het Midden-Oosten kende de prijs van een vat ruwe olie een hoogtepunt van 53,32 dollar op de Londense Beurs (De Tijd, 09/03/2005). In figuur 6 zien we dat de olieprijs een voortdurende schommeling kent door gebeurtenissen over heel de wereld. Figuren 7 en 8 pagina 40 en 41 geven een schatting van de internationale prijs voor aardolie tot 2030. Verwacht wordt dat de komende jaren de prijs voor aardolie continu gaat stijgen.

Figuur 6: prijsevolutie van ruwe olie sinds 1861



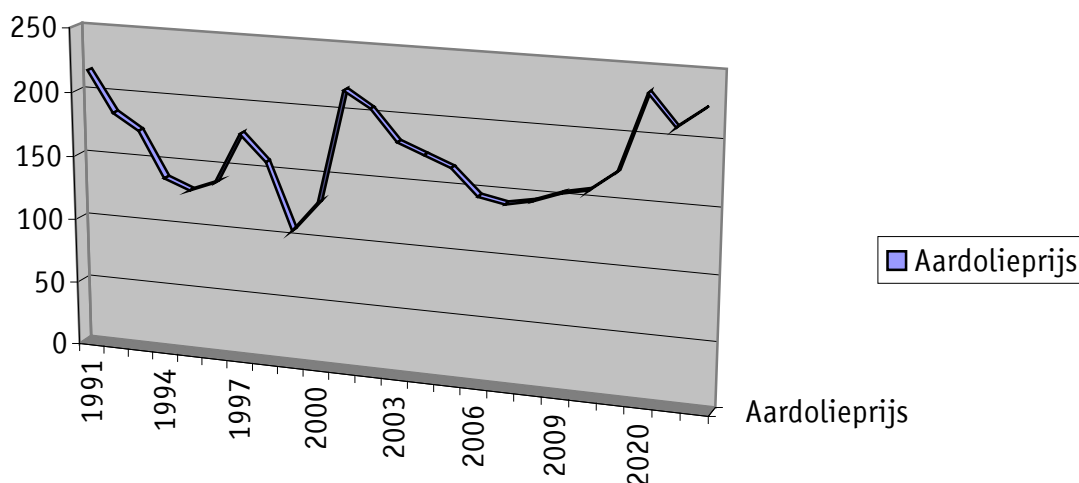
Bron: BP 2005

Figuur 7: Internationale energieprijzen



Bron: Federaal Planning Bureau 2005

Figuur 8: Evolutie internationale aardolieprijs in EUR/toe



Bron: eigen figuur op basis van figuur 7

Vergeleken met steenkool heeft aardolie enkele voordelen. Aardolie is een betere brandstof, want de verbranding van eenzelfde hoeveelheid geeft meer energie. Daarbij verbrandt aardolie zonder stofafgifte, maar het produceert wel dezelfde gassen als steenkool.

In het dagelijks leven worden steeds meer kunststoffen gebruikt, en een leven zonder is vandaag bijna ondenkbaar. De grondstof voor de kunststoffen is meestal aardolie, waardoor we ons moeten afvragen of het verbranden van de huidige beperkte brandstoffen niet te kostbaar is. Andere grondstoffen, waaronder rubber, zijn ook beschikbaar voor de productie van kunststoffen. De prijs van deze grondstoffen ligt echter hoger dan deze van aardolie, waardoor de prijs van de kunststoffen ook zou stijgen.

6.1.2 Aardgas

Aardgas en aardolie worden meestal samen gevonden. Net als aardolie wordt het gevormd uit overblijfselen van zeewier en plankton, die na enkele duizende jaren omgezet werden in een organisch materiaal. Hoge druk en de inwerking van anaëroobe bacteriën zorgden ervoor

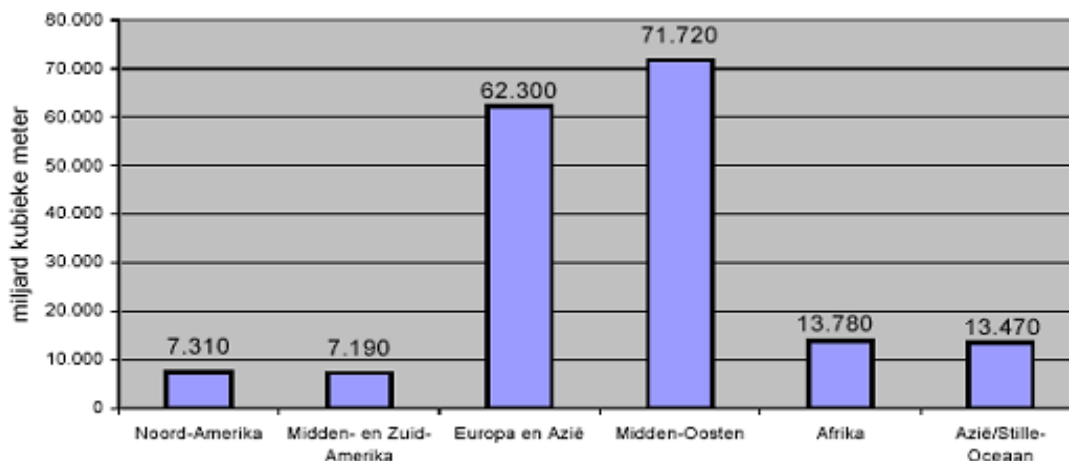
dat dit materiaal zich ontwikkeld heeft tot "bitumen". Op plaatsen waar de druk en de temperatuur zeer hoog konden oplopen werd dit bitumen gekraakt tot zijn kleine samenstellende bestanddelen, en werd uiteindelijk aardgas gevormd. Dit type aardgas wordt het natte type genoemd en wordt gevonden in de Britse en Noorse Noordzee.

Het droog aardgas is gevormd op het land, uit plantenresten. Grote hoeveelheden plantaardig afval werd miljoenen jaren geleden op de grond opgestapeld. Door de bedekking met zand, stenen en organische stoffen liep de druk en de temperatuur zodanig op dat het afval begon te verkolen. Hierbij kwamen gassen vrij, met als voornaamste methaan, dat het belangrijkste bestanddeel van aardgas is. Dit methaangas stapelde zich in de omringende lagen poreus gesteente op (gasbellen) wanneer het op een ondoordringbare laag stootte.

De bewezen aardgasreserves bedroegen 176 Tm³ in 2003, hetgeen overeenstemt in termen van jaarproductie (ratio R/P) met 67,1 jaar, of 3.000m³/capita⁷ voor zover dat het huidig productieniveau wordt aangehouden (Federale Overheidsdienst Energie 2003). In figuur 8 zien we dat deze reserves, net als de aardoliereserves, vooral gelegen zijn in het Midden Oosten. Door de grote reserves in Azië en Europa is de afhankelijkheid van andere landen echter minder groot dan voor aardolie.

⁷ 6 G mensen → 3.000m³/capita

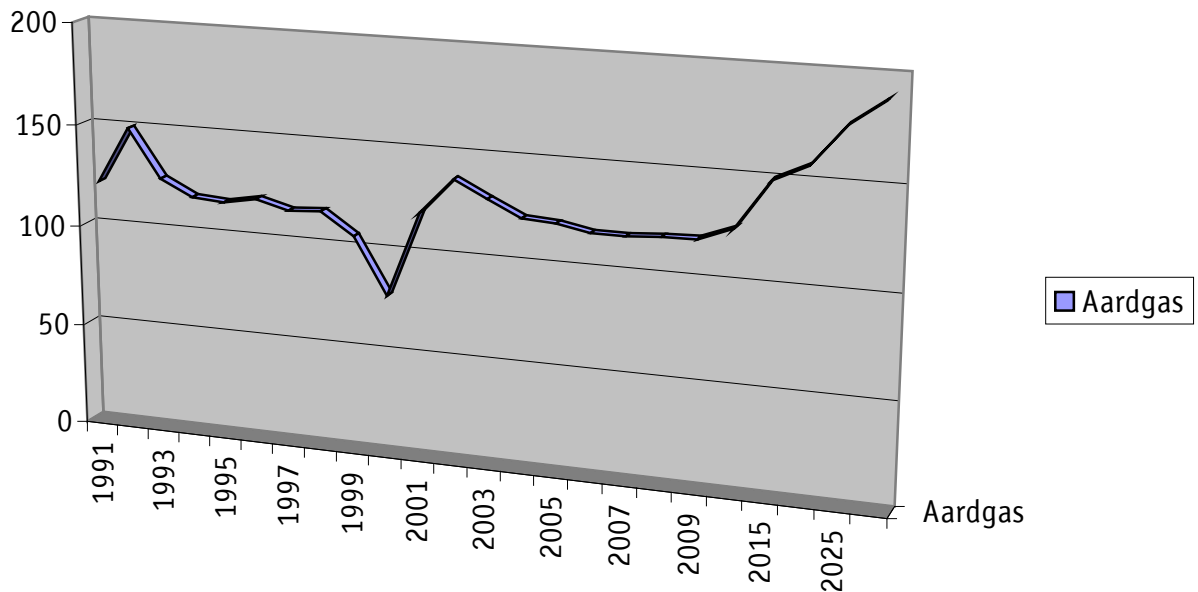
Figuur 9: de mondiale verdeling van de aardgasreserves (in Gm^3)



Bron: Federale Overheidsdienst Energie 2004

De plaatsen waar de aardgasreserves gelegen zijn zijn steeds moeilijker te bereiken, wat in de toekomst gaat resulteren in een hogere exploitatiekost. Diepe offshore reserves en de reserves gelegen op grote afstand en/of in de permafrostzones vereisen een hogere exploitatiekost, wat een verhoging van de prijs tot gevolg heeft. Hierbij moet rekening worden gehouden met de transportkost, die een rechtstreekse invloed heeft op de prijs van het aardgas. Tot hiertoe heeft de aardgasprijs grotendeels de olieprijs gevolgd. Maar door de grote politieke en sociale instabiliteit in de landen waar de grootste reserves gelegen zijn (Midden-Oosten) is het moeilijk om een exacte voorspelling te doen over de evolutie van de aardgasprijs.

Figuur 10: Evolutie internationale aardgasprijs in EUR/toe



Bron: eigen figuur op basis van figuur 7

Figuur 7 pagina 40 en figuur 10 geven de evolutie van de internationale aardgasprijs en een schatting hoe de prijs gaat evolueren tot 2030. Net als de aardolieprijs kent de aardgasprijs continue schommelingen en is nooit echt stabiel geweest. In de grafiek valt duidelijk op dat de aardgasprijs de aardolieprijs volgt. Voor aardgas wordt dan ook verwacht dat de prijs de komende jaren gaat stijgen, net als de prijs voor aardolie.

Vergeleken met andere fossiele brandstoffen is aardgas het minst belastend voor het milieu. Het bevat bijna geen zwavel en er wordt dus bijna geen SO_2 (zure regen) gevormd. Daarbij komt bij de verbranding ervan slechts de helft koolzuurgas vrij als bij kolenstook. De meeste aardgassoorten bestaan hoofdzakelijk uit methaan, en dit is een broeikasgas dat 20 à 25 keer meer effect heeft bij de opwarming van de aarde dan CO_2 .

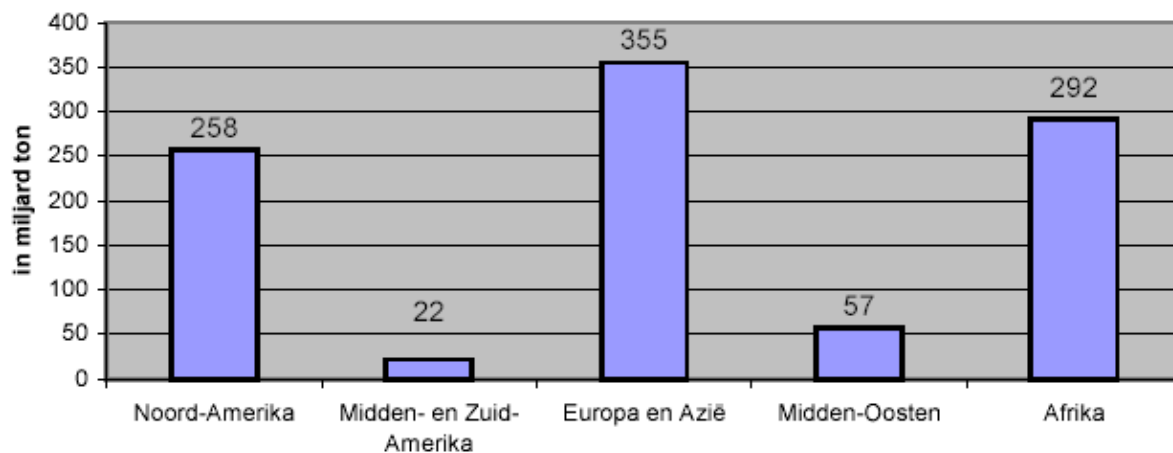
6.1.3 Steenkool

Plantenresten van diverse oorsprong worden normaal door bacteriën afgebroken in een zuurstofrijke omgeving. Is er echter een zuurstofgebrek dan stopt op een bepaald moment deze afbraak en zullen de plantenresten zich gaan ophopen. Eerst wordt er turf gevormd, en door bedekking door steeds dikker wordende aardlagen begint een proces dat inkoling genoemd wordt. De eigenschappen van het materiaal beginnen te veranderen. Het watergehalte vermindert en het koolstofgehalte neemt toe. Turf evolueerde zo geleidelijk naar ligniet (bruinkool) en dan naar steenkool. Hoe lang dit proces duurt hangt af van de druk en de temperatuur waaraan het materiaal wordt blootgesteld. De vorming van steenkool heeft miljoenen jaren geleden plaatsgevonden en de inkoling is een proces dat verschillende duizenden jaren nodig had. Het is dus niet mogelijk om de kolenvoorraden aan te vullen binnen de termijn van het menselijk bestaan.

De bewezen reserves aan vaste brandstoffen worden in 2003 geschat op meer dan 1.000 Gton, hetgeen in termen van productie jaren (ratio R/P) 192 jaar vertegenwoordigt bij een onveranderd productieniveau, of 160 ton/capita (Federale Overheidsdienst Energie 2003). De steenkoolreserves zijn uitzonderlijk groot en theoretisch zijn er voldoende kolen om gedurende verschillende eeuwen de wereldenergievraag te voorzien.

In figuur 9 zien we dat het grootste gedeelte van deze reserves gelegen zijn in Europa en Azië, Noord-Amerika en Afrika. De steenkoolproducenten en -uitvoerders zijn talrijk en bovendien is het merendeel van deze landen gelegen in politiek stabiele gebieden, dit in tegenstelling tot de gebieden met aardolie en aardgas. Drie van de vier belangrijkste uitvoerders, Australië, de Verenigde Staten en Canada behoren bovendien tot de OESO. Door de relatief grote reserves die over meerdere gebieden verspreid zijn is het wegvallen van een producent omwille van politieke en/of sociale conflicten geen groot probleem.

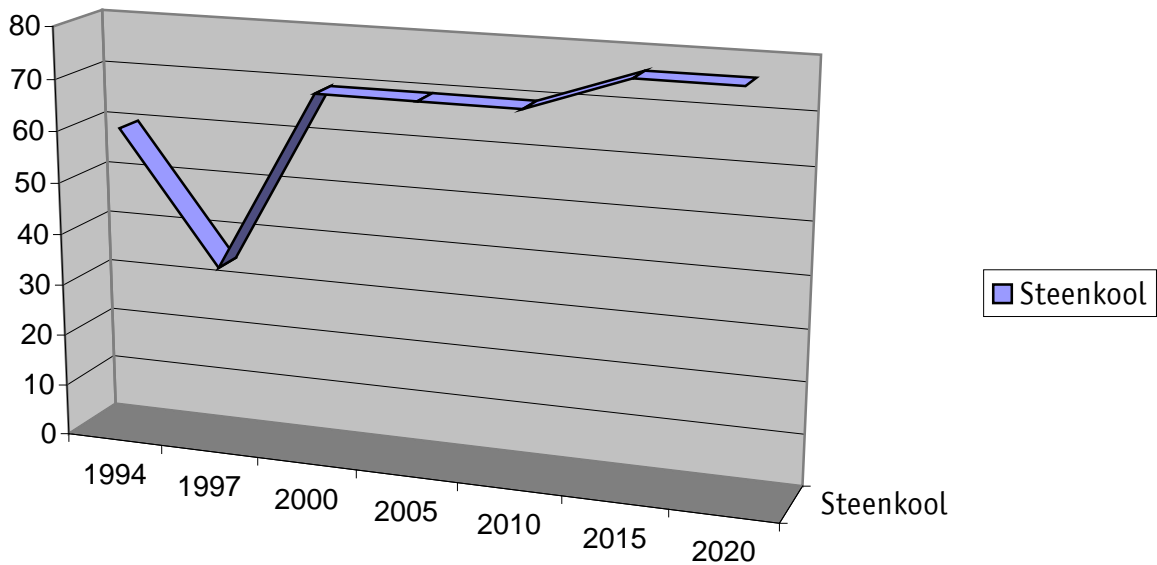
Figuur 11: de mondiale verdeling van de vaste brandstoffen



Bron: Federale Overheidsdienst Energie 2005

Vergeleken met aardolie en aardgas worden er geen grote prijsschommelingen van steenkool verwacht in de nabije toekomst. Dit kan verklaard worden door de grote reserves aan steenkool in tegenstelling tot de andere fossiele brandstoffen. De vraag naar steenkool zal in opkomende economiën zoals China gaan stijgen door de goedkope prijs van de brandstof en de goedkope werking van steenkoolcentrales. Omwille van het vervuilend karakter van de verbranding van steenkool verwacht men echter dat in de toekomst de mondiale vraag naar steenkool zal stagneren en eventueel dalen.

Figuur 12: evolutie steenkoolprijs in EUR/toe



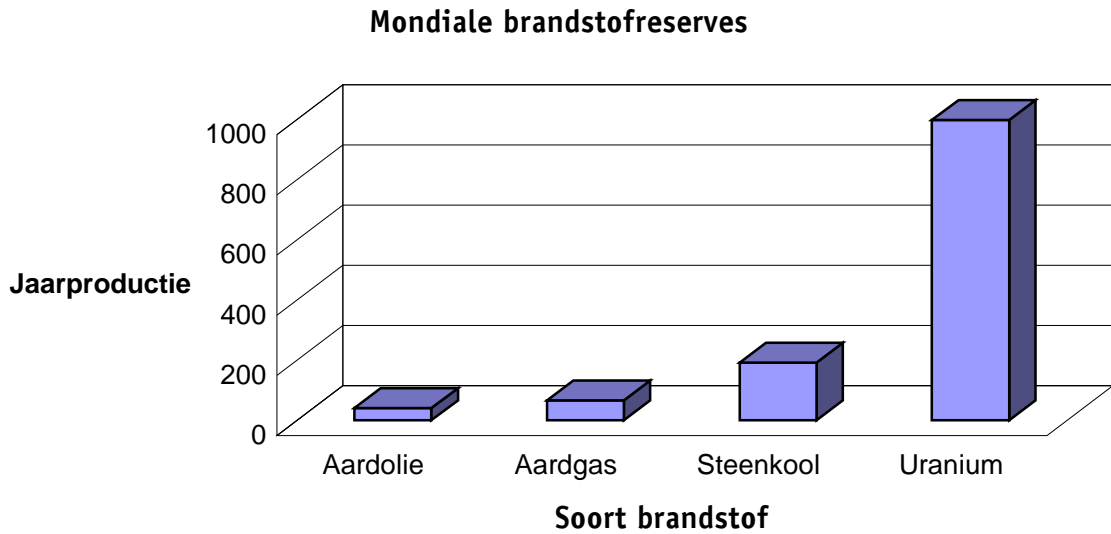
Bron: eigen figuur (cijfers uit AMPERE 2000)

Van alle fossiele brandstoffen is de verbranding van steenkool het meest schadelijk voor het milieu: zuurstofverbruik, emissies van koolzuurgas (broeikaseffect), zwavel- en stikstofoxiden (zure neerslag), roet en stof. De verbranding van grote tonnages kolen leidt tot een aanzienlijke verwarming van de lucht in de steden en de industriegebieden, wat stellig heeft bijgedragen tot een wijziging in het microklimaat van sommige streken. Steenkool is bovendien ook radioactief (Hoenraet 1999).

6.1.4 Fossiele brandstoffen en kernenergie: een overzicht

Als we de reserves van de fossiele brandstoffen en uranium met elkaar vergelijken, blijkt duidelijk dat de uraniumreserves de energiebehoefte voor minstens 250 jaar kunnen voorzien (figuur x). Als we kernenergie volledig zouden vervangen door fossiele brandstoffen zou er binnen 200 jaar een tekort aan energie ontstaan, tenzij er grote vooruitgang zou zijn in de ontwikkeling van alternatieve energiebronnen (zie verder).

Figuur 13: mondiale brandstofreserves



Bron: eigen grafiek

In de grafiek zijn slechts de conventionele uraniumreserves opgenomen. In de toekomst gaat het steeds meer mogelijk zijn om ook gebruik te maken van de niet-conventionele uraniumreserves, waardoor het potentieel van kernenergie gaat stijgen tot meer dan 67.000 jaar! De vervanging van kernenergie door fossiele brandstoffen is dus geen logisch alternatief. Bovendien is zowel steenkool als aardgas en aardolie geen gepast vervangmiddel voor kernenergie willen we de Kyoto norm halen.

6.2 Hernieuwbare energie

6.2.1 Zonne-energie

Net buiten de dampkring van de aarde is het energetisch vermogen van de zonnestraling 1.53 W/m^2 op een vlak, loodrecht op de zonnestraling. Dat wordt de zonneconstante genoemd. Omgerekend per jaar en per m^2 aardoppervlak betekent dit gemiddeld iets minder dan $2.000 \text{ kWh/m}^2\text{jaar}$, en in tegenstelling tot andere energiebronnen is de zonne-energie tamelijk gelijkmatig verdeeld over de planeet. In de Benelux ontvangen wij ongeveer $1.000 \text{ kWh/m}^2\text{jaar}$ (ODE 2005). De intensiteit van de ontvangen straling, aan de grenzen van de atmosfeer, varieert zeer lichtjes in de loop van het jaar als gevolg van de verandering van de afstand aarde-zon. Vooraleer de straling de grond bereikt is zij reeds voor een groot deel verzwakt.

Zonne-energie binnen de dampkring is niet rechtstreeks te gebruiken maar moet omgezet worden, hetzij in de vorm van thermische energie van een technische vloeistof (water, lucht,...), hetzij in de vorm van elektriciteit, hetzij onder een chemische vorm. De opslag van warmte en energie is bij zonne-energie een zeer belangrijk probleem. Enerzijds zijn de verbruiksuren onafhankelijk van de periodes van zonneschijn, anderzijds is de vraag meestal maximaal wanneer de zonneschijn nul ('s nachts) of beperkt (winter) is. Het is ook duidelijk dat het aanbod van zonne-energie gedeeltelijk onvoorspelbaar is, afhankelijk van de bewolking, en gedeeltelijk voorspelbaar door de meetkundig gekende positie van de zon t.o.v. een waarnemer, in functie van de dag en het uur (verschillen in daglengte en zonnehoogte).

Het theoretische aanbod van zonne-energie is gelijk aan 10.000 maal de totale wereldenergievraag per jaar, en komt overeen met de totale straling van de zon die de aarde jaarlijks opvangt. Er moet dus geprobeerd worden om dit aanbod zo goed mogelijk op te vangen en in nuttige energievormen om te zetten tegen aanvaardbare kosten.

De zonne-energie die bekomen wordt kan op verschillende manieren nuttig gebruikt worden: als lichtbron, als drijvende kracht bij natuurlijke ventilatie, voor warmteproductie en voor elektriciteitsproductie.

“Passieve” zonne-energie is de eenvoudigste manier om gebruik te maken van de zon. Door een optimaal gebruik van daglicht kan de rechtstreekse bezonning via de ramen bijdragen aan de ruimteverwarming van woningen. Dit is mogelijk door een doorgedreven isolatie, optimaal ontwerp en oriëntatie van de beglazing, en aandacht voor de zonwering en daglichttoetreding.

Een “actieve” vorm van zonne-energie is actieve thermische zonne-energie(= zonneboiler). Het invallende licht wordt door een zonnecollector opgevangen en gaat dit omzetten in warmte. De warmte wordt dan doorgegeven aan een warmtetransporterende vloeistof, die de zonnewarmte van de collector naar de warmteopslag brengt. Hier wordt de geproduceerde warmte opgeslagen tot het moment dat ze nodig is voor gebruik. In Vlaanderen volstaat de temperatuur in de warmteopslag van een zonneboiler meestal niet voor direct gebruik, en daarom wordt de warmteopslag bijna altijd gekoppeld aan een naverwarming, om zo het door de zon voorverwarmde water op de gevraagde temperatuur te krijgen. De warmtebron die meestal gebruikt wordt voor de naverwarming is aardgas, stookolie of elektriciteit. Deze vorm van zonne-energie wordt vooral gebruikt voor de verwarming van sanitair water en zwembaden.

Een tweede actieve vorm van zonne-energie is het gebruik van fotovoltaïsche zonne-energiesystemen (PV systemen). Het opgevangen licht wordt bij deze methode rechtstreeks omgezet in elektriciteit. Deze elektriciteit kan onafhankelijk van het openbare elektriciteitsnet (autonome systemen) gebruikt worden door zonnecellen in modules te plaatsen. Ofwel kan de stroom geleverd worden aan het openbare net (netgekoppelde systemen).

In de toekomst kan fotovoltaïsche zonne-energie tot een kwart van het totale Vlaamse elektriciteitsgebruik opwekken. Op lange termijn is het één van onze belangrijkste duurzame energietechnieken. De prijzen van deze PV-systemen zijn de laatste jaren voortdurend gedaald, een trend die zich doorzet en versterkt wordt door toenemende massaproductie en door de spectaculaire groei van de wereldmarkt. Bovendien wordt sinds 2000 de aankoop van fotovoltaïsche zonnepanelen voor 50% gesubsidieerd door de Vlaamse Overheid, en 25% door het elektriciteitsbedrijven Electrabel en SPE. In 2001 werd het volledige budget van 0,5 miljoen euro volledig besteed voor een totaal vermogen van 117 kWp⁸. Van deze 117 kWp werd 108 kWp ook effectief gerealiseerd, wat overeenkomt met 92% van de toegekende subsidies.

Voor het jaar 2002 werd het subsidiebudget van de Vlaamse Overheid verdubbeld tot 1 miljoen euro, het budget vanuit de elektriciteitssector verdubbelde evenredig tot 0,5 miljoen euro. Halverwege 2002 was het beschikbare budget reeds besteed aan 118 projecten. Uit de zeer hoge respons op deze subsidieregeling blijkt dat de bereidheid voor het plaatsen van fotovoltaïsche zonnepanelen aanwezig is. Bij een subsidiepercentage van 75% geldt een terugverdientijd tussen 15 en 25 jaar, wat blijkbaar door een groeiend aantal Vlamingen als haalbaar wordt geacht.

De vraag kan dan gesteld worden of deze subsidie verantwoord is. Deze subsidies laten het voor vele gezinnen toe om gebruik te maken van zonne-energie omdat het anders te duur zou zijn. Op deze manier worden externe kosten vermeden door deze gezinnen doordat ze minder gebruik maken van aardolie, aardgas of andere energiebronnen waarvan het gebruik externe kosten met zich meebrengt. Door zonne-energie als energiebron te gebruiken kunnen tussen de 7.392 EUR en 28.512 EUR externe kosten vermeden worden in 2004⁹. Dit weegt weliswaar niet op tegen het subsidiebudget, maar bij dergelijke beslissingen moet ook gekeken worden naar de toekomst. Investerings in zonne-energie kennen vandaag nog een hoge kostprijs, maar op lange termijn kan door technologische vooruitgang de

⁸ 1 kWp stemt gemiddeld overeen met 8 m² en levert gemiddeld 8 GWh/jaar of 0,01%.

⁹ Zie bijlage 2

investeringskost dalen waardoor in de toekomst zonne-energie misschien rendabel kan worden.

Tabel 7: Fotovoltaïsche zonne-energie in Vlaanderen

Jaar	Vermogen (kWp) ⁽¹⁾	Oppervlakte (m ²) ⁽¹⁾	Productie (MWh) ⁽¹⁾
1998	42	340	34
1999	120	1000	96
2000	234	1900	187
2001	342	2700	270
2002 ⁽²⁾	600	4800	480
2003	850	6800	680
2004	1100	8800	880

(1) Deze cijfers zijn cumulatief

(2) De cijfers vanaf 2002 zijn schattingen

Bron: ODE 2003

In België zou het mogelijk zijn om ongeveer 100 GWh/km²/ jaar via zonne-energie te produceren op basis van systemen met 10% rendement. Theoretisch betekent dit dat als we alle zonlicht in België zouden opvangen en omzetten in elektriciteit, we ongeveer 3.000 TWh/jaar zouden kunnen halen via zonnecellen. Dit is uiteraard in praktijk niet haalbaar. Slechts een gering percentage van het oppervlak kan aan zonnecellen besteed worden. Om het vermogen van een grote thermische centrale (1.000 MW) te bereiken, zou een oppervlakte van 25 tot 50 km² moeten bestreken worden met zonnecollectoren (Hoenraet 1999). Dit is mogelijk in grote woestijnbegebieden, maar niet in onze streken. ODE-Vlaanderen schat het praktisch realiseerbaar potentieel voor 2020 op 450 GWh/ jaar voor België, wat overeenkomt met ongeveer 0,5% van de totale elektriciteitsproductie in België¹⁰ (AMPERE 2000).

¹⁰ De jaarlijkse elektriciteitsproductie in België bedraagt ongeveer 82 TWh

6.2.2 Windenergie

Windenergie is een hernieuwbare energiebron die in de ons omringende landen reeds sterk is ontwikkeld. In Vlaanderen echter is tot op heden de toepassing van deze energiebron beperkt gebleven. In 1986 werd het windmolenpark in Zeebrugge (23 turbines) in gebruik genomen om Vlaamse technologie te promoten, en is de meest gekende installatie in ons land. Eind 2000 stonden 44 turbines verspreid over Vlaanderen, die samen 35 GWh produceren en ongeveer 1.800 gezinnen van elektriciteit kunnen voorzien¹¹. Sinds eind 2001 staan er 54 windturbines opgesteld in Vlaanderen (ODE 2002).

Tabel 8: Evolutie windenergie in Vlaanderen

Jaar	Aantal Turbines	Vermogen in MW	Productie in GWh
1997	22	4,575	7,854
1998	24	5,575	10,835
1999	28	8,685	12,705
2000	34	12,285	15,529
2001	44	24,470	34,696
2002	54	30,470	(*)

(*) Cijfers nog niet gepubliceerd

Bron: ODE 2003

De vermelde productiecijfers en het aantal turbines gelden voor de turbines die minstens één jaar in bedrijf zijn. In 2003 bedroeg de productiekost van windenergie tussen 30 EUR/MWh en 125 EUR/MWh (Milieurapport 2005).

Uit tabel x blijkt duidelijk dat er in 2001 een verdubbeling is van de productie ten opzichte van 2000. Het aantal turbines is in 2002 gestegen, dus verwacht wordt dat ook de productie uit windenergie in 2002 gaat stijgen. Daarnaast zijn in 2003 en 2004 een aantal projecten gepland. Het gaat hierbij om 50 tot 70 windturbines voor een totaal vermogen van meer

¹¹ Zie bijlage 3

dan 100 MW. In 2003 hebben de bedrijven C-Power en Zephyr elk een voorstel ingediend voor de bouw van een windenergiepark op de Thornton-bank, een 27 kilometer van de Belgische kust. Beide projecten hebben een maximaal vermogen van 300 MW, wat voldoende is om 300.000 gezinnen een jaar lang van stroom te voorzien (De Standaard, 22 maart 2003). De keuze is gevallen op C-Power. C-Power is een consortium van de baggergroep Dredging International, het Limburgse nutsbedrijf Interelectra, de windturbinebouwer Turbowinds en de Waalse investeringsmaatschappijen Socofe en SRIW Ecotech. Zephyr is een joint venture van Shell en SPE, de Belgische publieke stroomproducent. Verder heeft Electrabel in 2003 4 windparken toegevoegd aan haar reeds bestaande parken. In Wallonië 4 windturbines van 2 MW op de site van Roderhöhe in Butgenbach en 4 turbines van 1,5 MW te Gembloux-Sombreffe. In Vlaanderen kwamen windturbineparken in Rodenhuize en Wondelgem, elk met 2 turbines van 2 MW, in dienst. Windparken in La Roche (4x2 MW), Hoogstraten (6x2 MW) en Perwez (3x1,5 MW) werden in 2004 in gebruik genomen. De komende jaren zijn er nog een aantal projecten gepland, met een gezamenlijk vermogen van ongeveer 200 MW (Electrabel 2003).

Uit al deze projecten blijkt dat windenergie in Vlaanderen een opmars kent. Dit is voor een groot deel het gevolg van het systeem van de groenestroomcertificaten dat sinds 2001 operationeel is.

In 1998 bedroeg de productie van elektriciteit uit wind in België ongeveer 80.000 GWh. Voorspeld wordt dat het installeerbaar vermogen op land tegen 2020 500 MW tot 1.000 MW zal bedragen, met productie van 1.200 GWh/jaar tot 2.400 GWh/jaar. Het installeerbaar vermogen op zee zou tegen 2020 1.000 MW bedragen met een productie van 3.000 GWh/jaar. Vergeleken met de productie in 1998 betekent dit dat tegen 2020 ongeveer 5% tot 6,5% van de totale elektriciteitsproductie uit windenergie zou kunnen gehaald worden (AMPERE 2000).

De Europese Commissie heeft gesteld dat tegen het jaar 2010 12% van de energiebehoefte zal moeten gedekt worden door hernieuwbare energie. Windenergie zal daar een belangrijk

deel van uitmaken. Doelstelling van de European Wind Energy Association, dat gesteund wordt door de Europese Commissie, was de installatie van 4.000 MW tegen het jaar 2000 en 25.000 MW tegen het jaar 2010. Halfweg 1998 overtoft het geïnstalleerd vermogen in Europa deze doelstelling reeds met 2.000 MW. Eind 1998 was er wereldwijd ongeveer 10.000 MW geïnstalleerd, waarvan ongeveer 6.500 MW in Europa. Volgens de aangegeven prognose zou er eind 2003 ongeveer 22.000 MW geïnstalleerd vermogen in Europa zijn en 32.000 MW geïnstalleerd vermogen wereldwijd (AMPERE 2000). Dit is het equivalent van een 20-tal grote nucleaire centrales.

6.2.3 Waterkracht

De mens maakt al een paar duizend jaar gebruik van waterkracht voor verschillende doeleinden. Tot aan de Industriële Revolutie waren watermolens in Vlaanderen vaak de kern van een industrieel bedrijf. Het mechanische vermogen kan vlot omgezet worden tot transporteerbare energie en daardoor bleef waterkracht ook nuttig na de opkomst van elektriciteit.

Het principe van waterkracht is water dat stroomt van hoger naar lager. Het totaal potentieel in Vlaanderen is niet zo groot vanwege het vlakke landschap. In België is het verval niet groter dan 10m. Dit geringe natuurlijke verval kan vergroot worden door het opstuwen van het water in de bedding van rivieren en beken.

Waterkracht in Vlaanderen vinden we vooral onder de vorm van 'kleine waterkracht'. Dit zijn installaties waarbij potentiële energie, aanwezig in de waterloop, wordt omgezet in mechanische energie bij een netto vermogen minder dan 1 MW. Deze grens van 1 MW is vrij te bepalen en is bedoeld om een onderscheid te maken met waterkracht waarbij er grote ingrepen in de waterloop plaatsvinden, zoals het plaatsen van een stuwdam met de vorming van een stuwmeer. Bij kleine waterkracht blijft de ingreep op de waterloop dan ook beperkt tot het plaatsen van een stuw in de waterloop. De gevolgen voor de natuur in de omgeving

van de waterloop zijn hierdoor minimaal. Een voorbeeld van een kleine waterkrachtinstallatie is de watermolen.

De elektriciteitsproductie uit kleine waterkracht is de afgelopen jaren sterk gestegen (zie tabel x).

Tabel 9: Evolutie kleine waterkracht in Vlaanderen

	Vermogen (kW)	Productie (GWh)				
		1997	1998	1999	2000	2001
Totaal	828	1,647	1,687	1,289	2,223	3,027

Bron: ODE 1998

De grootste installaties van kleine waterkracht bevinden zich in Wijnegem (953 MW), Lozen (619 MW) en Bochelt (410 MW). In 2002 zijn er voor kleine waterkrachtcentrales op Vlaamse waterlopen nog een aantal locaties toegewezen met een totale verwachte elektriciteitsproductie van 45 GWh per jaar.

Naast de kleine waterkrachtinstallaties zijn er in België tussen de 35 en 39 waterkrachtcentrales gelegen, die worden aangeduid met de term hydraulische centrale. Wallonië telt de meeste centrales hiervan, en de grootste centrales zijn gelegen aan de Maas.

Tabel 10: Productie via waterkracht in België¹²

Jaar	Productie in GWh
1992	328
1993	251
1994	343
1995	334
1996	238

Bron: AMPERE 2000

In Vlaanderen zijn er anno 1999 3 hydraulische centrales in gebruik: Rotselaar (Dijle, 70 kW), Wijnegem (sluis Albertkanaal, 250 kW) en Hoegaarden (Grote Gete, 33 kW). Voor 1998 waren de productiecijfers respectievelijk 473, 579 en 65 MWh, dus een totaal van ongeveer 1 GW. Sinds 1996 zijn er in België geen nieuwe centrales meer in gebruik genomen, dus kan er gesteld worden dat er vandaag voor ongeveer 100 MW aan geïnstalleerd vermogen bestaat in hydraulische centrales met een gemiddelde jaarproductie van ongeveer 300 GWh (AMPERE 2000).

Er zijn verschillende studies verricht naar de uitbreidingsmogelijkheden van waterkrachtcentrales in België¹³. Als beide studies vergeleken worden kan tot een globaal besluit gekomen worden dat er voor België een bijkomend vermogen van ongeveer 25 MW is met een jaarproductie van 80 GWh. Het aandeel van hydraulische energie in de totale jaarproductie van elektriciteit in België bedroeg in 1998 slechts 0.4%, en een mogelijk bijkomende productie zou slechts 0.1% bedragen. Hydraulische energie komt dus slechts marginaal tussen in de totale elektriciteitsproductie en ook in de toekomst zal dit zo blijven.

Nadeel van de waterkrachtcentrales is hun hoge kostprijs vergeleken met deze van thermische centrales. Een installatie van 1 MW heeft een investeringskost van ongeveer

¹² De productie via waterkracht vindt vooral in Wallonië plaats

¹³ In Vlaanderen studie uitgevoerd door VZW TSAP, in Wallonië door VZW APERE

2.000 EUR/kW, wat neerkomt op een kostprijs van 0.9 EUR/kWh voor de geproduceerde elektriciteit. Voor kleinere installaties met een aantal tientallen kW kan de investeringskost zelf stijgen van 4.500 tot 6.000 EUR/kW, wat leidt tot een kostprijs van ongeveer 210 EUR/MWh tot 280 EUR/MWh.

Hydraulische energie kan niet alleen uit waterkrachtcentrales bekomen worden, maar ook uit getijkkrachtcentrales, uit zeedeining en zeestromingen. Het landschap in België laat echter niet toe deze vormen van waterkracht te gebruiken.

6.2.4 Biomassa

Biomassa kan gedefinieerd worden als 'alle organische materialen en hernieuwbare grondstoffen van plantaardige of dierlijke oorsprong die bestemd zijn voor industriële toepassingen (niet-voeding gebruik) of voor energieopwekking (warmte, elektriciteit, motorbrandstof) (ODE 2002). De basis van biomassa is het fotosynthese-proces, waarbij zonlicht omgezet wordt in biochemische energie.

Zonlicht en CO₂, de belangrijkste elementen in het fotosynthese-proces, zijn in overvloed en gratis aanwezig. Toch is de productiekost van biomassa niet noodzakelijk laag. Er zijn 3 stappen in het proces van biomassa tot energie:

- De productie van biomassa (energieteelten en organische afvalstromen)
- Het oogsten, drogen, transporteren en de opslag van het materiaal
- De omzetting in bio-energie

Afhankelijk van de omzettingstechniek kan biomassa overgaan in warmte, elektriciteit of afgeleide brandstoffen.

Biomassa kan gesplitst worden in 2 groepen, naargelang het geteeld wordt of vrijkomt als reststof.

- Energieteelten: energiegewassen zoals suiker en zetmeel, en korte-omloophout (wilg en populier)
- Organische fracties: houtafval, akker-en tuinbouwresidu's, GFT en Groenafval, mest, waterzuiveringsslib, huishoudelijk restafval, stortgas en organische bedrijfsafvalstoffen.

Tabel 11: Elektriciteitsproductie uit biomassa in België

Bron	Bruto TWh/j	Netto TWh/j	Aandeel % (1)
Energetische culturen	0	0	0
Houtresidu's	0,119	0,119	0,165
Slib uit waterzuivering	0,002	0,002	0,0028
Bermmaaisel	0	0	0
Landbouwresidu's	0	0	0
Huishoudelijk afval (65%)	0,56	0,51	0,71
Stortgas	0,013	0,013	0,018
Industrieel afval	0,004	0,003	0,0041
Mest uit veeteelt	0	0	0
Totaal Biomassa	0,7	0,65	0,9

(1) aandeel in de totale netto elektriciteitsproductie in 1998, zijnde 80 TWh/j

Bron: AMPERE 2000

Het rendement van biomassa is in België minimaal, namelijk slechts 1%. Om het vermogen van een grote thermische centrale van 1.000MW te halen, zou een oppervlakte van 3.000 à 5.000 km² moeten aangelegd worden met biomassa. Via biomassa werd er in 1996 63 GWh elektriciteit en 1,2 TWh warmte opgewekt, wat overeenkomt met 0,07% respectievelijk 1,3% van de totale Belgische productie. Tegen 2020 wil Vlaanderen rond de 3,7 TWh elektriciteit en 3,7 TWh warmte per jaar produceren uit biomassa.

Het is niet eenvoudig om de kostprijs van geproduceerde kWh uit biomassa te bepalen, enerzijds vanwege onvoldoende ervaring, anderzijds vanwege de onduidelijke kostprijs van de gebruikte brandstoffen (afval, slib,...).

De Commissie AMPERE schat het totale technische potentieel voor biomassa op minimum 1,2% en maximum 4,6% van de netto elektriciteitsproductie in 1998. In 2003 is hier slechts 0,8% van gerealiseerd.

6.2.5 Geothermische energie

De aarde kan gezien worden als één grote warmtebron. De bovenste lagen van de aardkorst en de atmosfeer worden verwarmd door de zon, en de rest van de aarde wordt verwarmd door de kern van de aarde, waar de temperatuur waarden tussen de 4.000 °C en 7.000 °C bereikt. Geleiding zorgt ervoor dat deze warmte zich verspreid van het binnenste van de aarde naar het oppervlak. Meer dan 99% van de massa van de aarde heeft dan ook een temperatuur van meer dan 1.000 °C, en slechts minder dan 0,1% van de aarde bereikt temperaturen van 100 °C of minder.

Hoe dieper we in de aarde gaan, hoe hoger de temperatuur. Gemiddeld is er een stijging van 30 °C/km, maar deze geothermische gradiënt verschilt van plaats tot plaats en zelfs volgens diepte. Op bepaalde plaatsen op aarde (bijvoorbeeld Noord-Italië, IJsland, Japan¹⁴) komt gloeiend hete, vloeibare aardmassa (magma) aan het aardoppervlak. In deze vulkanische gebieden komt stoom uit de bodem die gebruikt kan worden voor elektriciteitsproductie. Nadeel is wel dat er gevolgen zijn voor het milieu: de dampen van het magma dat het aardoppervlak bereikt bevat meestal zwavel en andere chemische stoffen.

¹⁴ %-aandeel geothermische energie in totale energieproductie in 2002: IJsland 17%, Japan 0,3%, Italië 1,63% (IEA 2005)

Gebruik maken van geothermische energie in Vlaanderen is niet eenvoudig. In tegenstelling tot de vulkanische gebieden bevinden de warmwaterhoudende grondlagen zich in onze streken op 1.500 m of dieper. Het bouwen van installaties om deze warmte te gebruiken voor elektriciteitsproductie vergt zware investeringen

6.2.6 Groenestroomcertificaten

Op 17 juli 2000 heeft de Vlaamse Overheid het systeem van groenestroomcertificaten goedgekeurd, en op 1 januari 2002 is het in werking getreden. Het systeem is bedacht voor de bevordering van elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen. Er zijn 2 luiken verbonden aan dit systeem: enerzijds krijgen producenten van groene stroom een certificaat toegewezen per productie van 1.000 kWh elektriciteit, anderzijds zijn leveranciers verplicht een bepaald quotum te halen van groenestroomcertificaten. Producenten kunnen deze certificaten gebruiken om te voldoen aan hun quotum als ze ook leverancier zijn, of ze kunnen deze verkopen aan leveranciers die hun aantal nog niet gehaald hebben. In 2004 moet het minimum aandeel van elektriciteit per leverancier gehaald uit hernieuwbare energiebronnen 2% bedragen van zijn totale levering aan elektriciteit. Dit aandeel zal nog stijgen tot 6% in 2010 (VREG 2005).

De certificaten worden worden toegekend door de VREG (Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits-en Gasmarkt) en door de CREG (Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas). Enkel de certificaten toegekend door deze instanties worden aanvaard voor het behalen van het jaarlijks quotum. Groenestroomcertificaten gekocht in het buitenland worden dus niet in rekening genomen voor het jaarlijks quotum. Verder worden alleen certificaten aanvaard die toegekend zijn voor de productie van elektriciteit uit:

- Zonne-energie
- Windenergie

- Waterkracht < 10 MW
- Getijdenenergie
- Golfslagenergie
- Aardwarmte
- Biogas voortkomend uit de vergisting van organisch-biologische stoffen in vergistingsinstallaties of in stortplaatsen
- Energie opgewekt uit de volgende organisch-biologische stoffen:
 - producten, bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw
 - dierlijke mest
 - organisch-biologische afvalstoffen, die selectief ingezameld werden en niet in aanmerking komen voor materiaalrecyclage of worden verwerkt conform de bepalingen van het van toepassing zijnde sectorale uitvoeringsplan
 - organisch-biologische afvalstoffen die gesorteerd worden uit restafval en niet in aanmerking komen voor materiaalrecyclage of worden verwerkt conform de bepalingen van het van toepassing zijnde sectorale uitvoeringsplan
 - het organisch-biologisch deel van restafval, op voorwaarde dat de betrokken verwerkingsinstallatie door energierecuperatie een primaire energiebesparing realiseert van minstens 35% van de energie-inhoud van de afvalstoffen verwerkt in de installatie.

Het quotum dat de leveranciers moeten behalen wordt jaarlijks door de VREG berekend. Voor ieder tekort aan certificaat moet vanaf 31 maart 2005 een boete van 125 euro betaald worden. Deze boetes worden gestort in het Fonds Hernieuwbare Energiebronnen (VREG 2005).

Tabel 12: Gegevens van de verhandelde GSC per inleveringsronde

Periode	Aantal verhandelde groenestroomcertificaten	Gemiddelde jaarprijs (in euro) van één GSC (*)
01/01/2002 - 31/03/2003	94.645	73,85
01/04/2003 - 31/03/2004	155.713	91,18
01/04/2004 - 31/03/2005	226.505	109,01

(*)In de berekening van de gemiddelde prijs zijn de groenestroomcertificaten die aan ELIA werden verkocht aan de minimumprijs, zoals bepaald in het KB van 16 juli 2002, niet opgenomen.

Bron: VREG 2005

Tabel 13 toont aan dat op 2 jaar tijd de prijs per certificaat enorm gestegen is. Afhankelijk van de gebruikte productie-technologie zijn er voor de certificaten minimumprijzen vastgelgd.

Hoofdstuk 7: Toekomstvisie

In 2002 keurde de Federale Ministerraad het ontwerp over de kernuitstap goed, en begin 2003 werd dit voorstel bekrachtigd in een wet. Door deze goedkeuring moet elke bestaande kerncentrale 40 jaar na indienstneming ontmanteld worden en er mogen geen nieuwe kerncentrales worden bijgebouwd. De ratificering van het Kyoto-Protocol en de wet op de kernuitstap plaatsen België de komende jaren voor een uitdaging. Kernenergie verzorgt immers ongeveer 60% van de totale elektriciteitsproductie in België, is vrij goedkoop en heeft een zeer lage CO₂-uitstoot.

Kernenergie zal de komende jaren vervangen moeten worden door alternatieve energiebronnen. Deze zijn echter ofwel beperkt in reserves (niet-hernieuwbare energie) ofwel nog niet rendabel en duur op gebied van investeringen (hernieuwbare energie). Verder heeft het gebruik van niet-hernieuwbare energiebronnen enorme externe kosten tot gevolg. Bij de verbranding van aardgas komen grote hoeveelheden methaan vrij, een broeikasgas dat meer effect heeft dan CO₂ en de verbranding van fossiele brandstoffen leidt tot aanzienlijke emissies van CO₂, zwavel- en stikstofoxiden, roet en stof. De vraag kan dan ook gesteld worden of België de Kyotonorm zal/kan halen door de kernuitstap uit te voeren.

Momenteel zijn er nog zware investeringen nodig om energie te halen uit hernieuwbare energiebronnen. Ook de productiekost per MWh ligt een heel stuk hoger bij alternatieve energiebronnen dan bij kernenergie en niet-hernieuwbare bronnen. Door de goedkeuring van de kernuitstap zal de komende jaren een groot deel van de energieproductie moeten opgevangen worden door aardgas, aardolie en fossiele brandstoffen. Dit leidt tot een grotere uitstoot van broeikasgassen met als gevolg dat het halen van de Kyotonorm een hele opgave wordt.

Maar niet alleen het halen van de Kyotonorm moet in beschouwing worden genomen. Ondanks de zware investeringskost in hernieuwbare energiebronnen en hun lagere

productieopbrengst is het belangrijk dat deze technologieën verder ontwikkeld worden met het oog op volgende generaties. Momenteel zijn er nog voldoende voorraden aan niet-hernieuwbare grondstoffen, maar niet enkel het "nu" telt. Verwacht wordt wel dat tegen 2050 kernfusie beschikbaar is voor commercieel gebruik waardoor er onbeperkt energie kan geproduceerd worden. Het kernfusieproces bevindt zich echter nog in een ontwikkelingsstadium, en met zekerheid voorspellen dat halverwege deze eeuw de energieproblemen opgelost gaan zijn is gevaarlijk.

Daarom is het nodig dat reeds vandaag investeringen worden gedaan in alternatieve energiebronnen, ook al zijn ze nog niet rendabel. De ontwikkelingen van nieuwe technologieën kan het mogelijk maken dat in de toekomst de kost per eenheid geproduceerde energie daalt waardoor investeringen in hernieuwbare energie in de tijd toch rendabel worden.

Hoofdstuk 8: Overzicht van kernenergie in Europa

Onderstaande tabel geeft een overzicht van het gebruik van kernenergie in West-Europa. De landen die momenteel kerncentrales bezitten zijn voorlopig nog niet van plan om deze te sluiten, en de landen die geen kernenergie gebruiken zijn dit ook niet van plan. Naast België willen ook Zweden, Duitsland en Zwitserland zeker stoppen met het produceren van kernenergie. Opvallend is dat de landen die geen kernenergie gebruiken intensief conventionele centrales gebruiken en/of afhankelijk zijn van het buitenland. In totaal voorziet kernenergie 35% van de totale elektriciteitsproductie in West-Europa (Een politiek economische analyse van de afschaffing van kernenergie in België, Ignace de Nollin, 2003).

Tabel 13: Overzicht van het gebruik van kernenergie in de verschillende Europese landen

Finland	Gebruikt reeds kernenergie en wil haar nucleair park verder uitbreiden. Midden 2002 heeft de Finse regering beslist dat er een vijfde kerncentrale mag gebouwd worden. Hiermee wil Finland haar energieonafhankelijkheid verhogen en de CO ₂ -uitstoot verminderen om de Kyoto doelstellingen te bereiken.
Zweden	In 1980 besliste Zweden om 10 jaar later te stoppen met kernenergie en dit op te vangen door energiebesparingen en het gebruik van alternatieve energiebronnen. Ondanks dat deze voorwaarden in 1999 nog steeds niet vervuld waren werd er toch een kerncentrale (600 MW) stilgelegd. Sindsdien voert Zweden elektriciteit ,afkomstig van steenkoolcentrales, in. Wegens het vervuilende karakter van deze centrales is de sluiting van een tweede kerncentrale voor onbepaalde duur uitgesteld. Er zijn momenteel nog een 12-tal centrales en de bevolking is er tegen gekant om deze te sluiten.

Noorwegen	Bezit geen kerncentrales en is ook niet van plan om deze te bouwen. Ze voorziet haar elektriciteit door een groot aantal waterkrachtcentrales en bezit een reeks aardgasbronnen.
Denemarken	Heeft een enorm potentieel aan windenergie en maakt dus geen gebruik van kerncentrales. Ook waterkrachtcentrales aanwezig.
Ierland	Geen kerncentrales, maar wel conventionele centrales.
Groot-Brittannië	Is van oordeel dat kernenergie een noodzakelijk bestanddeel van haar energiebeleid vormt. Heeft een paar jaar geleden een nieuwe centrale in gebruik genomen.
Nederland	Blijft de sluiting van haar enige kerncentrale uitstellen. Ondertussen is er een onderzoek gestart met het oog om plannen te maken voor het bouwen van een nieuwe centrale omdat Nederland niet volledig afhankelijk wil zijn van het buitenland.
Oostenrijk	Maakt geen gebruik van nucleaire centrales. Energie wordt geproduceerd door gebruik te maken van vervuilende conventionele centrales. Ongeveer 68% van haar totale energieverbruik wordt ingevoerd.
Duitsland	Besliste in 2000 dat er geen nieuwe kerncentrales gebouwd mogen worden. Huidige centrales mogen $2,6 \cdot 10^9$ MWh produceren. Hierdoor zullen de meeste centrales tot na 2030 operationeel blijven.

Portugal	Maakt geen gebruik van kernenergie. Naast het gebruik van waterkrachtcentrales hanteren zij ook conventionele centrales.
Zwitserland	In 1998 besliste Zwitserland om haar kerncentrale van Mühleberg te sluiten tegen 2012. Echter in 2000 werd deze beslissing herroepen, voornamelijk onder publieke druk. Dit is wel een geïsoleerd geval, de overige centrales zijn niet ter discussie gesteld.
Spanje	Maakt gebruik van kernenergie en heeft beslist om de huidige toestand te handhaven en pas een beslissing te nemen tegen 2010. toch groeit haar interesse om kernenergie te behouden en eventueel uit te breiden.
Griekenland	Maakt geen gebruik van kernenergie, maar wel van steenkool en aardoliecentrales. Bezit verder het grootste zonnepark van Europa.
Italië	Heeft haar laatste centrale in 1990 gesloten en is al een hele tijd afhankelijk van de invoer van elektriciteit. Een eventuele terugkeer naar kernenergie wordt al enige tijd overwogen, aangezien haar energieafhankelijkheid ten opzichte van het buitenland te groot is.
Luxemburg	Gebruikt geen kernenergie aangezien de haar omringende landen genoeg elektriciteit produceren. Is voor 95% van haar elektriciteitsverbruik afhankelijk van het buitenland.

Frankrijk	Reeds in de jaren 70 resoluut voor kernenergie gekozen om haar energieonafhankelijkheid op te voeren. Momenteel voorziet kernenergie ongeveer 77% van de Franse elektriciteitsvoorziening. Heeft geen plannen om haar nucleair park in te krimpen.
-----------	--

Bron: Een politiek economische analyse van de afschaffing van kernenergie in België, Ignace de Nollin, 2003

Hoofdstuk 9: Algemeen besluit

De centrale onderzoeksvraag die aan het begin van deze eindverhandeling gesteld werd luidde als volgt: **“De kernuitstap en Kyoto: een Externe, Economische en Ecologische analyse. Is op lange termijn en met gelijkblijvende energieconsumptie kernenergie de beste oplossing?”**

Met de ondertekening van het Kyoto-Protocol heeft België zich ertoe verbonden de uitstoot van schadelijke broeikasgassen tegen 2010 met 7,5% te verminderen. Ook de jaren daarna zal het niveau van uitstoot moeten dalen. Geen gemakkelijke opdracht, ook al omdat in 2015 de eerste kerncentrale gesloten moet worden, en vanaf 2040 is er in België geen elektriciteitsproductie via kernenergie meer toegelaten.

De Belgische elektriciteitsproductie wordt vandaag voor meer dan de helft door kerncentrales verzorgd. Op de tweede plaats in de bruto elektriciteitsproductie staat aardgas en dan vaste brandstoffen (steenkool), die samen goed zijn voor ongeveer 37%. Het is duidelijk dat kernenergie een belangrijk onderdeel is van de welvaart die we vandaag ervaren, en het vervangen van kernenergie door andere brandstoffen gaat niet eenvoudig zijn. Hiervoor zijn er verschillende redenen.

Externe kosten veroorzaakt door kernenergie zijn minimaal en zijn de voorbije jaren stabiel gebleven. Het aandeel van de externe kosten die ontstaan door het gebruik van klassieke fossiele centrales met rookgaszuivering, klassieke gascentrales en STEG-gascentrales is de laatste jaren toegenomen. De externe kosten komen steeds vaker naar voren bij het nemen van nationale beslissingen, en hoe lager deze kosten hoe beter.

Het proces dat in kerncentrales toegepast wordt is kernsplitsing. Er zijn drie grondstoffen die hiervoor gebruikt kunnen worden: uranium, plutonium en thorium. Uranium wordt het meeste gebruikt en is een metaal dat overvloedig aanwezig is op aarde. Er is slechts een

kleine hoeveelheid van deze grondstof nodig om 1 MWh elektriciteit te produceren, en door de grote hoeveelheid aanwezige reserves is kernenergie de enige energiebron die quasi onbeperkt aanwezig is. De reserves van niet-hernieuwbare energiebronnen aardolie, aardgas en steenkool zijn in tegenstelling tot uranium beperkt. Geschat wordt dat de aardoliereserves nog ongeveer 41 jaar beschikbaar zijn, aardgas 67 jaar en steenkool 200 jaar. Het opvangen van kernenergie door deze fossiele brandstoffen is dus mogelijk, maar dan zou er binnen 200 jaar een tekort aan energie ontstaan.

Momenteel wordt er intensief onderzoek gedaan naar kernfusie, het omgekeerde proces van kernsplitsing. Er zijn plannen om een prototype fusiereactor te bouwen en optimistische scenario's voorspellen dat tegen 2050 kernfusie klaar is voor commerciële productie. De grondstoffen die voor het kernfusieproces gebruikt worden zijn deuterium en tritium (beide een waterstofisotoop) en lithium (een metaal dat overvloedig aanwezig is op aarde). Van zodra het kernfusieproces gebruikt kan worden voor energieproductie zullen er geen elektriciteitsproblemen meer zijn en zijn er genoeg voorraden aan brandstoffen om de mensheid de komende $40 \cdot 10^9$ jaar van elektriciteit te voorzien.

De prijzen van aardolie en aardgas kenden de voorbije jaren enorme schommelingen, een gevolg van feit dat de meeste reserves gelegen zijn in geo-politiek onstabiele landen. Een exacte voorspelling doen over de evolutie van de aardolie -en aardgasprijs is niet mogelijk, maar verwacht wordt dat er een continue stijging van de prijs gaat zijn. Steenkoolprijzen kenden een minder grote schommeling in het verleden, maar ook hier zien we een stijgende tendens. Door de opkomende economie van China, waar de vraag naar steenkool de komende jaren gaat stijgen, zal de prijs van steenkool waarschijnlijk stabiliseren en misschien zelfs dalen. In tegenstelling tot deze energievormen is de prijs van uranium redelijk stabiel en betrouwbaar, een groot voordeel voor kernenergie omdat zo de prijs van elektrische productie van kernenergie constant kan blijven, wat niet het geval is bij gebruik van fossiele brandstoffen.

Kernenergie stelt ons in staat om de evolutie van CO₂-emissies gunstig te beïnvloeden. Kerncentrales veroorzaken geen uitstoot van CO₂, en door het grote aandeel van kernenergie in de totale elektriciteitsproductie heeft België zijn totale emissie van CO₂ van 31,6 Mt in 1980 kunnen verminderen tot 18,7 Mt in 2003. Elektronucleaire productie heeft ook de uitstoot van SO₂ en NO_x doen afnemen, 2 broeikasgassen die schadelijker zijn dan CO₂.

Naast fossiele brandstoffen is er ook hernieuwbare energie ter vervanging van kernenergie. Alternatieve energievormen die in België gebruikt worden zijn zonne-energie, windenergie, waterkracht, biomassa en geothermische energie. Het grote probleem bij hernieuwbare energie is dat het Belgische landschap niet volledig geschikt is om deze energievormen optimaal te gebruiken.

Zonne-energie in België wordt in 2 vormen gebruikt: thermische zonne-energie of zonneboiler voor warmte en fotovoltaïsche zonne-energie voor elektriciteit. Deze laatste vorm gaat op lange termijn een belangrijke energietechniek worden door de dalende trend van de prijzen van deze PV-systemen. In 2004 is de productie van fotovoltaïsche zonne-energie in Vlaanderen een verwaarloosbaar deel van de totale elektriciteitsproductie in België. Er kan slechts een beperkte oppervlakte worden besteed aan zonnecellen om zonlicht op te vangen. Het maximum realiseerbaar potentieel wordt geschat op 450 GWh/jaar tegen 2020, wat dan nog slechts een aandeel van 0,5% van de totale elektriciteitsproductie betekent.

Windenergie is ondanks zijn beperkte toepassing de belangrijkste alternatieve energiebron in Vlaanderen. De windmolens die in gebruik zijn kunnen momenteel ongeveer 1.800 gezinnen van elektriciteit voorzien, wat ongeveer overeenkomt met 0,03% van het aantal gezinnen in België¹⁵. Er zijn de laatste jaren verschillende projecten gerealiseerd, en ook de komende zijn er nog een aantal projecten gepland. Windenergie kent dus blijkbaar een opmars in Vlaanderen, en optimistische verwachtingen geven aan dat tegen 2020 ongeveer

¹⁵ Ongeveer 10,9 miljoen inwoners, gemiddeld 2,36 personen per gezin (NIS 2005)

5% tot 6,5% van de totale elektriciteitsproductie uit windenergie zou kunnen gehaald worden.

Hydraulische energie vinden we in Vlaanderen voornamelijk terug onder de vorm van kleine waterkrachtinstallaties die op waterlopen geplaatst worden. Elektriciteitsproductie uit kleine waterkracht is de laatste jaren sterk gestegen, en bedroeg in 2001 ongeveer 3 GWh in Vlaanderen. In 2002 zijn er nog een aantal kleine waterkrachtcentrales bijgebouwd met een verwachte productie van 45 GWh/jaar. Naast deze centrales zijn er ook nog waterkrachtcentrales gelegen in België, voornamelijk in Wallonië. Hun gemiddelde jaarproductie bedraagt ongeveer 300 GWh. Ondanks de positieve evolutie van waterkracht in België bedraagt het aandeel van hydraulische energie in de totale elektriciteitsproductie slechts 0,4%, en bijkomende productie zou slechts marginaal bijdragen aan dit aandeel.

Biomassa in Vlaanderen wordt vooral bekomen door gebruik te maken van huishoudelijk afval. Elektriciteitsproductie uit biomassa kende in 1996 slechts een aandeel van 0,9% en Vlaanderen wil tegen 2020 ongeveer 3,7 TWh elektriciteit produceren uit biomassa. Dit zou een stijging van ongeveer 3,5% betekenen.

Ondanks de lage productieopbrengst van alternatieve energie probeert de Vlaamse Overheid elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen te promoten. Om dit te doen heeft ze een systeem van groenestroomcertificaten bedacht. Iedere leverancier van elektriciteit is verplicht een jaarlijks quotum aan deze certificaten te halen, met een boete voor ieder certificaat dat niet behaald werd. Het is mogelijk als leverancier deze certificaten te verkopen aan leveranciers die hun quotum niet halen.

Na de niet-hernieuwbare en hernieuwbare energiebronnen te hebben besproken ben ik van mening dat de kernuitstap in België niet herenigbaar is met het naleven van het Kyoto-protocol. Het halen van de Kyoto-norm tegen 2010 is enkel mogelijk als we onze kerncentrales blijven gebruiken en de productie uit niet-hernieuwbare energiebronnen de komende jaren verminderen.

Vragen voor verder onderzoek

In deze thesis wordt een economische, externe en ecologische analyse gegeven van de verschillende niet-hernieuwbare en hernieuwbare energiebronnen in België. Centraal hierbij is de bespreking van kernenergie, de kernuitstap en het Kyoto-Protocol en wat dit voor België betekend. Zoals bij alle eindverhandelingen het geval is, is ook deze thesis niet volledig af en is er nog ruimte voor verder onderzoek.

Energievoorziening is niet een probleem dat zich alleen in België situeert. Met opkomende economieën in China en Indië staan we pas aan het begin van een heuse energieproblematiek. Onderzoek naar het gebruik van de verschillende energiebronnen en de evolutie van de alternatieve energiebronnen is belangrijk als we de komende generaties veilig willen stellen op het gebied van energievoorziening.

Een onderdeel van deze eindverhandeling was kernfusie. Deze techniek bevindt zich momenteel in een proefperiode en het is belangrijk dat ook België zich gaat engageren om meer te weten te komen hoe deze techniek kan toegepast worden. Doen we dit niet dan bestaat de kans dat we een achterstand gaan oplopen ten opzichte van andere westerse landen en onze energieafhankelijkheid gaat toenemen.

Lijst van de geraadpleegde werken

Literatuur

- BP, **Statistical Review of World Energy**, 2004
- Bulcke B., **EU-Commissie geeft Belgisch Kyoto-plan groen licht**, De Standaard, 20 oktober 2004
- Bulcke B., **EU-lidstaten akkoord om Kyoto-protocol voor juni te ratificeren**, De Standaard, 5 maart 2002
- Commissie voor de Analyse van de Productiemiddelen van Elektriciteit en de Reoriëntatie van de Energievectoren (AMPERE), **Hoofdrapport van de Commissie**, 2000
- CREG, **Jaarverslag 2003**, 2004
- De Standaard 2003, **Rusland ratificeert Kyoto niet**, De Standaard, 2 december 2003
- De Standaard 2005, **Strijd tegen opwarming aarde begint zonder VS**, De Standaard, 14 februari 2005
- De Standaard 2005, **Verandert Kyoto de Wereld?**, De Standaard, 16 februari 2005
- Electrabel, **Kernenergie is niet de oplossing, maar zonder kernenergie is er geen oplossing voor België**, Brussel, 2002
- Electrabel, **Milieurapport 2001**, 2001

- FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, **De energiemarkt in 2001**, Trefpunt Economie, 2003/2-3A, p. 2-13
- FOD Economie, K.M.O., **Middenstand en Energie, De Energiemarkt in 2003**, 2004
- Hoenraet C., **De energiebronnen en kernenergie: vergelijkende analyse en ethische reflecties**, Acco Leuven/Amersfoort, 1999
- Informatieblad van het Belgisch Nucleair Forum, **Nucleaire actualiteit**, juni 2004, jaargang 18, nummer 54
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap en ODE Vlaanderen, **Duurzame energie: wegwijzer 2003**, 2003
- Nollin, I. De, **Een politiek economische analyse van de afschaffing van kernenergie in België**, KU Leuven, Leuven, 2003
- ODE Vlaanderen, **Biomassa**, 2001
- ODE Vlaanderen, **Duurzame energie: wegwijzer 2003**, 2003
- ODE Vlaanderen, **Elektriciteit uit zonlicht**, 2003
- ODE Vlaanderen, **Informatiebrochure inzake de steunregeling 2003 voor fotovoltaïsche zonnepanelen**, 2003
- ODE Vlaanderen, **Kleine waterkracht**, 1998
- ODE Vlaanderen, **Warmte uit zonlicht**, 2001

- ODE Vlaanderen, **Windparken in de Noordzee**, 2002
- Oksana, K., 2004, **The Kyoto Protocol: Universal concern for climate change**, UN Chronicle, 2004, uitgave 3, p. 40
- Westra, M.T., **Kernfusie, een zon op aarde**, 2004
- Wouters A., **België koopt schone lucht in Rusland**, De Standaard, 7 maart 2002

Electronische adressen

- Belcogen: www.belcogen.be/wkk, website geraadpleegd op 10 mei 2005
- BP: www.bp.com, website geraadpleegd op 5 mei 2005
- Electrabel: www.electrabel.be, website geraadpleegd op 8 maart 2005
- ExternE-project: <http://externe.jrc.es/>, geraadpleegd op 7 mei 2004
- Federaal Planning Bureau, www.plan.be, website geraadpleegd op 5 mei 2005
- Federale Diensten voor het Leefmilieu: www.environment.fgov.be, website geraadpleegd op 29 november 2004
- FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, <http://mineco.fgov.be>, meerdere malen geraadpleegd tussen november 2004 en mei 2005
- Greenpeace: www.greenpeace.org, geraadpleegd op 21 maart 2004

- International Energy Agency: www.iea.org, website meerdere malen geraadpleegd tussen november 2004 en mei 2005
- ITER: www.iter.org, website geraadpleegd op 15 februari 2005
- Milieurapport: www.milieurapport.be, geraadpleegd op 7 mei 2004
- Nationaal Instituut voor de Statistiek: <http://statbel.fgov.be>, website geraadpleegd op 14 mei 2005
- Nuclear Research & consultancy Group: www.nrg-nl.com, website geraadpleegd op 15 november 2004
- Studiecentrum voor Kernenergie: www.sck.be, website geraadpleegd op 10 december 2004
- VITO 2004: www.emis.vito.be, website geraadpleegd op 12 februari 2004
- Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek: www.viwta.be, website geraadpleegd op 23 december 2004
- Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits – en de Gasmarkt: www.vreg.be, website geraadpleegd op 24 februari 2005
- Wikipedia Encyclopedie: <http://nl.wikipedia.org>, website geraadpleegd op 26 april 2005

Lijst van de in de tekst opgenomen figuren

Figuur 1: Evolutie wereldenergiegebruik	3
Figuur 2: evolutie van de totale externe kosten over verschillende jaren voor verschillende type centrales	14
Figuur 3: evolutie van de CO ₂ -emissies t.g.v. elektriciteitsproductie in België indien er nooit nucleaire productie zou zijn geweest.....	29
Figuur 4: Fusie tussen Deuterium en Tritium.....	33
Figuur 5: de mondiale verdeling van de aardoliereserves	39
Figuur 6:prijsevolutie van ruwe olie sinds 1861	40
Figuur 7: Internationale energieprijzen	40
Figuur 8: Evolutie internationale aardolieprijs in EUR/toe	41
Figuur 9: de mondiale verdeling van de aardgasreserves (in Gm ³).....	43
Figuur 10: Evolutie internationale aardgasprijs in EUR/toe	44
Figuur 11: de mondiale verdeling van de vaste brandstoffen	46
Figuur 12: evolutie steenkoolprijs in EUR/toe.....	47
Figuur 13: mondiale brandstofreserves	48

Lijst van de in de tekst opgenomen tabellen

Tabel 1: Overzicht externe kosten per eenheid van effectief opgewekte elektriciteit in Vlaanderen over verschillende jaren (in euro/MWh)	15
Tabel 2: Evolutie van het primair energieverbruik	17
Tabel 3: Structuur van de bruto elektriciteitsproductie	18
Tabel 5: de vergelijking van de elektrische produktiekosten in een kerncentrale en een klassieke centrale	28
Tabel 6: Externe kost van verschillende energiebronnen	30
Tabel 7: Fotovoltaïsche zonne-energie in Vlaanderen	52
Tabel 8: Evolutie windenergie in Vlaanderen	53
Tabel 9: Evolutie kleine waterkracht in Vlaanderen	56
Tabel 10: Productie via waterkracht in België	57
Tabel 11: Elektriciteitsproductie uit biomassa in België	59

Bijlagen

Bijlage 1: Reserves

- Ra: aangetoonde reserves. Ze omvatten de geïdentificeerde lagen die technisch en op een economische verantwoorde manier ontginbaar zijn met de huidige technologie.
- Rw: waarschijnlijke reserves. Ze omvatten de geïdentificeerde lagen die in de toekomst, dankzij de technologische vooruitgang, hoogstwaarschijnlijk geologisch, technisch en op een economisch verantwoorde wijze ontginbaar zullen zijn.
- Rb: basisreserves. Som van de aangetoonde en de waarschijnlijke reserves.
- Rm: mogelijke reserves. Ze omvatten de nog niet-geïdentificeerde lagen waarvan het bestaan, op basis van de huidige geologische kennis, met een grote onzekerheid wordt verondersteld.

De levensduur van de aangetoonde reserves wordt als volgt gedefinieerd:

$$TP_i = Ra_i / PR_i$$

Met

- TP_i = levensduur
- Ra_i = aangetoonde reserves
- PR_i = productie
- i = het beschouwde jaar

Bijlage 2: Vermeden externe kosten door gebruik te maken van zonne-energie

Geschatte produktie uit fotovoltaïsche zonne-energie in 2004: 880 MWh.

Per geproduceerde MWh_e wordt in België ongeveer 300 kg CO₂ uitgestoten.

$$\Rightarrow 880 \text{ MWh} \times 300 \text{ kg CO}_2/\text{MWh} = 264 \text{ ton}$$

Dus door gebruik te maken van zonne-energie wordt er jaarlijks 264 ton CO_v minder uitgestoten.

De uitstoot van CO₂ kost tussen 20 à 100 EUR/ton, emissierechten komen neer op 8 EUR/ton CO₂.

$$\Rightarrow 264 \text{ ton} \times 20 \text{ EUR/ton} + 8 \text{ EUR/ton} \times 264 \text{ ton} = 7.392 \text{ EUR}$$

$$\Rightarrow 264 \text{ ton} \times 100 \text{ EUR/ton} + 8 \text{ EUR/ton} \times 264 \text{ ton} = 28.512 \text{ EUR}$$

Bijlage 3: Elektriciteitsvoorziening via windenergie

Elektriciteitsproductie uit windenergie in 2000: 35 GWh

Jaarlijkse elektriciteitsproductie in België: ongeveer 82 TWh

Aantal inwoners in België: 10 M

$$\Rightarrow 82 \text{ TWh}/10 \text{ M inwoners} = 8,2 \text{ MWh/inw}$$

$$\Rightarrow 8,2 \text{ MWh/inw} \times 2,36^{16} = 19,3 \text{ MWh/gezin}$$

$$\Rightarrow 35 \text{ GWh}/19,3 \text{ MWh/gezin} = 1.813 \text{ gezinnen}$$

¹⁶ gemiddeld 2,36 inwoners per gezin (NIS 2005)

Bijlage 4: Gebruikte eenheden en conversiefactoren

- Veelvouden van eenheden
 - ppm = parts per million (= één op één miljoen)
 - kilo $k = 10^3 = 1.000$
 - mega $M = 10^6 = 1.000.000$
 - giga $G = 10^9 = 1.000.000.000$
 - tera $T = 10^{12} = 1.000.000.000.000$

- Joule (J) en Watt (W): de joule is de eenheid voor arbeid, energie of warmtehoeveelheid. De joule is de arbeid die verricht wordt wanneer het aangrijpingspunt van een kracht van 1 newton (N)¹⁷ zich in de richting van die kracht over een meter verplaatst. De eenheid van vermogen is de J/sec = 1 Watt

- kWh (kilowattuur): dit is de energie die vrijkomt wanneer een vermogen van 1.000 Watt gedurende 3.600 seconden werkzaam is. Vermits een joule bepaald is als de energie van een watt, toegepast gedurende een seconde, is een kWh gelijk aan 1.000×3.600 J of 3,6 MJ.

- Toe (ton olie-equivalent): dit is een gewicht aan brandstof met een totale warmte-inhoud van 41,86 GJ. Dit komt overeen met 1 ton aardolie. Er werd internationaal afgesproken om als conversiefactor 42 GJ te gebruiken. De eenheid toe laat ons toe de energiebronnen onderling met elkaar te vergelijken.

- Conversiefactoren:
 - 1 toe = 1,5 ton kolen
 - 1 toe = 3,0 ton ligniet
 - 1 toe = 1.111 m³ aardgas

¹⁷ 1 N = 1 kgm/sec² = eenheid van kracht