



# VU Research Portal

## Maatschappelijke- en milieukosten van elektriciteitsvoorziening. Een notitie voor het platform duurzame elektriciteitsvoorziening

Kuik, O.J.

2007

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Kuik, O. J. (2007). *Maatschappelijke- en milieukosten van elektriciteitsvoorziening. Een notitie voor het platform duurzame elektriciteitsvoorziening*. (IVM Report; No. R-07/04). Dept. of Economics and Technology.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# **Maatschappelijke- en milieukosten van elektriciteitsvoorziening**

**Een notitie voor het Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening**

Onno Kuik

**Finaal Concept**

Rapport R-07/04

Mei, 2007

De opdrachtgever van dit rapport was: Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening  
Het is intern gereviewd door: drs. F.H.Oosterhuis

IVM

Instituut voor Milieuvraagstukken  
Vrije Universiteit  
De Boelelaan 1087  
1081 HV Amsterdam  
Tel. 020-5989 555  
Fax. 020-5989 553  
E-mail: [info@ivm.falw.vu.nl](mailto:info@ivm.falw.vu.nl)

**Copyright © 2007, Instituut voor Milieuvraagstukken**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de houder van het auteursrecht.

## Inhoud

Inhoud	i
Samenvatting	iii
1. Inleiding	1
2. De ExternE methode	3
3. Schatting en waardering van de belangrijkste externe effecten	5
3.1 Klimaat	5
3.2 Gezondheid	7
3.3 Landbouwgewassen	8
3.4 Materialen	9
3.5 Ecosystemen	9
3.6 Microverontreinigingen/zware metalen	9
3.7 Radioactieve straling	10
3.8 Ongevallen/rampen	10
3.9 Levenscyclus	11
4. Technologische veronderstellingen	13
4.1 Elektrisch rendement	13
4.2 Directe emissies	13
4.3 Indirecte emissies	14
4.4 Back-up capaciteit voor hernieuwbare bronnen.	15
4.5 Andere veronderstellingen	15
4.6 Berekeningswijze van externe kosten	16
5. Resultaten	19
6. Effect van locatie op resultaten	25
7. Conclusies	27
Literatuur	29



## Samenvatting

De productie van elektriciteit brengt maatschappelijke en milieukosten met zich mee die in de economie ‘externe’ kosten worden genoemd. De relatieve omvang van deze externe kosten zal in de regel verschillen per wijze van productie. Een belangrijke voorwaarde voor een maatschappelijk optimale elektriciteitsvoorziening is dat haar externe kosten in haar productiekosten geïnternaliseerd zijn. Deze studie geeft op grond van de resultaten van Europees onderzoek naar de externe kosten van elektriciteitsvoorziening en op grond van eigen aannames en berekeningen, een schatting van de externe kosten per kilowattuur van zestien verschillende vormen van elektriciteitsopwekking zoals die in Nederland in de nabije toekomst (2020) zouden kunnen bestaan. Het gaat hier zowel om elektriciteitsopwekking uit fossiele bronnen (kolen, gas) als uit hernieuwbare bronnen (biomassa, wind, zon) en kernenergie. Bij de technieken die gebruik maken van fossiele energie is onderzocht in hoeverre specifieke milieumaatregelen (bijstoken van biomassa, CO<sub>2</sub>-afvang en opslag) de externe kosten verlagen. Bij het berekenen van de externe kosten is zoveel mogelijk rekening gehouden met de hele elektriciteitsketen: van het winnen van primaire grondstoffen tot de afbraak van de centrale. Ook is er geprobeerd rekening gehouden met kwalitatieve verschillen tussen verschillende technieken, met name waar het de continuïteit van de voorziening van elektriciteit betreft.

Vanuit het economisch optimaliteitsbeginsel dient men externe effecten bij de bron te internaliseren. Externe effecten ten gevolge van de winning van steenkool zouden in de kosten van steenkoolwinning geïnternaliseerd dienen te worden. Externe effecten van transport zouden in de kosten van transport geïnternaliseerd moeten worden, etc. De externe effecten van opwekking zouden dan uitsluitend betrekking hebben op de *directe* externe kosten. Maar als de externe effecten elders in de keten niet geïnternaliseerd zijn of binnen afzienbare termijn (vóór 2020) geïnternaliseerd zullen worden, dan levert de schatting van de indirecte externe kosten wel nuttige of in ieder geval interessante informatie op.

Onderstaand diagram geeft een overzicht van de externe kosten per kilowattuur van zestien verschillende voorzieningstechnieken, onderscheiden naar directe en indirecte milieukosten. Directe externe kosten zijn het rechtstreekse gevolg van de opwekking van elektriciteit in de centrale. Indirecte externe kosten ontstaan langs de rest van de keten van winning van grondstoffen, transport, distributie en gebruik. De directe externe kosten variëren van 2,96 €-cent/kWh voor een poederkoolcentrale tot 0,00 €-cent/kWh voor wind en zon. De indirecte externe kosten variëren van 1,19 €-cent/kWh voor een poederkoolcentrale met biomassa bijstook<sup>1</sup> tot 0,11 €-cent/kWh voor kernenergie. De totale externe kosten variëren van 3,97 €-cent/kWh voor een poederkoolcentrale tot 0,16 €-cent/kWh voor wind offshore.

De bijstook van 30 procent biomassa in steenkoolcentrales vermindert hun externe kosten met 13-17%. Voor een poederkoolcentrale verminderen de externe kosten van 3,97 tot 3,34 €-cent/kWh en voor een KV-STEG verminderen ze van 3,52 tot 2,92 €-

---

<sup>1</sup> Hierbij moet wel opgemerkt worden dat vanwege gebrek aan data, alle externe kosten van biomassa indirect verondersteld zijn. Dit is ongetwijfeld niet correct: zie paragraaf 4.3.

cent/kWh. De schatting van de externe kosten van biomassagebruik is vrij speculatief. Nader onderzoek naar de specifieke Nederlandse situatie zou de onzekerheid rond deze schatting kunnen verkleinen.

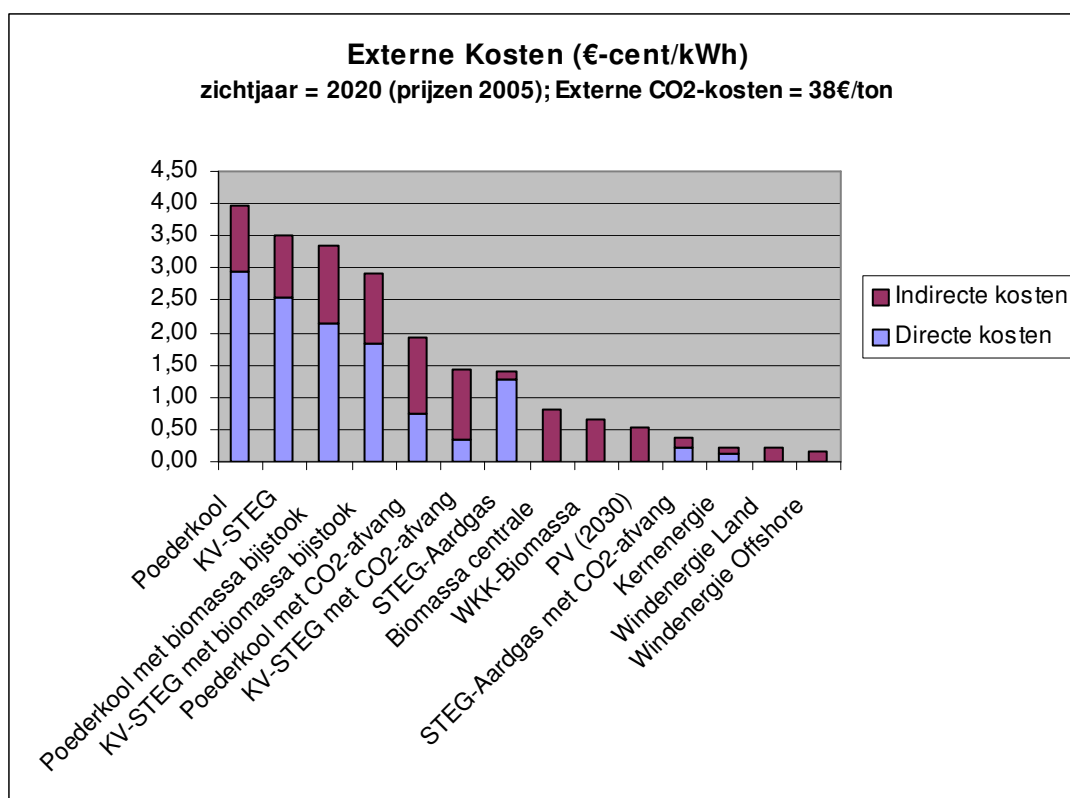
CO<sub>2</sub>-afvang vermindert de totale externe kosten van steenkoolopties met ruim 50 procent (tot 1,94, resp. 1,42 €-cent/kWh voor poederkool en KV-STEG). Hierbij moet wel bedacht worden dat de reductie alleen directe kosten betreft; vanwege het effect van CO<sub>2</sub>-afvang op het elektrisch rendement van de centrales nemen de indirecte kosten per kWh toe. Voor kolentechnologie worden deze indirecte externe kosten in het buitenland gedragen (maar natuurlijk profiteert het buitenland ook van onze reductie in CO<sub>2</sub> uitstoot).

De externe kosten van aardgastechnologie (STEG-Aardgas) zijn 1,41 €-cent/kWh en daarmee vergelijkbaar met de externe kosten van KV-STEG met CO<sub>2</sub>-afvang (1,42 €-cent/kWh). STEG aardgas heeft in onze berekening betrekkelijk geringe indirecte kosten. STEG aardgas met CO<sub>2</sub>-afvang heeft zeer geringe externe kosten (0,37 €-cent/kWh). In onze berekening zijn deze externe kosten zelfs nog geringer dan zon-PV.

Biomassatechnologieën nemen een tussenpositie in tussen de fossiele technologieën en zon, wind en kernenergie. In onze berekeningen bedragen de externe kosten van bio-WKK en een grootschalige biomassacentrale 0,66 en 0,79 €-cent/kWh, maar deze cijfers zijn omgeven door ruime onzekerheidsmarges.

Kernenergie en wind hebben de laagste externe kosten van de onderzochte technologieën. Hierbij moet wel gedacht worden dat er waarschijnlijk een groot verschil is tussen de technische ‘kans-maal-effect’ berekeningen waar de externe kosten van kernenergie in deze studie op zijn gebaseerd en de publieke perceptie van de risico’s van ongevallen en opslag van radioactief materiaal.

De literatuur biedt nog geen duidelijk aanknopingspunt voor een enigszins betrouwbare waarde voor de marginale maatschappelijke kosten van broeikasgasemissies. In deze studie gebruiken we daarom twee verschillende waarden voor de externe kosten van CO<sub>2</sub> emissies die binnen de range van de meeste ramingen uit de literatuur liggen (€38 en €76 per ton CO<sub>2</sub>). Bij een veronderstelde klimaatschade van €76 per ton CO<sub>2</sub> stijgen de externe kosten ten opzichte van die in Figuur S.1, maar verandert de rangorde van de technologieën slechts marginaal.



Figuur S.1 Directe en indirecte externe kosten van elektriciteitsopties (bij klimaatkosten van €38/tCO<sub>2</sub>).

De externe kosten kunnen ook naar de thema's 'klimaat', 'gezondheid', en 'gewas en materiaalschade' uitgesplitst worden. Bij een veronderstelde klimaatschade van €38 per ton CO<sub>2</sub>, bedraagt de klimaatschade ongeveer 70 procent (steenkool) tot 90 procent (aardgas) van de totale externe kosten van standaard fossiele technologieën. Het aandeel van gezondheidsschade in de totale externe kosten is ongeveer 25 procent voor steenkool en minder dan 10 procent voor aardgas.

Op grond van de gegevens, methoden en aannames die in dit rapport worden gebruikt kunnen de externe kosten van verschillende elektriciteitsketens geschat en vergeleken worden. Er bestaan echter nog wel nog grote onzekerheden. Met name met betrekking tot de marginale schade van broeikasgasemissies (bijvoorbeeld CO<sub>2</sub>), de externe kosten van biomassateelt, de waardering van gezondheid, en alle kosten met betrekking tot de aantasting van natuur en landschap. Ook is het de vraag of de gebruikte methode wel gebruikt kan worden om de maatschappelijke waardering van zeer omstreden technologieën zoals kernenergie te ramen.





## 1. Inleiding

In de energietransitie naar een duurzame elektriciteitsvoorziening wil het Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening de maatschappelijke- en milieukosten van elektriciteitsvoorziening duidelijk zichtbaar maken en er bij de overheid op aandringen deze kosten (op termijn) te gaan internaliseren. Het onderhavige onderzoek is er op gericht een overzicht op te stellen van deze kosten.

In overleg met de opdrachtgever is gekeken naar de volgende technieken voor elektriciteitsopwekking:

- Kolencentrale (poeder) met en zonder afvang van CO<sub>2</sub>; en met en zonder bijstook van biomassa;
- Kolencentrale (vergassing) met en zonder afvang van CO<sub>2</sub>; en met en zonder bijstook van biomassa;
- Gascentrale met en zonder afvang van CO<sub>2</sub>;
- Industriële WKK;
- WKK-gasmotor;
- Stadsverwarming;
- Kleine en micro-WKK;
- Bio-energie grootschalig;
- Bio-energie kleinschalig;
- Windenergie – land;
- Windenergie – offshore;
- Zon PV;
- Kernenergie.

De schatting van de externe kosten van elektriciteitsopwekking via deze technologieën is gebaseerd op beschikbare informatie, met name op resultaten uit het Europese ExternE onderzoek en vervolprojecten. De resultaten van het ExternE onderzoek en vervolprojecten worden breed gedragen binnen Europese instellingen (zoals de Raad, de Commissie en het Parlement) en binnen de Europese lidstaten.

Bij de technische aannames over de technologieën zijn we uitgegaan van nieuwe technologieën zoals die naar verwachting rond het jaar 2020 in Nederland in gebruik zullen worden genomen. Deze technische aannames zijn gebaseerd op onderzoek van ECN en RIVM in het kader van het energie-transitiebeleid (Menkveld, 2004; Daniëls en Farla, 2006) en op informatie van de heer Bart Dijkman van NUON.

Naast, en in aanvulling op, gepubliceerde kostenschattingen is ook gebruik gemaakt van het EcoSense model om berekeningen te maken die specifiek zijn voor de Nederlandse situatie. Het EcoSense model is door het Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER) van de Universiteit van Stuttgart ontwikkeld binnen het ExternE onderzoek en bevat de meest recente informatie over de parameters en processen die van invloed zijn op de externe kosten van elektriciteitsopwekking op een gedetailleerd regionaal niveau. Het model wordt gebruikt om de gevoeligheid van de locatie van de elektriciteitscentrale op de resultaten te onderzoeken.

De externe kosten per technologie worden gerapporteerd in Eurocent per kilowattuur-elektrisch (€-cent/kWh).<sup>2</sup>

Het rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 geeft een beknopt overzicht van de geschiedenis van de waarderingmethode ExternE die in deze studie gebruikt wordt. Hoofdstuk 3 beschrijft de manier waarop verschillende externe effecten van elektriciteitsproductie, zoals klimaatverandering en luchtverontreiniging, gewaardeerd worden. Hoofdstuk 4 beschrijft de verschillende technische opties om elektriciteit te produceren en hun invloed op het milieu. Hoofdstuk 5 beschrijft de resultaten van de berekeningen van externe kosten per technologie. De externe kosten worden berekend op basis van gemiddelde Europese omstandigheden. In hoofdstuk 6 wordt gecontroleerd in hoeverre de omvang van de externe kosten gevoelig is voor de specifieke locatie van een elektriciteitscentrale. In hoofdstuk 7 tenslotte, worden enige conclusies getrokken met betrekking tot de gebruikte methode en de resultaten. De Appendix van dit rapport bevat een tabel met gedetailleerde aannames en resultaten per technologie.

---

<sup>2</sup> Een kWh is de arbeid die wordt verricht of de energie die wordt gebruikt als een vermogensbron een kilowatt (1000 watt) gedurende 1 uur moet leveren. Eén kWh is gelijk aan 3.600.000 joule (J). Eén kWh-elektrisch (kWh<sub>e</sub>) heeft betrekking op de levering van *elektrisch* vermogen.

## 2. De ExternE methode

In het kader van het ExternE project is in de jaren '90 van de vorige eeuw een 'bottom-up' methodologie ontwikkeld om de externe kosten van energieketens te ramen, met name de schade aan menselijke gezondheid, landbouwgewassen, materialen en klimaat ten gevolge van de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen en broeikasgassen bij elektriciteitsproductie. Met externe kosten van economische activiteiten worden maatschappelijke kosten bedoeld die niet door de producenten of consumenten van een product worden gedragen, zie Kader 2.1. Waar verder in dit rapport over 'externe kosten' wordt gesproken worden altijd deze *maatschappelijke* kosten bedoeld.

Aan de ontwikkeling van ExternE hebben zo'n dertig Europese onderzoeksinstituten bijgedragen. Het project werd gefinancierd uit onderzoeksfondsen van de Europese Commissie. Het eigenlijke ExternE project duurde van 1991 tot 1997 en produceerde in 1997 nationale ramingen van externe kosten van energieketens voor verschillende Europese lidstaten, waaronder voor Nederland. De ontwikkeling van de ExternE methodologie is na 1997 doorgegaan in diverse Europese projecten.

### *Kader 2.1 Externe kosten van energieketens: een begripsbepaling*

Fuel cycle externalities are the costs imposed on society and the environment that are not accounted for by the producers and consumers of energy, i.e. that are not included in the market price. They include damage to the natural and built environment, such as effects of air pollution on health, buildings, crops, forests and global warming; occupational disease and accidents; and reduced amenity from visual intrusion of plant or emissions of noise. Traditional economic assessment of fuel cycles has tended to ignore these effects. However, there is a growing interest in adopting a more sophisticated approach involving the quantification of these environmental and health impacts of energy use and their related external costs.

Bron: ExternE webpagina. URL: <http://www.externe.info/>

De vervolprojecten hebben de methode verfijnd en schaderamingen up-to-date gebracht met de meest recente inzichten uit de literatuur. Ook is de methode op meer ketens toegepast (zowel nieuwe fossiele en hernieuwbare ketens) en in meer landen, met name in de nieuwe lidstaten. Ook is er getracht om steeds meer externe kosten te onderscheiden en te ramen, met wisselend succes. De externe kosten door verzuring en eutrofiëring van natuurlijke ecosystemen kunnen nog steeds niet bevredigend geraamd worden, al worden hier wel pogingen toe ondernomen. Dit geldt ook voor landschappelijke kosten, in het bijzonder de schade door horizonvervuiling. In verschillende projecten is er aandacht besteed aan voorzieningszekerheid als 'extern effect'.

In het oorspronkelijke ExternE project lag de nadruk erg op de schade door luchtverontreiniging als gevolg van elektriciteitsopwekking in de centrale en minder op de externe kosten die in eerdere en latere fases van de energieketens worden veroorzaakt. De belangrijkste reden hiervoor was dat er nog onvoldoende gedetailleerde levenscyclusdata voorhanden waren. Het ExternE-Pol project van 2002 tot 2004 heeft een belangrijke stap gemaakt door de ExternE ramingen te combineren met gedetailleerde levenscyclusdata

voor een groot aantal energieketens. In het huidige onderzoek wordt veel gebruik gemaakt van de resultaten van ExternE-Pol (Dones *et al.*, 2005) en andere bronnen die informatie geven over de maatschappelijke- en milieueffecten langs de hele keten: van winning en transport van de primaire energiegrondstoffen en bouw van de centrale, tot verbranding in de centrale en uiteindelijk zelfs tot de afbraak van de centrale.

### 3. Schatting en waardering van de belangrijkste externe effecten

In dit hoofdstuk zullen de verschillende externe kostenposten die in het ExternE werk zijn onderscheiden kort de revue passeren. Per kostenpost wordt aangegeven op welke manier hij wordt veroorzaakt, hoe hij wordt geraamd, wat de orde van grootte is en wat de belangrijkste onzekerheden zijn. De monetaire kosten per eenheid uitstoot worden weergegeven voor gemiddelde Europese condities.<sup>3</sup>

#### 3.1 Klimaat

Tegenwoordig zijn het klimaatvraagstuk en het energievraagstuk nauw met elkaar verweven. In Nederland en elders in Europa speelt de uitstoot van broeikasgassen, waaronder koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), een belangrijke rol in het denken over de toekomst van de energievoorziening. De maatschappelijke kosten per eenheid uitstoot van een broeikasgas is gelijk aan de contante waarde van alle toekomstige schade ten gevolge van de opwarmende werking van dit volume broeikasgas over de levensduur van het broeikasgas in de atmosfeer. Vanwege het feit dat deze levensduur lang is (voor CO<sub>2</sub> meer dan 100 jaar) en vanwege het feit dat de schade zich niet beperkt tot een afgebakend gebied, maar in principe mondiaal is, is een raming van de marginale kosten omgeven met grote onzekerheden. Studies van de afgelopen vijftien jaar hebben ramingen gepresenteerd van *minus* € 1,5<sup>4</sup> tot *plus* €455 per ton CO<sub>2</sub> (Tol, 2005). Niet alle studies zijn even wetenschappelijk. Als alleen de *peer-reviewed* wetenschappelijke studies worden meegeteld is het gemiddelde € 14 per ton CO<sub>2</sub> met een 95% betrouwbaarheidsinterval van *minus* € 2,5 tot *plus* € 67 per ton CO<sub>2</sub>.

Op grond van een uitgebreide review van studies (Watkiss en Downing, 2007) heeft de regering van het Verenigd Koninkrijk onlangs een indicatieve rekenwaarde voor CO<sub>2</sub> emissies van £ 70 per ton C (= € 28 per ton CO<sub>2</sub>) voor projectevaluaties vastgesteld (zie ook Watkiss, 2006). De meest recente raming is die van Sir Nicholas Stern voor de Britse regering. Op grond van een uitgebreide literatuurstudie suggereert Stern een waarde van € 85 per ton CO<sub>2</sub> (Stern, 2006).

De hierboven genoemde bedragen gelden voor de externe kosten van een eenheid uitstoot *op dit moment*. Er bestaat enige wetenschappelijke consensus over de veronderstelling dat de marginale kosten voor toekomstige uitstoot (bijvoorbeeld uitstoot in 2020) hoger zullen zijn dan de marginale kosten voor huidige uitstoot (uitstoot in 2007). Dit heeft er mee te maken dat marginale kosten verondersteld worden toe te nemen bij een hogere concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer.<sup>5</sup> Op grond van huidige inzicht-

---

<sup>3</sup> Hier wordt in Hoofdstuk 6 van dit rapport op teruggekomen.

<sup>4</sup> Minus: dat wil zeggen netto baten in plaats van kosten.

<sup>5</sup> Het netto economisch effect van klimaatverandering is de resultante van positieve en negatieve effecten. Op korte termijn (bij lagere concentraties) zijn positieve effecten (bijvoorbeeld op landbouw in koudere klimaatzones en gezondheidsproblemen door koudstress) relatief belangrijk. Op langere termijn (en bij hogere concentraties) gaan negatieve effecten steeds meer domineren.

ten (en afhankelijk van het veronderstelde uitstootscenario) nemen de externe kosten ongeveer met 1 á 2 procent per jaar toe.<sup>6</sup>

Belangrijke oorzaken voor de grote verschillen in ramingen betreffen het veronderstelde effect van broeikasgasconcentratie op het klimaat<sup>7</sup> en veronderstellingen over de hoogte van de discontovoet om de contante waarde van toekomstige schades te berekenen en veronderstellingen over de relatieve waarde van schade (in termen van welvaart of nut) voor rijke en arme landen (en mensen). Ook verschillen de ramingen in de mate waarin verschillende mogelijke effecten zijn gekwantificeerd en gewaardeerd. In het algemeen kan gesteld worden dat geen van de ramingen alle mogelijke effecten van klimaatverandering hebben gewaardeerd. In hoeverre dat in bestaande studies tot een onderschatting van de externe kosten heeft geleid is zelfs bij benadering niet te bepalen. De hoge raming van Stern is enerzijds het gevolg van zijn poging om zo volledig mogelijk te zijn met betrekking tot mogelijke effecten van klimaatverandering, maar anderzijds ook het gevolg van aannames over het effect van broeikasgassen op het klimaat, discontovoet en de relatieve waarde van klimaatschade tussen rijke en arme landen.

Men kan de ‘kosten’ van CO<sub>2</sub> uitstoot ook benaderen door een schatting te maken van de marginale bestrijdingskosten voor huidig en toekomstig klimaatbeleid of door de preferenties van de bevolking te meten, zoals die bijvoorbeeld tot uiting komen in referenda over klimaatbelastingen. In de loop van de tijd zijn de CO<sub>2</sub> kosten dientengevolge nog al eens aangepast. In de NewExt studie (2004) werd op grond van de diverse benaderingen een centrale waarde van € 19 per ton CO<sub>2</sub> voorgesteld voor uitstoot in de periode 2001-2010. De waarde ligt aan de bovengrens van de (destijds) geschatte waarde van bestrijdingskosten voor EU15 landen in het kader van het Kyoto Protocol (€ 5-20/tCO<sub>2</sub>) en is ook overeenkomstig het rekenkundig gemiddelde van de betalingsbereidheid van de Zwitserse bevolking voor een klimaatbelasting, zoals tot uiting komend in een drietal referenda (zie NewExt, 2004).

In recent onderzoek worden ook hogere CO<sub>2</sub>-prijzen toegepast. In een rapport voor de Duitse regering gaan Krewitt en Schlomann (2006) bijvoorbeeld uit van marginale kosten van CO<sub>2</sub>-uitstoot van € 70/tCO<sub>2</sub>, onder verwijzing naar ramingen van de Duitse Wetenschappelijke Raad voor Mondiale Milieuverandering (WBGU) voor vermijdingskosten bij een concentratieplafond van 450 ppm CO<sub>2</sub>-equivalent (die weer samenhangt met de 2°C doelstelling van de Europese Raad).

De literatuur biedt dus geen duidelijk aanknopingspunt voor een enigszins betrouwbare schatting voor de marginale maatschappelijke kosten van broeikasgasemissies. In deze studie gebruiken we daarom twee verschillende waarden die binnen de range van bovengenoemde ramingen liggen. Ook houden we er rekening mee dat we voor ons doel – de raming van externe kosten van elektriciteitsvoorziening rond het jaar 2020 – er van moeten uitgaan dat de marginale kosten van broeikasgasemissies naar alle waarschijnlijkheid

---

<sup>6</sup> De Britse indicatieve rekenwaarde van £ 70/tC geldt voor het jaar 2000. In projectevaluaties dient de rekenwaarde voor latere uitstoot gecorrigeerd te worden via een stijging van £ 1 per jaar. Dus in 2030 zouden de externe kosten £ 100/tC (≈ € 40/tCO<sub>2</sub>) zijn.

<sup>7</sup> Gewoonlijk uitgedrukt in gemiddelde mondiale temperatuurstijging ten gevolge van een verdubbeling van de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer ten opzichte van het pre-industriële niveau.

hoger zijn dan op dit moment. We gebruiken twee verschillende waarden. De ene waarde is tweemaal de huidige centrale waarde in ExternE (€ 19/tCO<sub>2</sub>), dus € 38/tCO<sub>2</sub>. Deze waarde komt (ongeveer) overeen met de indicatieve rekenwaarde voor toekomstige CO<sub>2</sub> emissies van de Britse regering (zie voetnoot 6). Als alternatieve waarde nemen we tweemaal deze waarde, dus € 76/tCO<sub>2</sub>. Deze waarde komt (ongeveer) overeen met schattingen van Krewitt en Schlomann (2006) en Stern (2006).

Het is een aparte vraag in hoeverre de marginale kosten van broeikasgasemissies *extern* zullen zijn. Dit ligt eraan in hoeverre ze via heffingen of via een emissiehandelssysteem *geïnternaliseerd* zullen zijn in de prijs van elektriciteit. In de berekeningen in dit rapport worden de totale marginale kosten van broeikasgasemissies tot de externe kosten gerekend.

### 3.2 Gezondheid

Negatieve effecten van elektriciteitsproductie op de menselijke gezondheid kunnen worden veroorzaakt door fijn stof (primair en secundair), schadelijke gassen en microverontreinigingen die vrijkomen bij verbrandingsprocessen en radioactieve straling.<sup>8</sup> De ExternE methodologie maakt gebruik van diverse blootstellingseffect relaties uit de medisch-wetenschappelijke en epidemiologische literatuur. Bij de waardering van de effecten wordt onderscheid gemaakt tussen vervroegd overlijden en (niet-fatale) gezondheidsklachten. De economische schade door vervroegd overlijden wordt gemeten met behulp van de betalingsbereidheid (*wtp*: *willingness to pay*) van mensen voor het verminderen van het risico van overlijden.<sup>9</sup> Er zijn grofweg twee alternatieve benaderingen: 1) de waarde van een statistisch leven (*vsl*: *value of a statistical life*) waarin de *wtp* van verminderde kans op overlijden wordt gemeten, en 2) de waarde van een statistisch levensjaar (*voly* of *yoll*: *value of life year lost*) waarin de *wtp* van een verandering in de kans op het overleven van een extra jaar wordt gemeten. In de ExternE methodologie is er geleidelijk aan een voorkeur ontstaan voor de tweede benaderingswijze, de *voly*, hoewel deze voorkeur niet door alle wetenschappers wordt gedeeld.<sup>10</sup> Op grond van uitgebreide literatuurstudies wordt op dit moment een waarde van € 50.000,- per levensjaar gehanteerd. In recent onderzoek van de Europese Commissie naar de kosten en baten van de aanscherping van Europese luchtkwaliteitseisen heeft men echter, na kritiek van externe wetenschappelijke experts op de *voly* benadering, gezondheidsbaten op beide manieren geraamd. De *vsl* manier leverde grofweg twee maal zo grote baten op als de *voly* manier.

---

<sup>8</sup> Microverontreinigingen en straling worden in de paragrafen 3.6 en 3.7 besproken.

<sup>9</sup> In oudere studies werd het risico van vervroegd overlijden ook wel gewaardeerd tegen gederfde inkomsten. Uit welvaartstheoretisch oogpunt is deze maat niet correct. In het geval van vervroegd overlijden ten gevolge van luchtverontreiniging biedt deze maat ook praktisch weinig houvast omdat men aanneemt dat het overgrote deel van de slachtoffers de pensioengerechtigde leeftijd al (ruimschoots) heeft overschreden.

<sup>10</sup> De discussie is te ingewikkeld om in het kort weer te geven. Een belangrijke punt is dat als men aanneemt dan mensen een vaste waarde aan levensjaren toekennen, de waarde van een statistisch leven (*vsl*) met leeftijd moet afnemen (omdat er statistisch gezien steeds minder jaren in het vooruitzicht zijn bij het stijgen van de leeftijd). In empirisch onderzoek heeft men echter geen duidelijke negatieve relatie tussen leeftijd en *vsl* aangetroffen.



Niet-fatale gezondheidsschade wordt onderverdeeld in een aantal aandoeningen die afzonderlijk gewaardeerd worden. Tabel 3.1 bevat een aantal voorbeelden. De raming van de niet-fatale gezondheidsschade is minder controversieel dan de raming van de fatale gezondheidsschade. De monetaire waardering is gedeeltelijk gebaseerd op medische behandelingskosten en inkomstenderving ('cost-of-illness') en deels op ramingen van individuele *wtp* om bepaalde ziekteverschijnselen te vermijden.

Tabel 3.1 Enkele voorbeelden van gezondheidsschade door luchtverontreiniging.

Agent	Impact	Monetaire waarde per geval (€ <sub>2000</sub> )
PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>	Ziekenhuisopname vanwege luchtwegaandoeningen	4.320
PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub>	Dag met activiteitenbeperking (volwassenen)	110
PM <sub>10</sub> , CO	Hartaanval (mensen > 65 jaar)	3.260
PM <sub>10</sub>	Ziekenhuisopname vanwege beroerte	16.730
	Gevallen van chronische bronchitis	169.330
	Gevallen van chronische hoest bij kinderen	240
	Astma-aanvallen	75
	Ademhalingsproblemen	8
O <sub>3</sub>	Astma-aanvallen	75
	Symptoomdagen	45

Bron: NewExt (2004)

In de berekeningen in dit rapport gaan we uit van de volgende gemiddelde monetaire waarden voor gezondheidseffecten per ton vervuilende stof. Deze waarden betreffen de huidige situatie. In paragraaf 4.5 zal worden toegelicht dat deze waarden waarschijnlijk zullen stijgen in de toekomst.

Tabel 3.2 Monetaire waarden van gezondheidsschade in € per ton uitstoot van verontreinigende stof.

	SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>2)</sup>	PM <sub>10</sub>	NMVOC <sup>3)</sup>
Voortijdige sterfte	2020	2120	8000	60
Gezondheid	1040	1000	4000	170
Totaal	3060	3120	12000	130

<sup>1)</sup> vanwege de vorming van sulfaataerosolen.

<sup>2)</sup> vanwege de vorming van nitraataerosolen.

<sup>3)</sup> vanwege zijn bijdrage aan de vorming van ozon.

Bron: Krewitt en Schlomann (2006)

### 3.3 Landbouwgewassen

Verschillende luchtverontreinigingen hebben een negatief effect op de groei van landbouwgewassen, dit zijn voornamelijk zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) en ozon (O<sub>3</sub>). In ExternE zijn schadefuncties opgenomen voor negen verschillende landbouwgewassen waaronder aardappelen, suikerbieten en tarwe, gerst, rogge en haver. Ook worden de kosten van

maatregelen om verzuring van landbouwgrond tegen te gaan meegerekend. De oogstderiving is waar mogelijk gewaardeerd tegen wereldmarktprijzen.

*Tabel 3.3 Monetaire waarden van gewasschade in € per ton uitstoot van verontreinigende stof.*

	SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>2)</sup>	NMVO <sub>C</sub> <sup>3)</sup>
Oogstverlies	-10	130	640

<sup>1)</sup> vanwege depositie van zuur en direct SO<sub>2</sub>-effect.

<sup>2)</sup> vanwege depositie stikstof en bijdrage aan de vorming van ozon.

<sup>3)</sup> vanwege zijn bijdrage aan de vorming van ozon.

Bron: Krewitt en Schlomann (2006)

### 3.4 Materialen

Verzurende emissies kunnen verschillende materialen aantasten. In ExternE zijn schade-functies opgenomen voor een aantal materialen die veelal aan de buitenlucht blootgesteld zijn zoals gegalvaniseerd staal, steen, metselspecie, verf, en zink. De aantasting wordt gewaardeerd met behulp van vervangings- of reparatiekosten.

*Tabel 3.4 Monetaire waarden van materiaalschade in € per ton uitstoot van verontreinigende stof.*

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> <sup>1)</sup>
Materiaalschade	230	70

<sup>1)</sup> vanwege zijn bijdrage aan de vorming van ozon.

Bron: Krewitt en Schlomann (2006)

### 3.5 Ecosystemen

ExternE berekent de verzurende en vermestende depositie ten gevolge van de uitstoot van elektriciteitscentrales. Als de geaccumuleerde depositie in een natuurgebied een gebiedsspecifieke kritische waarde ('critical load') overschrijdt, verandert de soortensamenstelling in dat gebied. In het algemeen vermindert de biodiversiteit. De monetaire waardering van een dergelijke verandering is moeilijk te bepalen omdat hier niet op marktprijzen kan worden teruggegrepen en de waarde in het algemeen gebiedsspecifiek zal zijn. ExternE is er nog niet in geslaagd de problemen met het waarderen van veranderingen in natuurgebieden bevredigend op te lossen. In nog lopende projecten worden pogingen gedaan om verzurings- en vermestingskosten te waarderen tegen herstelkosten. In een voorbeeldberekening met een kolencentrale in Lauffen (Duitsland) bleken de verzuringskosten met deze methode, omgerekend, € 0,0071 €-cent per kWh elektriciteitsproductie te bedragen. Relatief ten opzichte van andere externe kosten (klimaat, gezondheid) is dit bedrag verwaarloosbaar.

### 3.6 Microverontreinigingen/zware metalen

In het project NewExt is gekeken naar diverse emissies van elektriciteitscentrales naar lucht, water en bodem die nog niet eerder in ExternE waren geanalyseerd. Tabel 3.5 geeft een overzicht van emissies, de schade per kg emissie en de schade per kWh elektri-

citeitsproductie. Zoals uit Tabel 3.5 is af te leiden is de schade per kWh verwaarloosbaar is ten opzichte van andere externe kosten (klimaat, gezondheid).

Tabel 3.5 Emissie en schade van zware metalen naar bodem, lucht en water.

	mg/kWh <sub>e</sub>	€/kg	€/kWh <sub>e</sub>
Steenkool			
Arsenicum	9,47E-03	80	7,58E-07
Cadmium	8,61E-04	39	3,40E-08
Chroom	3,62E-02	29	1,10E-06
Lood	5,60E-02	1600	9,14E-05
Nikkel	3,79E-02	3,8	1,40E-07
Aardgas			
Arsenicum	4,74E-04	80	3,80E-08
Nikkel	6,92E-03	3,8	2,60E-08
Formaldehyde	1,12E-01	0,12	1,30E-08

Bron: NewExt (2004)

### 3.7 Radioactieve straling

Verskillende energiebronnen produceren radioactieve straling. Voor het schatten van de gezondheidseffecten van radioactieve straling wordt gebruik gemaakt van een al wat oudere studie van Dreicer *et al.* (1995), die een direct verband legde tussen radioactieve straling en de kans op voortijdige sterfte via het DALY (Disability-Adjusted Life Years) concept. Deze studie is gebaseerd op de Franse nucleaire keten. De resultaten van deze studie zijn vrij onzeker (zie Dones *et al.*, 2005).

### 3.8 Ongevallen/rampen

In de bovenstroomse delen van sommige energieketens kunnen ongevallen en rampen plaats vinden bij de winning, transport en opslag van primaire energiedragers, zoals kolen, olie en gas. Ook kernkracht en waterkracht zijn niet zonder gevaar. Deze gevaren zijn geanalyseerd op grond van historische data van energie-gerelateerde ongevallen. Tabel 3.6 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten. Op grond van dit onderzoek is geconcludeerd dat de kosten van ongevallen en rampen weliswaar per geval zeer groot kunnen zijn, maar dat deze kosten uitgedrukt relatief ten opzichte van de omvang van de elektriciteitsproductie (in kWh) bijzonder gering zijn.

Tabel 3.6 Externe kosten van ongevallen/rampen in €-cent/kWh (prijzen van 2002).

Energieketen	Land	Schade kosten in €-cent/kWh			Externe kosten in €-cent/kWh		
		Werknemers	Maatschappij	Totaal	Werknemers	Maatschappij	Totaal
Steenkool	OESO	1.7E-3	1.2E-5	1.7E-3	3.4E-4	6.1E-6	3.5E-4
	niet-OESO (zonder China)	6.5E-3	4.3E-5	6.5E-3	3.2E-3	3.5E-5	3.3E-3
	China (1994-99)	1.2E-2	ng <sup>3</sup>	1.2E-2	6.1E-3	ng <sup>3</sup>	6.1E-3
Olie	OESO	9.9E-4	9.0E-4	1.9E-3	2.0E-4	4.5E-4	6.5E-4
	niet-OESO	1.8E-3	1.1E-2	1.3E-2	9.1E-4	8.7E-3	9.6E-3
Aardgas	OESO	2.2E-4	4.4E-4	6.6E-4	4.5E-5	2.2E-4	2.6E-4
	niet-OESO	3.3E-4	5.9E-4	9.2E-4	1.6E-4	4.7E-4	6.3E-4
Waterkracht	OESO	ng <sup>3</sup>	4.1E-5	4.1E-5	ng <sup>3</sup>	2.0E-5	2.0E-5
	niet-OESO	ng <sup>3</sup>	1.2E-1	1.2E-1	ng <sup>3</sup>	9.8E-2	9.8E-2
	niet-OESO zonder Bangiao/Shimantan	ng <sup>3</sup>	1.6E-2	1.6E-2	ng <sup>3</sup>	1.3E-2	1.3E-2
Kern	OESO <sup>1</sup>	ng <sup>3</sup>	ng <sup>3</sup>	ng <sup>3</sup>	ng <sup>3</sup>	ng <sup>3</sup>	ng <sup>3</sup>
	Niet-OESO <sup>2</sup>	5.7E-4	ng <sup>3</sup>	5.7E-4	2.9E-4	ng <sup>3</sup>	2.9E-4

<sup>1</sup> Gebaseerd op PSA van Muehleberg centrale (Zwitserland)

<sup>2</sup> Gebaseerd op Chernobyl ramp

<sup>3</sup> ng = verwaarloosbaar

bron: NewExt, 2004

### 3.9 Levenscyclus

Bij een schatting van de externe kosten van elektriciteit kan onderscheid gemaakt worden tussen de directe externe kosten ten gevolge van de opwekking van elektriciteit in de centrale en de indirecte externe kosten die optreden langs de rest van de keten van winning van grondstoffen, transport, distributie en gebruik. In eerste instantie heeft het Externe onderzoek zich geconcentreerd op de externe kosten in het conversiedeel van de keten: de opwekking van elektriciteit in de centrale. Naderhand is er meer aandacht gekomen voor andere delen van de keten, zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts. Deze aandacht werd mede mogelijk gemaakt door het geleidelijk ter beschikking komen van gedetailleerde Levenscyclusinventaristies (LCI) van allerlei producten, waaronder ook elektriciteit via verschillende opwekkingstechnieken.

Vanuit het economisch optimaliteitsbeginsel zou men externe effecten bij de bron moeten internaliseren. Externe effecten ten gevolge van de winning van steenkool zouden in de kosten van steenkoolwinning geïnternaliseerd dienen te worden. Externe effecten van transport zouden in de kosten van transport geïnternaliseerd moeten worden, etc. De externe effecten van opwekking zouden dan uitsluitend betrekking hebben op de *directe* externe kosten. Maar als de externe effecten elders in de keten niet geïnternaliseerd zijn of binnen afzienbare termijn (vóór 2020) geïnternaliseerd zullen worden, dan levert de schatting van de indirecte externe kosten wel nuttige of in ieder geval interessante informatie op.

In het huidige onderzoek presenteren we waar mogelijk zowel schattingen van de directe als indirecte externe kosten. De indirecte externe kosten zijn gebaseerd op LCI gegevens

voor benedenstroomse en bovenstroomse delen van de energieketens uit het proefschrift van Marheineke (2002) en het werk van Nitsch *et al.* (2004).

## 4. Technologische veronderstellingen

Zoals in Hoofdstuk 1 al werd aangegeven, hebben de geraamde externe kosten betrekking op toekomstige technologieën zoals die rond het jaar 2020 naar verwachting op de markt zullen zijn. De gegevens over deze technologieën zijn ontleend aan diverse bronnen, waaronder Menkveld, 2004, Daniëls en Farla, 2006, en Dijkman, 2007.

### 4.1 Elektrisch rendement

Het elektrisch rendement van een elektriciteitscentrale is een belangrijke factor voor de uitstoot van vervuilende stoffen per eenheid geproduceerde elektriciteit (kWh). Bij elektriciteitscentrales kunnen we onderscheid maken tussen ontwerprendementen en feitelijke rendementen. Het ontwerprendement is een maat voor het elektrisch rendement onder gestandaardiseerde omstandigheden. Het feitelijk rendement kan hiervan afwijken, vanwege bedrijfsinterne factoren (capaciteitsbenutting, stops en starts, warmteproductie) en externe factoren zoals de temperatuur van het koelwater (Seebregts en Volkers, 2005). In deze studie is uitgegaan van *verwachte* ontwerprendementen voor nieuwe centrales rond het jaar 2020. Tabel 4.1 toont de ontwerprendementen voor huidige nieuwe installaties (2007), de verwachte rendementen voor 2020, en als vergelijkingswaarde de gemiddelde historische rendementen van steenkool- en gascentrales over de periode 2000-2004 en, tussen haakjes, de bandbreedtes van de historische rendementen.

Tabel 4.1 Ontwerp- en feitelijke elektrische rendementen van steenkool- en gascentrales

Technologie	Ontwerprendement		Feitelijk rendement
	2007	2020	
Poederkool	44	50	39 (35-44)
Poederkool met CO <sub>2</sub> -afvang	34	43	
Poederkool met biomassa	42,5	48	
KS-STEAG	45	52	
KV-STEAG met CO <sub>2</sub> -afvang	39	47	
KV-STEAG met biomassa	44	50,5	
STEAG-Aardgas	58	60	51-53 (40-53)
STEAG-Aardgas met CO <sub>2</sub> -afvang	48	54	

Bron: Dijkman, 2007; Seebregts en Volkers, 2005.

### 4.2 Directe emissies

Onder directe emissies verstaan wij de uitstoot van vervuilende stoffen als direct gevolg van de conversie van primaire energiedragers in elektriciteit. Wij veronderstellen dat alle nieuwe centrales in het jaar 2020 uitgerust zullen zijn met 'state-of-the-art' rookgaszuiveringsinstallaties voor conventionele luchtverontreinigingen (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub>).

### 4.3 Indirecte emissies

Indirecte emissies zijn alle niet-directe emissies in de elektriciteitsketen. Bij het gebruik van fossiele brandstoffen gaat het met name om de emissies tijdens hun winning. Bij steenkool is gebruik gemaakt van gegevens die betrekking hebben op de winning van steenkool in Zuid-Afrika (Marheineke, 2002). Het was binnen het bestek van deze studie niet mogelijk om gegevens te vinden van alle landen waaruit Nederland steenkool importeert (bijvoorbeeld ook Colombia). Voor aardgas zijn Europese gegevens gebruikt (Marheineke, 2002).

De indirecte emissies in het buitenland zijn gewaardeerd tegen dezelfde bedragen als de directe emissies in Nederland. Hiertegen zou men uit puur economisch opzicht bezwaar kunnen maken. Bij grote inkomensverschillen, zoals tussen Nederland en Zuid-Afrika, zou men kunnen beargumenteren dat het monetaire equivalent van welvaartverlies door bijvoorbeeld ziekte of voortijdig overlijden geringer zal zijn in het relatief armere land. Vanuit een meer ethische benadering van duurzaamheid is het echter weer de vraag of men buitenlandse schade lager mag waarderen dan binnenlandse aangezien dit tot de aanbeveling zou kunnen leiden onze milieuproblemen naar het buitenland te 'exporteren'. Bovendien ontbreekt het ons in praktisch opzicht aan een waarderingsgrondslag die bijvoorbeeld specifiek op de Zuid-Afrikaanse situatie is toegesneden.

De emissies van biomassa (zowel de directe als de indirecte) stellen ons ook voor problemen. In het algemeen, zijn de emissies van biomassa (sterk) afhankelijk van het type biomassa en van de wijze en de plaats van de primaire productie. In het kader van deze studie was het niet mogelijk om voor al deze factoren beargumenteerde veronderstellingen te maken. Voor de biomassatoepassingen is simpelweg verondersteld dat er gebruik wordt gemaakt van specifieke biomassaproductie in populierenplantages ('short-rotation forestry'). De emissiefactoren zijn van Nitsch *et al.* (2004). Grofweg kan gesteld worden dat de externe kosten van organische afvalproducten lager zullen zijn en de externe kosten van eenjarige landbouwgewassen hoger. Helaas splitsen Nitsch *et al.* de externe effecten niet uit naar directe en indirecte externe effecten. Wij hebben de enigszins arbitraire en stellig onjuiste veronderstelling gemaakt dat alle externe kosten indirect zouden zijn.

De uitstoot van vervuilende stoffen bij de opwekking van zonne-energie vinden voornamelijk plaats tijdens de bouw van de zonne-energie centrale. Meer dan 70 procent van de broeikasgasuitstoot en bijna 80 procent van ozonvorming vindt plaats tijdens de bouwfase, met name bij de productie van silicium, de fabricage van silicium 'wafers' en de productie van zonnecellen en panelen (Nitsch *et al.*, 2004). Tijdens het gebruik van de centrale vindt uitstoot van vervuilende stoffen plaats vanwege schoonmaak- en herstelwerkzaamheden (Nitsch *et al.*, 2004). De 'levensloop' CO<sub>2</sub> emissies van een PV-zonnekrachtcentrale worden op ongeveer 100 g/kWh<sub>e</sub> geschat (Nitsch *et al.*, 2004). Dit is minder dan vroegere schattingen (bijv. Marheineke, 2002). Er wordt tevens veronder-

steld dat vanwege diverse oorzaken de CO<sub>2</sub> uitstoot in de toekomst (2030) bijna twee maal zo klein zal zijn als tegenwoordig (54 g/kWh).<sup>11</sup>

#### 4.4 Back-up capaciteit voor hernieuwbare bronnen.

De elektriciteit die uit hernieuwbare bronnen wordt geproduceerd is niet helemaal te vergelijken met elektriciteit uit conventionele, fossiele bronnen. Het primaire aanbod van zonne- en windenergie is bijvoorbeeld aan sterke schommelingen onderhevig. De leveringszekerheid van hernieuwbare elektriciteit is daarom lager dan die uit ‘conventionele’ bronnen. Als het aandeel hernieuwbare energie in een elektriciteitspark toeneemt, zullen er derhalve maatregelen genomen moeten worden om de leveringszekerheid van het hele park op niveau te houden. Dit betekent concreet dat de reservecapaciteit van het park vergroot dient te worden. Een tweede effect van een toename van het aandeel hernieuwbare energie en de daaruit voortvloeiende discontinuïteit in het aanbod, is een toename van de frequentie van stops en starts van conventionele centrales en een toename van de periode dat deze centrales op een minder efficiënte bezettingsgraad (‘deellast’) moeten opereren. Door deze effecten neemt de uitstoot van bestaande centrales toe bij een toenemende introductie van hernieuwbare bronnen in een stroomvoorzieningsysteem. Het is redelijk deze *extra* uitstoot aan de hernieuwbare bronnen toe te rekenen. Marheineke (2004) heeft hiervoor een modelberekening gemaakt die er van uitgaat dat in een elektriciteitspark van 4130 MW bestaande uit kern, kolen en gas 10% hernieuwbare elektriciteit wordt ingepast. Hij geeft per hernieuwbare bron (zou en wind) een ‘prestatiekrediet’ dat aangeeft hoeveel procent van de hernieuwbare capaciteit in mindering gebracht kan worden op de conventionele capaciteit bij een gelijkblijvende leveringszekerheid.

Tabel 4.2 Prestatiekrediet en ‘back-up’ emissies van hernieuwbare energiebronnen

	Zon	Wind
Prestatiekrediet (%)	2,61	18,07
Back-up CO <sub>2</sub> g/kWh	20	18

Bron: Marheineke (2004), tabel 6-2.

Voor zonne-energie is het prestatiekrediet laag. In een rekenvoorbeeld van Marheineke (2004) veroorzaakt een aandeel van 10 procent zonne-elektriciteit in de stroomproductie een extra uitstoot van CO<sub>2</sub> van 20g/kWh. Voor windenergie is dit 18g/kWh (zie Tabel 4.2).

#### 4.5 Andere veronderstellingen

Als we naar het zichtjaar 2020 kijken zullen niet alleen de technologische prestaties van elektriciteitscentrales veranderd zijn (Paragraaf 4.1), maar zullen ook de blootgestelde bevolking, materialen, gewassen en natuur zijn veranderd en zal de economische waardering van schade wellicht veranderd zijn ten opzichte van de huidige situatie. In recente

<sup>11</sup> Belangrijke oorzaken zijn: een langere levensduur van de centrale, het gebruik van dunnere siliciumschijfjes (‘wafers’), en een toename van de energie-efficiëntie in de productie van zonnecellen, staal en aluminium (Nitsch *et al.*, 2004).



ramingen van toekomstige externe kosten, zoals bijvoorbeeld voor de Thematische Strategie Luchtkwaliteit van de Europese Commissie, wordt met de meeste van deze factoren geen rekening gehouden, met uitzondering van demografische factoren. Met name het gemiddeld ouder worden van de Europese bevolking maakt deze bevolking gevoeliger voor gezondheidsschade door luchtverontreiniging. Uit de achtergrondstudies voor de Thematische Strategie kunnen we afleiden dat voortijdige sterfte door luchtverontreiniging (in het bijzonder door ozon) alleen al vanwege het ouder worden van de bevolking in 2020 ongeveer 13,5% hoger zal zijn dan in 2000. In de berekeningen nemen we derhalve aan dat voortijdige sterfte in Europa in 2020 per ton uitstoot van SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> 13,5% hoger is dan het huidige niveau.

#### 4.6 Berekeningswijze van externe kosten

Bij de berekening van externe kosten van diverse opties om elektriciteit te produceren is enerzijds geprobeerd om zoveel mogelijk effecten mee te nemen, maar anderzijds zijn zeer onzekere of kwantitatief verwaarloosbare effecten niet meegenomen. De methodiek om de 'externe' kosten van voorzieningszekerheid te ramen is nog onvoldoende uitgewerkt. De kosten van verzuring en vermisting zijn erg onzeker en in de huidige methodiek van ExternE kwantitatief verwaarloosbaar. De kosten van ongevallen/rampen zijn relatief – per kWh – ook zeer klein. Zoals hiervoor is aangegeven zijn sommige, potentieel belangrijke externe kosten, zoals de kosten die samenhangen met landschappelijke kwaliteit en landgebruik, nog helemaal niet geschat. Er zijn altijd twijfelgevallen. Zoals aangegeven in paragraaf 3.7 is methode die gevolgd is om de externe kosten van radioactieve straling te ramen vrij onzeker. Toch is dit effect meegenomen. Ook de externe kosten van broeikasgasuitstoot zijn zeer onzeker. Maar kwantitatief zijn zij zo belangrijk dat we hier niet om heen kunnen. Vanwege de onzekerheid zijn de berekeningen uitgevoerd met twee verschillende waarden.

De kosten van de meeste typen externe effecten zijn afhankelijk van de locatie van de bron van de effecten. Gezondheidsschade, schade aan materialen, gewassen en natuurgebieden is per eenheid uitstoot van een vervuilende stof afhankelijk van de hoeveelheid, mensen, materialen, gewassen en natuurgebieden die daadwerkelijk blootgesteld worden aan deze uitstoot. Bij luchtverontreiniging is ook de heersende windrichting van belang. Zoals bekend geldt deze locatieafhankelijkheid niet voor de berekening van de schade van broeikasgassen: de klimaatschade door broeikasgasuitstoot is onafhankelijk van de plaats van uitstoot.

In de berekeningen in dit rapport is in eerste instantie gerekend met gemiddelde Europese blootstellingswaarden. Dus het patroon van blootgestelde mensen, etc. rond een centrale is een gemiddeld Europees patroon en kan dus afwijken van een typisch Nederlands patroon. In Hoofdstuk 6 wordt dit nader onderzocht door middel van een modelberekeningen. De kernvraag hierbij is natuurlijk of een nadere precisering van locatie tot significant verschillende externe kostenschattingen leidt.

De externe kosten zijn verdeeld in directe en indirecte kosten. Zoals al eerder is uitgelegd betreffen de directe externe kosten de kosten die veroorzaakt worden door uitstoot van vervuilende stoffen uit de centrale. De indirecte externe kosten worden veroorzaakt door uitstoot van vervuilende stoffen in bovenstroomse en benedenstroomse delen van

de energieketens. Voor biomassa (biomassa-centrale en bijstook) kon deze verdeling niet gemaakt worden. Alle externe kosten van biomassa zijn als ‘indirect’ geclassificeerd.

De referentietechnologieën uit de verschillende bronnen die gebruikt worden in de berekeningen verschillen meestal enigszins in belangrijke parameters zoals elektrisch rendement en vermogen. De verschillende technologieën zijn zoveel mogelijk genormaliseerd naar de rendementen uit paragraaf 4.1. Een voorbeeld moge dit verduidelijken.

In paragraaf 4.1 is gesteld dat het elektrisch ontwerpndement van een moderne poederkoolcentrale in 2020 50 procent zal bedragen. De indirecte emissies ontleen we voor een groot deel aan Marheineke (2002), die echter een poederkoolcentrale met een rendement van 43 procent als uitgangspunt heeft genomen. Normalisatie geschiedt door de emissiecijfers van Marheineke met een factor  $43/50$  te vermenigvuldigen.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> We gaan er dus van uit dat een tweemaal zo efficiënte centrale een half maal zoveel vervuiling produceert per geleverde eenheid elektriciteit.



## 5. Resultaten

Op grond van de gegevens, methoden en aannames die in de voorgaande hoofdstukken zijn geschetst kunnen wij de externe kosten van verschillende elektriciteitsketens uitrekenen en vergelijken. In de voorgaande hoofdstukken is er al op gewezen dat er nog grote onzekerheden bestaan. Met name bestaan er onzekerheden met betrekking tot de marginale schade van broeikasgasemissies (bijvoorbeeld CO<sub>2</sub>), de externe kosten van biomassateelt, de waardering van gezondheid, en alle kosten met betrekking tot de aantasting van natuur en landschap. Ook is het de vraag of de gebruikte methode wel gebruikt kan worden om de maatschappelijke waardering van zeer omstreden technologieën zoals kernenergie te ramen.

Gegeven deze onzekerheden en valkuilen presenteren wij hier vier overzichten van externe kosten van elektriciteitsketens rond het jaar 2020. Ten eerste tonen Figuur 5.1 en Figuur 5.2 de externe kosten van de diverse opties bij klimaatschade van respectievelijk €38 en €76 per ton CO<sub>2</sub>. De externe kosten zijn onderverdeeld in de kosten van directe en indirecte effecten.

Bij klimaatschade van €38 per ton CO<sub>2</sub> variëren de directe externe kosten van 2,96 €-cent/kWh voor een poederkoolcentrale tot 0,00 €-cent/kWh voor wind en zon. De indirecte externe kosten variëren van 1,19 €-cent/kWh voor een poederkoolcentrale met biomassa bijstook<sup>13</sup> tot 0,11 €-cent/kWh voor kernenergie. De totale externe kosten variëren van 3,97 €-cent/kWh voor een poederkoolcentrale tot 0,16 €-cent/kWh voor wind offshore.

De bijstook van 30 procent biomassa in steenkoolcentrales vermindert hun externe kosten met 13-17%. Voor een poederkoolcentrale verminderen de externe kosten van 3,97 tot 3,34 €-cent/kWh en voor een KV-STEAG verminderen ze van 3,52 tot 2,92 €-cent/kWh. Zoals opgemerkt in paragraaf 4.3 is de hier gepresenteerde schatting van de externe kosten van biomassagebruik vrij speculatief. Nader onderzoek naar de specifieke Nederlandse situatie zou de onzekerheid rond deze schatting kunnen verkleinen.

CO<sub>2</sub>-afvang vermindert de externe kosten van steenkoolopties met ruim 50 procent (tot 1,94, resp. 1,42 €-cent/kWh voor poederkool en KV-STEAG). Hierbij moet wel bedacht worden dat de reductie alleen directe kosten betreft; vanwege het effect van CO<sub>2</sub>-afvang op het elektrisch rendement van de centrales nemen de indirecte kosten per kWh toe. Voor kolentechnologie worden deze indirecte externe kosten in het buitenland gedragen (maar natuurlijk profiteert het buitenland ook van onze reductie in CO<sub>2</sub> uitstoot).

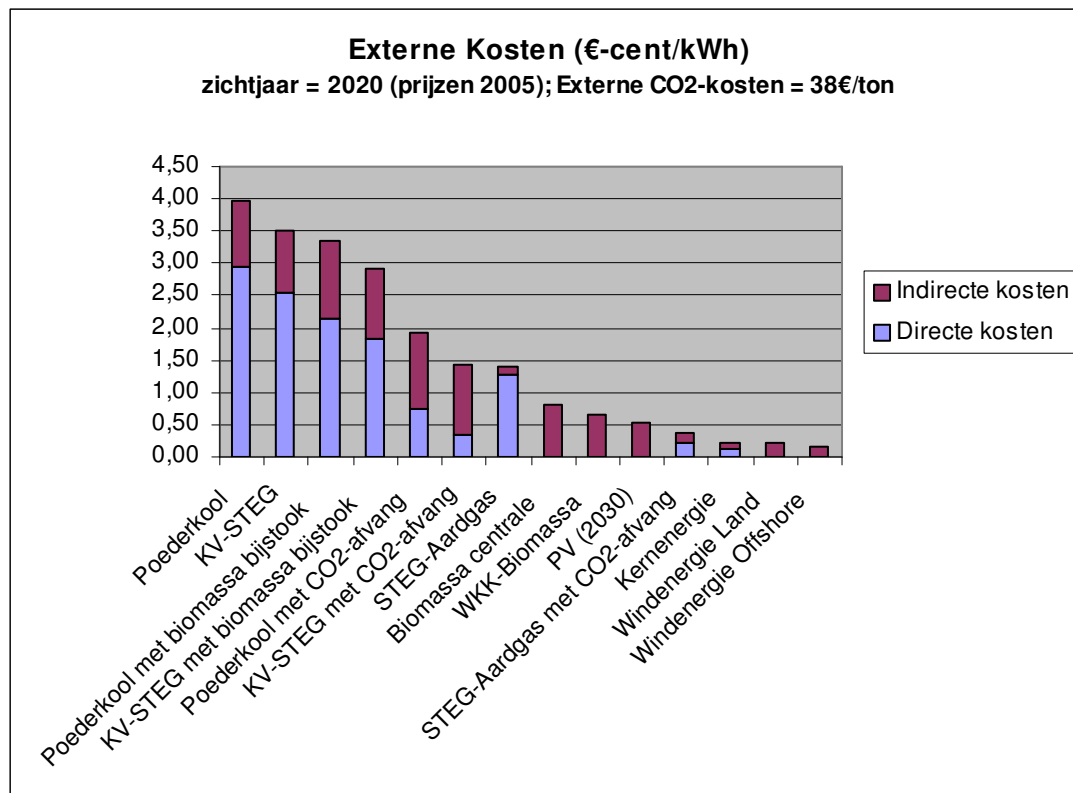
De externe kosten van aardgastechnologie (STEAG aardgas) zijn 1,41 €-cent/kWh en daarmee vergelijkbaar met de externe kosten van KV-STEAG met CO<sub>2</sub>-afvang (1,42 €-cent/kWh). STEAG aardgas heeft in onze berekening betrekkelijk geringe indirecte kosten. STEAG aardgas met CO<sub>2</sub>-afvang heeft zeer geringe externe kosten (0,37 €-cent/kWh). In onze berekening zijn deze externe kosten zelfs nog geringer dan zon-PV.

---

<sup>13</sup> Hierbij moet wel opgemerkt worden dat vanwege gebrek aan data, alle externe kosten van biomassa indirect verondersteld zijn. Dit is ongetwijfeld niet correct: zie paragraaf 4.3.

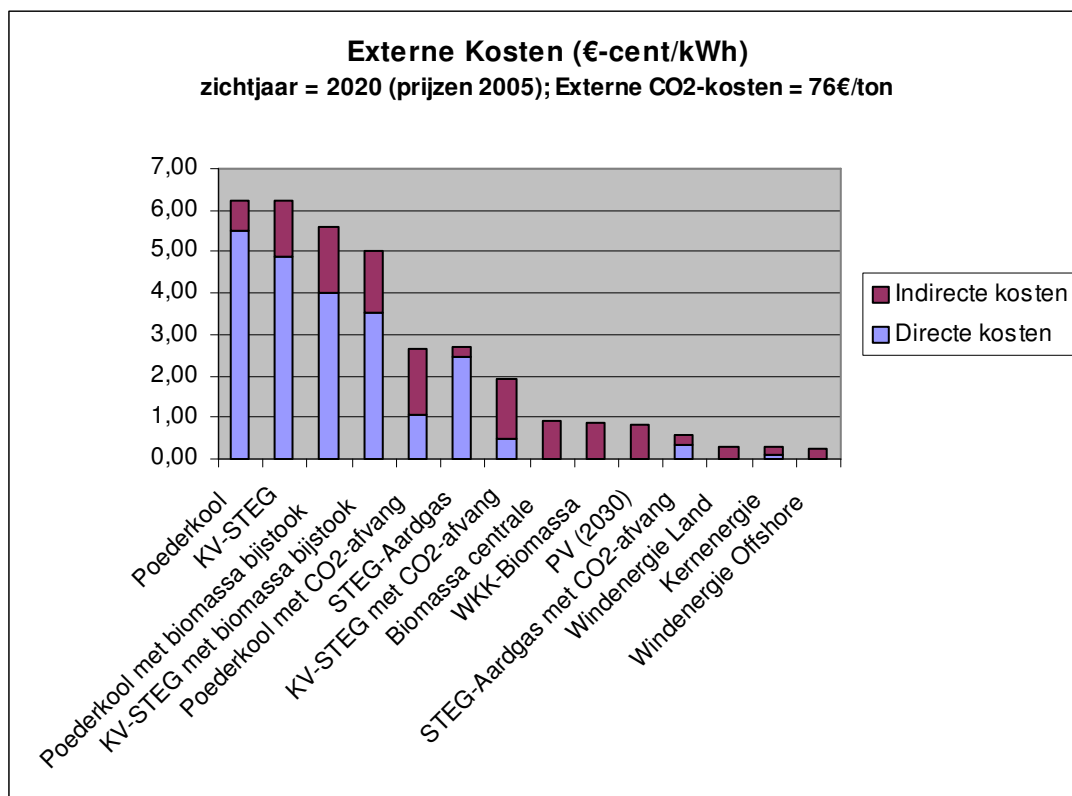
Biomassatechnologieën nemen een tussenpositie in tussen de fossiele technologieën en zon, wind en kernenergie. In onze berekeningen bedragen de externe kosten van bio-WKK en een grootschalige biomassacentrale 0,66 en 0,79 €-cent/kWh, maar deze cijfers zijn omgeven met een grote onzekerheidsmarge.

Kernenergie en wind hebben de laagste externe kosten van de onderzochte technologieën. Hierbij moet wel gedacht worden dat er waarschijnlijk een groot verschil is tussen de technische 'kans-maal-effect' berekeningen waar de externe kosten van kernenergie in deze studie op zijn gebaseerd en de publieke perceptie van de risico's van ongevallen en opslag van radioactief materiaal. Krewitt en Schlomann merken in hun studie van externe effecten van energietechnologieën voor de Duitse regering dan ook op dat de waardering van de relevante effecten van kernenergie (ongevallen met kleine kans maar met potentieel catastrofale gevolgen; waardering van schade over tienduizenden jaren; het effect van proliferatierisico's op maatschappelijke structuren) waarschijnlijk op methodologische grenzen stuit (Krewitt en Schlomann, 2006).



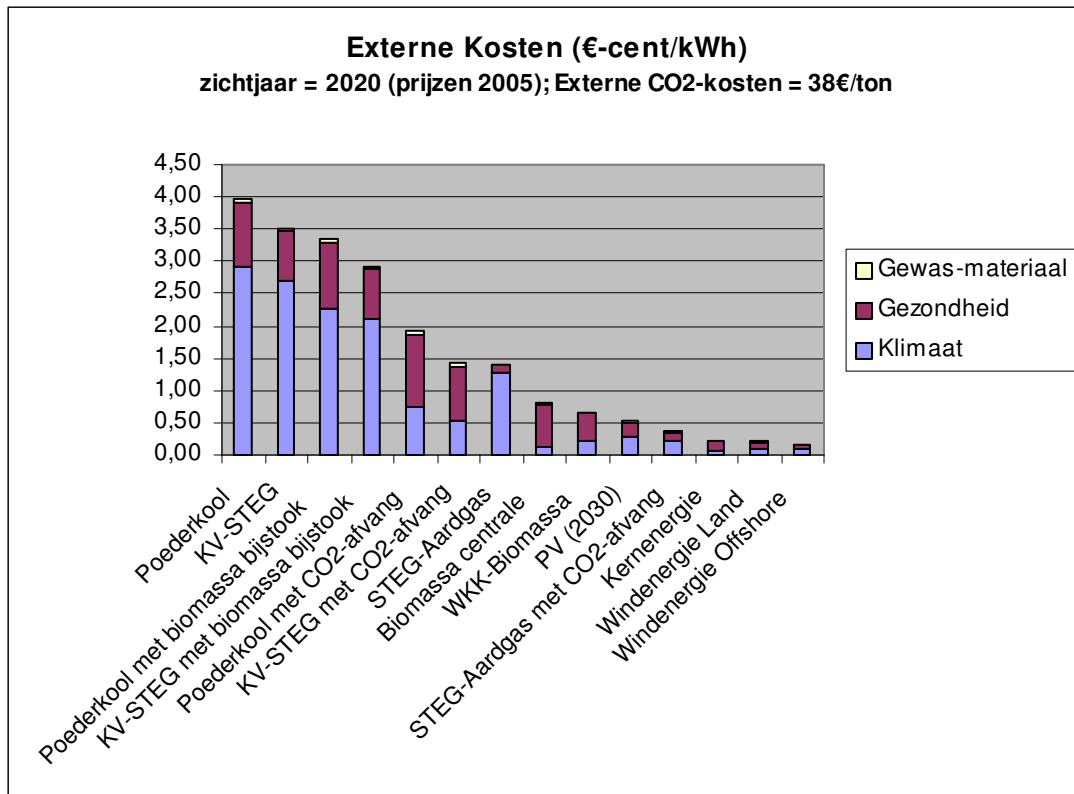
Figuur 5.1 Externe kosten van elektriciteitsopties naar directe en indirecte effecten (klimaatkosten zijn €38/tCO<sub>2</sub>).

In Figuur 5.2 worden de externe kosten getoond bij een veronderstelde klimaatschade van €76 per ton CO<sub>2</sub>. De externe kosten van alle opties nemen toe met uiteenlopende percentages (tussen de 17% en 88%). De rangorde van de onderscheiden technologieën naar hun externe kosten verandert echter nauwelijks (alleen respectievelijk STEG-Aardgas en KV-STEG met CO<sub>2</sub>-afvang en kernenergie en wind op land wisselen stuiver-tje).



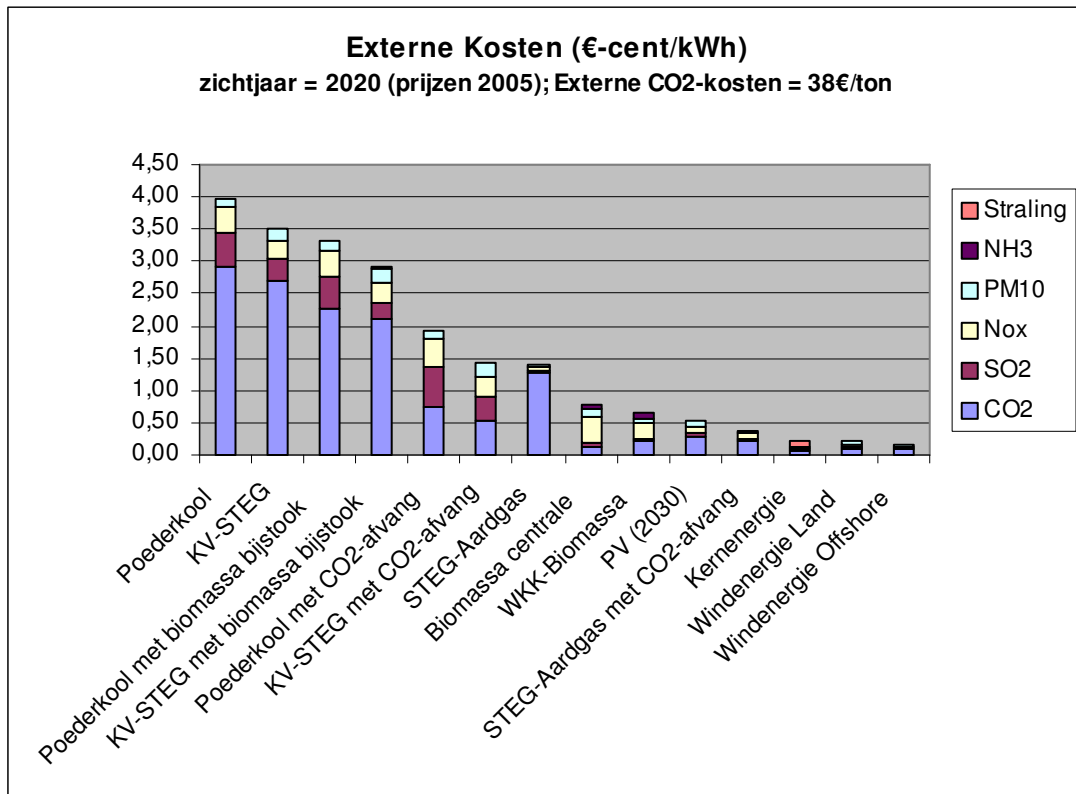
Figuur 5.2 Externe kosten van elektriciteitsopties naar directe en indirecte effecten (klimaatkosten zijn €76/tCO<sub>2</sub>).

De volgende twee figuren tonen een uitsplitsing van externe kosten naar milieuthema's en naar vervuilende stof. Figuur 5.3 toont de uitsplitsing naar de thema's 'klimaat', 'gezondheid', en 'gewas en materiaalschade'. Deze figuur is gebaseerd op een klimaatschade van €38 per ton CO<sub>2</sub>. Voor standaard fossiele technologieën bedraagt de klimaatschade ongeveer 70 procent (steenkool) tot 90 procent (aardgas) van de totale externe kosten. Het aandeel van gezondheidsschade in de totale externe kosten is ongeveer 25 procent voor steenkool en minder dan 10 procent voor aardgas.



*Figuur 5.3 Externe kosten van elektriciteitsopties naar verschillende externe effecten (klimaatkosten zijn €38/tCO<sub>2</sub>).*

Figuur 5.4, tenslotte, geeft een uitsplitsing van de externe kosten per vervuilende stof. Het beeld is hier hetzelfde als in Figuur 5.3 met een relatief groot aandeel van CO<sub>2</sub>.



Figuur 5.4 Externe kosten van elektriciteitsopties naar verschillende vervuilende stoffen (klimaatkosten zijn €38/tCO<sub>2</sub>).





## 6. Effect van locatie op resultaten

De hoogte van een deel van de externe kosten van elektriciteitsproductie is afhankelijk van de geografische locatie van de centrale. Gezondheidskosten per kWh zullen hoger zijn in een dichtbevolkt gebied dan in een dunbevolkt gebied. Een zelfde hoeveelheid luchtverontreiniging in een dichtbevolkt gebied zal immers meer mensen treffen dan in een dunbevolkt gebied. Veel resultaten in dit rapport zijn ontleend aan Duitse studies. Daarom vergelijken we in dit hoofdstuk de externe kosten van een elektriciteitscentrale in Duitsland met één in Nederland. Voor een goede vergelijking veronderstellen we dat de twee centrales in alle opzichten identiek zijn aan elkaar, behalve in locatie.

Voor de vergelijking is het EcoSense model gebruikt. Het EcoSense model is speciaal ontwikkeld om de locatie-specifieke externe kosten van elektriciteitscentrales uit te rekenen. Een referentie-centrale in het EcoSense model is een bestaande poederkoolcentrale in Lauffen am Neckar, een plaatsje ongeveer 40 km ten noorden van Stuttgart (652 MW, 6500 vollasturen per jaar, rendement van 43%). We hebben deze centrale in het model naar Amsterdam verplaatst. Dat kan eenvoudig door hem andere geografische coördinaten te geven en de hoogte ten opzichte van zeeniveau te veranderen.

Uit de berekeningen met EcoSense blijkt het verschil in externe kosten per kWh tussen identieke centrales in Lauffen en Amsterdam minder dan 2 procent te bedragen (€-cent 3,51 in Lauffen en €-cent 3,44 in Amsterdam, zie Tabel 6.1). Hieruit leiden wij af dat het gebruik van de Duitse bronnen in deze studie niet tot grote fouten heeft geleid.

*Tabel 6.1 Externe kosten van identieke centrales in Amsterdam en Lauffen (€-cent/kWh)*

	Amsterdam	Lauffen
Klimaat*	2,990	2,990
Gezondheid	0,443	0,504
Gewassen	-0,005	-0,005
Materialen	0,013	0,017
Totaal	3,442	3,506

\*) Klimaatschade is *onafhankelijk* van de locatie bron van de uitstoot van broeikasgassen.

Bron: eigen berekening met het EcoSense model



## 7. Conclusies

Met behulp van de ExternE-methode zijn de externe kosten geschat van diverse elektriciteitsvoorzieningstechnologieën in Nederland rond het jaar 2020. De geschatte externe kosten hebben betrekking op klimaatschade, schade aan de gezondheid en schade aan gewassen en materialen. Een grote onzekerheid in het schatten van externe kosten van elektriciteitsvoorziening is de omvang en waarde van klimaatschade ten gevolge van de uitstoot van broeikasgassen (waaronder CO<sub>2</sub>). In deze studie hebben wij twee illustratieve bedragen gehanteerd voor die klimaatschade: €38 en €76 per ton CO<sub>2</sub>.

Tijdens het onderzoek zijn we op enige problemen gestuit. Zo bleek het moeilijk om consistente informatie over alle technologieën te vinden. Dit was vooral moeilijk voor biomassa en WKK-technologieën. Op advies van de opdrachtgever is besloten om vooral te proberen iets van de biomassa-opties boven tafel te krijgen. In dit onderzoek is één biomassateelt (snelgroeiende populieren) nader onderzocht. Om een beter beeld te krijgen van de externe kosten van biomassa-opties in de elektriciteitsvoorziening zouden veel meer verschillende bronnen van biomassa onderzocht dienen te worden.

Ook viel het op dat er in de literatuur nog niet standaard gewerkt wordt via een levenscyclusbenadering. Nu er in principe veel informatie beschikbaar is over de maatschappelijke- en milieueffecten van afzonderlijke energieketens, zou zo'n levenscyclusachtige analyse eigenlijk vanzelfsprekend moeten zijn, zeker in analyses die op enigerlei wijze betrekking hebben op duurzaamheid of duurzame ontwikkeling. Aan de andere kant dient men er bij een levenscyclusbenadering wel waakzaam voor te blijven dat bepaalde externe kosten niet 'dubbel' geïnternaliseerd worden, doordat er bijvoorbeeld zowel een milieuheffing gelegd wordt op de grondstoffenwinning als op de indirecte effecten van de conversie van die grondstoffen.

Tenslotte is het jammer dat op basis van de huidige kennis nog niet alle externe effecten geschat kunnen worden. Met name ontbreekt in de ExternE methodologie een robuuste schattingmethodiek voor externe effecten met betrekking tot natuur en landschap. Zeker in een dichtbevolkt land als Nederland zijn effecten op natuur en landschap van groot belang en spelen zij dan ook een grote rol in (ruimtelijke) beleidsbeslissingen.

Ondanks deze problemen zijn toch de externe maatschappelijke- en milieukosten van 16 van de 20 door de opdrachtgever voorgestelde elektriciteitsopties geraamd. Bij een veronderstelde klimaatschade van €38 per ton CO<sub>2</sub>, variëren de externe kosten van 3,97 tot 0,16 €-cent/kWh. Bij een hogere klimaatschade van €76 per ton CO<sub>2</sub> nemen de externe kosten toe tot 6,23 tot 0,26 €-cent/kWh. Door 30 procent biomassa-inzet in steenkool-technologieën dalen de externe kosten met ongeveer 15 procent. Door CO<sub>2</sub>-afvang dalen de externe kosten met meer dan 50 procent. Bij deze opties moet er wel rekening mee gehouden worden dat de indirecte externe kosten in het buitenland stijgen. Gastecnologie (STEG-Aardgas) heeft relatief lage externe kosten, net zoals de opties die hernieuwbare energie gebruiken en kernenergie. Van de hernieuwbare energieopties heeft wind de laagste externe kosten.



## Literatuur

- AEA Technology Environment (2005). *Methodology for Cost-Benefit Analysis for CAFE: Volume 1: Overview of Methodology*. AEA Technology Environment, Didcot, Oxon, UK.
- Daniels, B.W. & Farla, J.C.M. (2006). *Optiedocument Energie en Emissies*. ECN-05—105, ECN/MPN, Petten/Bilthoven.
- Dijkman, B. (2007). *Persoonlijke mededeling*. E-mail van 27-4-2007.
- Dones, R., Heck, Th., Bauer, Ch., Hirschberg, S., Bickel, P., Preiss, Ph., Panis, L., & De Vlieger, I. (2005). *ExternE-Pol Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications*. Final Report on Work Package 6, Brussels.
- Dreicer, M., Tort, V. & Margerie, H. (1995). *Nuclear fuel cycle: implementation in France*. Final report for ExternE Program, contract EC DG12 JOU2-CT92-0236. CEPN, F-92263 Fontenay-aux-Roses.
- Krewitt, W. & Schломann, B. (2006). *Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer Institut für Systemanalyse und Technikbewertung, Stuttgart/Karlsruhe.
- Marheineke, T. (2002). *Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken*. Dissertation der Universität Stuttgart, Fakultät Energietechnik, Stuttgart.
- Menkveld, M. (2004). *Energietechnologieën in Relatie tot Transitiebeleid*. Factsheets. ECN-C—04-020, Petten.
- NewExt (2004). *New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies*. Final Report to the European Commission, IER, Germany; ARMINES/ENSMP, France; PSI, Switzerland; Université de Paris I, France; University of Bath, United Kingdom; VITO, Belgium.
- Nitsch, J., Krewitt, W., Pehnt, M., Reinhardt, G., Fishedick, M. u.a. (2004). *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 901 41 803). DLR, ifeu, WI, Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal.
- Seebregts, A.J. & Volkens, C.H. (2005). *Monitoring Nederlandse Elektriciteitscentrales 2000-2004*. ECN-C—05-090, Petten.
- Stern, N., (2006). *The Economics of Climate Change*. Cabinet Office – HM Treasury. Cambridge University Press.
- Tol R.S.J. (2005). The Marginal Damage Costs Of Carbon Dioxide Emissions: An Assessment Of The Uncertainties. *Energy Policy*, 33, 2064–2074.
- Watkiss, P. (2006). *The Social Costs of Carbon (SCC) Review – Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment*. Final Report to Defra. Published January 2006. Paul Watkiss with contributions from David Anthoff, Tom Downing, Cameron Hepburn, Chris Hope, Alistair Hunt, and Richard Tol.  
<http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/carboncost/aeat-scc.htm>  
<http://socialcostofcarbon.aeat.com/index.htm>
- Watkiss, P. & Downing, T. (2007) The Social Cost of Carbon. *Integrated Assessment Journal*. forthcoming.



## Appendix I. Technische gegevens

Bij een veronderstelde klimaatschade van €38/tCO<sub>2</sub>

### Poederkool

rendement = 50

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO <sub>2</sub>	670,00	97,18	Klimaatverandering	0,04	0,04	2,55	0,37	2,92
SO <sub>2</sub>	0,53	1,02	Mortaliteit	2,02	2,29	0,12	0,21	0,33
	0,53	1,02	Morbiditeit	1,04	1,04	0,06	0,11	0,16
	0,53	1,02	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,53	1,02	Materiaal	0,23	0,23	0,01	0,02	0,04
	0,53	1,02	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO <sub>x</sub>	0,55	0,64	Mortaliteit	2,12	2,54	0,14	0,14	0,28
	0,55	0,64	Morbiditeit	1,00	1,00	0,06	0,06	0,12
	0,55	0,64	Gewassen	0,13	0,13	0,01	0,01	0,02
	0,55	0,64	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,01
	0,55	0,64	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM <sub>10</sub>	0,01	0,08	Mortaliteit	8,00	9,08	0,01	0,07	0,08
	0,01	0,08	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,03	0,04
NMVOC	0,05	0,00	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,05	0,00	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal						2,96	1,02	3,97

### Poederkool met CO<sub>2</sub>-afvang

rendement = 43

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO <sub>2</sub>	82,00	113,00	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,31	0,43	0,74
SO <sub>2</sub>	0,64	1,18	Mortaliteit	2,02	2,29	0,15	0,24	0,39
	0,64	1,18	Morbiditeit	1,04	1,04	0,07	0,12	0,19
	0,64	1,18	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,64	1,18	Materiaal	0,23	0,23	0,01	0,03	0,04
	0,64	1,18	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



NOx	0,55	0,74 Mortaliteit	2,12	2,41	0,13	0,16	0,29
	0,55	0,74 Morbiditeit	1,00	1,00	0,06	0,07	0,13
	0,55	0,74 Gewassen	0,13	0,13	0,01	0,01	0,02
	0,55	0,74 Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,01	0,01
	0,55	0,74 Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,01	0,10 Mortaliteit	8,00	9,08	0,01	0,08	0,09
	0,01	0,10 Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,04	0,04
NMVOC	0,05	0,00 Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,05	0,00 Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00 Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal					0,76	1,18	1,94

**Poederkool met biomassa bijstook (30%)**

rendement = 48

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2	488,54	108,13	Klimaatverandering	0,04	0,04	1,86	0,41	2,27
SO2	0,39	1,08	Mortaliteit	2,02	2,29	0,09	0,22	0,31
	0,39	1,08	Morbiditeit	1,04	1,04	0,04	0,11	0,15
	0,39	1,08	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,39	1,08	Materiaal	0,23	0,23	0,01	0,02	0,03
	0,39	1,08	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,40	0,76	Mortaliteit	2,12	2,41	0,10	0,16	0,26
	0,40	0,76	Morbiditeit	1,00	1,00	0,04	0,08	0,12
	0,40	0,76	Gewassen	0,13	0,13	0,01	0,01	0,02
	0,40	0,76	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,01	0,01
	0,40	0,76	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,01	0,12	Mortaliteit	8,00	9,08	0,01	0,10	0,10
	0,01	0,12	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,05	0,05
NMVOC	0,04	0,01	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,04	0,01	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
NH3	0,00	0,04	Gezondheid	6,90	7,83	0,00	0,02	0,02
Totaal						2,15	1,19	3,34

**KV-STEG**

rendement = 52

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005 2020		Direct Indirect		Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	
CO2	620,00	93,44	Klimaatverandering	0,04	0,04	2,36	0,36	2,71
SO2	0,05	0,98	Mortaliteit	2,02	2,29	0,01	0,20	0,21
	0,05	0,98	Morbiditeit	1,04	1,04	0,01	0,10	0,11
	0,05	0,98	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,05	0,98	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,02	0,02
	0,05	0,98	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,20	0,61	Mortaliteit	2,12	2,41	0,05	0,13	0,18
	0,20	0,61	Morbiditeit	1,00	1,00	0,02	0,06	0,08
	0,20	0,61	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,01	0,01
	0,20	0,61	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,01
	0,20	0,61	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,07	0,08	Mortaliteit	8,00	9,08	0,06	0,06	0,13
	0,07	0,08	Morbiditeit	4,00	4,00	0,03	0,03	0,06
NMVOC	0,05	0,00	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,05	0,00	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal						2,54	0,98	3,52

**KV-STEG met CO2-afvang**

rendement = 47

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005 2020		Direct Indirect		Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	
CO2	37,00	103,38	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,14	0,39	0,53
SO2	0,06	1,08	Mortaliteit	2,02	2,29	0,01	0,22	0,23
	0,06	1,08	Morbiditeit	1,04	1,04	0,01	0,11	0,12
	0,06	1,08	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,06	1,08	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,02	0,03
	0,06	1,08	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,20	0,68	Mortaliteit	2,12	2,41	0,05	0,14	0,19
	0,20	0,68	Morbiditeit	1,00	1,00	0,02	0,07	0,09
	0,20	0,68	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,01	0,01

	0,20	0,68	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,01
	0,20	0,68	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,08	0,09	Mortaliteit	8,00	9,08	0,07	0,07	0,14
	0,08	0,09	Morbiditeit	4,00	4,00	0,03	0,04	0,07
NMVOG	0,05	0,00	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,05	0,00	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal						0,34	1,08	1,42

**KV-STEG met biomassa bijstook (30%)**

rendement = 50,5

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2	446,89	108,13	Klimaatverandering	0,04	0,04	1,70	0,41	2,11
SO2	0,04	0,76	Mortaliteit	2,02	2,29	0,01	0,15	0,16
	0,04	0,76	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,08	0,08
	0,04	0,76	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,04	0,76	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,02	0,02
	0,04	0,76	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,14	0,76	Mortaliteit	2,12	2,41	0,03	0,16	0,20
	0,14	0,76	Morbiditeit	1,00	1,00	0,01	0,08	0,09
	0,14	0,76	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,01	0,01
	0,14	0,76	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,01	0,01
	0,14	0,76	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,05	0,12	Mortaliteit	8,00	9,08	0,05	0,10	0,14
	0,05	0,12	Morbiditeit	4,00	4,00	0,02	0,05	0,07
NMVOG	0,04	0,01	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,04	0,01	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
NH3	0,00	0,04	Gezondheid	6,90	7,83	0,00	0,02	0,02
Totaal						1,83	1,08	2,92

**STEG-Aardgas**

rendement = 60

Direct	Indirect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
--------	----------	------	------	--------	----------	--------

Pollutant	kg	kg	Effect	€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2	315,00	21,12	Klimaatverandering	0,04	0,04	1,20	0,08	1,28
SO2	0,00	0,08	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,02	0,02
	0,00	0,08	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,08	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,08	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,08	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,15	0,07	Mortaliteit	2,12	2,41	0,04	0,01	0,05
	0,15	0,07	Morbiditeit	1,00	1,00	0,02	0,01	0,02
	0,15	0,07	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00
	0,15	0,07	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00
	0,15	0,07	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,00	0,01	Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,01	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00
NMVOC	0,18	0,00	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,18	0,00	Gewassen	0,64	0,64	0,01	0,00	0,01
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal						1,27	0,14	1,41

**STEG-Aardgas met CO2-afvang**

rendement = 54

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005 2020		Direct Indirect		Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	
CO2	35,00	23,47	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,13	0,09	0,22
SO2	0,00	0,09	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,02	0,02
	0,00	0,09	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,09	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,09	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,09	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,20	0,08	Mortaliteit	2,12	2,41	0,05	0,02	0,06
	0,20	0,08	Morbiditeit	1,00	1,00	0,02	0,01	0,03
	0,20	0,08	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00
	0,20	0,08	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00
	0,20	0,08	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,00	0,01	Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,01	0,01

	0,00	0,01	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00
NMVOG	0,18	0,00	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,18	0,00	Gewassen	0,64	0,64	0,01	0,00	0,01
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal						0,22	0,16	0,37

### Windenergie Land

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	Kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2	0,00	28,00	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,00	0,11	0,11
SO2	0,00	0,07	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,07	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,07	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,07	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,07	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,00	0,05	Mortaliteit	2,12	2,41	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,05	Morbiditeit	1,00	1,00	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,05	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,05	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,05	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,00	0,05	Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,04	0,04
	0,00	0,05	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,02	0,02
NMVOG	0,00	0,03	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,03	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal						0,00	0,20	0,20

### Windenergie Offshore

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	Kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2	0,00	27,00	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,00	0,10	0,10
SO2	0,00	0,06	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,06	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,01	0,01

	0,00	0,06 Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,06 Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,06 Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,00	0,04 Mortaliteit	2,12	2,41	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,04 Morbiditeit	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04 Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04 Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04 Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,00	0,02 Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,02 Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,01	0,01
NMVOG	0,00	0,00 Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00 Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00 Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
Totaal					0,00	0,16	0,16

**PV (2030)**

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2	0,00	74,00	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,00	0,28	0,28
SO2	0,00	0,22	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,04	0,04
	0,00	0,22	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,02	0,02
	0,00	0,22	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,22	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,22	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,00	0,24	Mortaliteit	2,12	2,41	0,00	0,05	0,05
	0,00	0,24	Morbiditeit	1,00	1,00	0,00	0,02	0,02
	0,00	0,24	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,24	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,24	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,00	0,07	Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,06	0,06
	0,00	0,07	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,03	0,03
NMVOG	0,00	0,01	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,01	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00

Totaal						0,00	0,52	0,52
--------	--	--	--	--	--	------	------	------

**Kernenergie**

Pollutant	Direct	Indirect	Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2	0,00	16,00	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,00	0,06	0,06
SO2	0,00	0,07	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,07	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,07	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,07	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,07	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,07	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,00	0,04	Mortaliteit	2,12	2,41	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,04	Morbiditeit	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,00	0,01	Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,01	0,01
	0,00	0,01	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,01	0,01
NMVOC	0,00	0,00	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,11	0,00	0,11
Totaal						0,11	0,11	0,23

**WKK-Biomassa**

Pollutant	Direct	Indirect	Effect	2005	2020	Direct	Indirect	Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	€-cent/kWh
CO2		61,00	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,00	0,23	0,23
SO2		0,07	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,01	0,01
		0,07	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,01	0,01
		0,07	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
		0,07	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
		0,07	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,07	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx		0,72	Mortaliteit	2,12	2,41	0,00	0,15	0,15

		0,72	Morbiditeit	1,00	1,00	0,00	0,07	0,07
		0,72	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,01	0,01
		0,72	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,01	0,01
		0,72	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10		0,07	Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,05	0,05
		0,07	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,03	0,03
NMVOG		0,09	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
		0,09	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,01	0,01
Straling		0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
NH3	0,00	0,12	Gezondheid	6,90	7,83	0,00	0,08	0,08
Totaal						0,00	0,66	0,66

### Biomassa centrale

Pollutant	Direct Indirect		Effect	2005 2020		Direct Indirect		Totaal
	kg	kg		€/kg	€/kg	€-cent/kWh	€-cent/kWh	
CO2	0,00	35,00	Klimaatverandering	0,04	0,04	0,00	0,13	0,13
SO2	0,00	0,20	Mortaliteit	2,02	2,29	0,00	0,04	0,04
	0,00	0,20	Morbiditeit	1,04	1,04	0,00	0,02	0,02
	0,00	0,20	Gewassen	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,20	Materiaal	0,23	0,23	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,20	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,00	1,19	Mortaliteit	2,12	2,41	0,00	0,25	0,25
	0,00	1,19	Morbiditeit	1,00	1,00	0,00	0,12	0,12
	0,00	1,19	Gewassen	0,13	0,13	0,00	0,02	0,02
	0,00	1,19	Materiaal	0,07	0,07	0,00	0,01	0,01
	0,00	1,19	Natuur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM10	0,00	0,10	Mortaliteit	8,00	9,08	0,00	0,08	0,08
	0,00	0,10	Morbiditeit	4,00	4,00	0,00	0,04	0,04
NMVOG	0,00	0,04	Gezondheid	0,13	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04	Gewassen	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00
Straling	0,00	0,00	Gezondheid	50000,00	50000,00	0,00	0,00	0,00
NH3	0,00	0,12	Gezondheid	6,90	7,83	0,00	0,08	0,08
Totaal						0,00	0,79	0,79