

Kosten van elektriciteitsopwekking

Notitie:

De kosten en onzekerheden van kernenergie en andere CO₂-emissie-reducerende technieken voor grootschalige elektriciteitsopwekking

Van: A.W.N. van Dril (ECN), M. Verdonk (PBL)

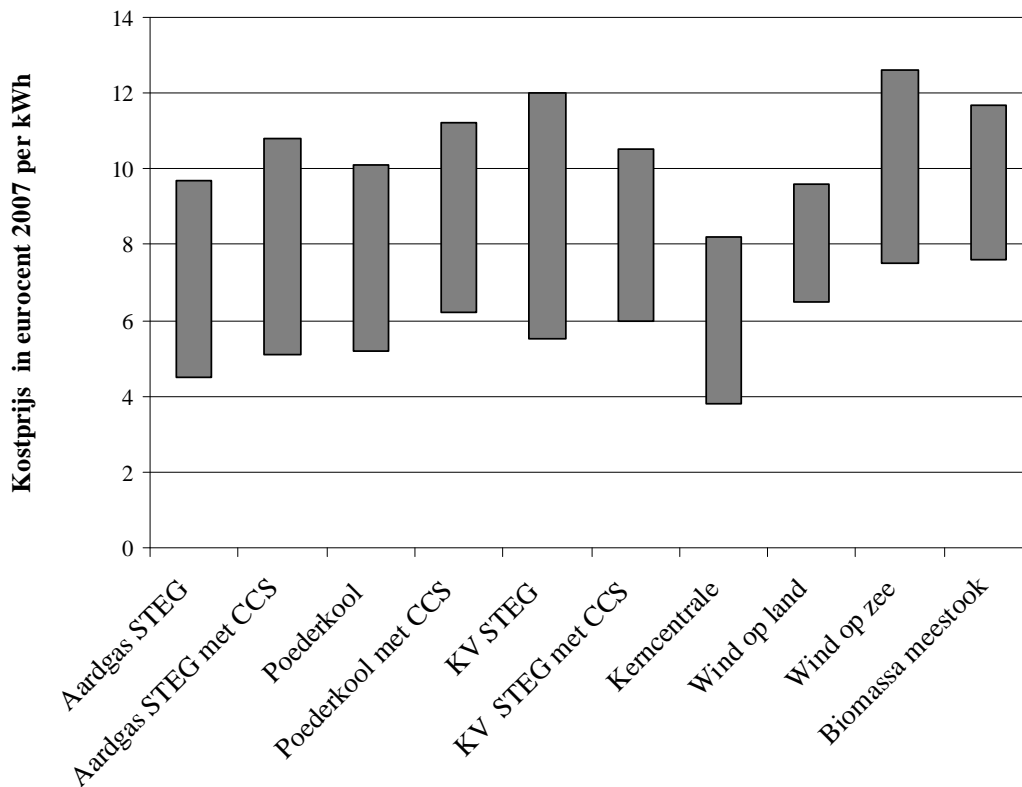
1. Inleiding

Naar aanleiding van de actuele maatschappelijke en politieke discussies hebben ECN en PBL de kosten (en de onzekerheden daarin) van kernenergie en andere CO₂-emissiereducerende opties voor grootschalige elektriciteitsopwekking in beeld gebracht. Deze notitie geeft echter geen volledig kader om de opties voor de opwekking van elektriciteit met elkaar te vergelijken. Kosten zijn niet de enige overwegingen die bepalend kunnen zijn voor een keuze (MNP, 2006; Daniëls en Farla, 2006a). Aspecten als draagvlak en diverse duurzaamheidsaspecten zijn in deze notitie buiten beschouwing gelaten. Voorbeelden van duurzaamheidsaspecten waar geen rekening mee is gehouden zijn bijvoorbeeld: hinder door windturbines, energie-voorzieningszekerheid, verdere uitputting van fossiele energie – en uraniumvoorraden, risico's van langdurige opslag van radioactief afval, proliferatie en ongevallen bij kerncentrales en risico's bij opslag van CO₂.

De in deze notitie opgenomen kostprijs per kWh en de investeringskosten zijn bepaald vanuit het perspectief van de investeerder. De kosteneffectiviteit van CO₂-reductie is gebaseerd op het nationaal perspectief. Aanvullend zijn enkele externe kosten en baten, zoals vermeden schade door vermindering luchtverontreinigende emissies beschouwd. De notitie besteedt daarnaast speciale aandacht aan de onzekerheden van de kosten van kernenergie. De notitie combineert eerder gepubliceerde gegevens van MNP en ECN van het Optiedocument (Daniëls en Farla, 2006b) met recente rapportages zoals de Fact Finding Kernenergie (Scheepers *et al.*, 2007).

2. Kosten

Een overzicht van de kostprijs van enkele CO₂-emissiereducerende opties in de energiesector staat in Figuur 1. De kostprijs in centen per kWh geeft het meest volledige beeld van de kosten voor een investeerder om elektriciteit te produceren. Uit Figuur 1 blijkt dat de kostprijsrange van kernenergie (3,8 tot 8,2 eurocent per kWh) de laagste grenswaarden heeft, maar ook voor een groot deel overlapt met de overige opties, met uitzondering van wind op zee en biomassameestook. Gas- en kolenvermogen met CO₂-afvang en opslag (CCS) en windenergie op land hebben een vergelijkbare bandbreedte in kosten.



Figuur 1 Overzicht van de kostprijs per kWh van CO₂-emissiereducerende technieken voor de elektriciteitsproductie vanuit investeursperspectief¹, gebaseerd op ECN en AEA (nog te publiceren onderzoeken). Jaar van ingebruikstelling 2020, CO₂-prijs 20 tot 50 euro per ton. Externe kosten en baten en overwegingen op het gebied van duurzaamheid en risico's zijn hierin niet meegenomen.

De kostprijs per kWh is opgebouwd uit de kapitaalslasten, de brandstofkosten, kosten van CO₂-emissierechten en de kosten voor onderhoud en bediening. De kapitaalslasten vertegenwoordigen de jaarlijkse afschrijvingen van en rente over de investering. De investeringen zijn weergegeven in Tabel 1. Uit deze gegevens blijkt dat de investering voor kernenergie vergelijkbaar is met een nieuwe kolencentrale met CCS. De investeringskosten van kernenergie en een nieuwe kolencentrale met CCS zijn hoog in vergelijking met hernieuwbare opties of aardgas (met CCS). Tegenover opties met lagere kapitaallasten wegen operationele kosten, vooral brandstofkosten, zwaarder in de kostprijs per kWh.

De kosteneffectiviteit van CO₂-reductie voor de verschillende opties is weergegeven in tabel 1 en is beschouwd vanuit nationaal perspectief op de termijn van 2020. De kosteneffectiviteit van CO₂-reductie van de opties is bepaald ten opzichte van een poederkoolcentrale, omdat momenteel een poederkoolcentrale een gangbare basislast-centrale bij nieuwbouw is. Kernenergie scoort op dit punt het beste in vergelijking met de overige opties. De kosten voor het vermijden van CO₂-emissies door kernenergie ten opzichte van een poederkoolcentrale wordt geraamd op 0 tot 20 euro per ton (zie Tabel 1). De kosteneffectiviteit van CO₂-afvang en -opslag ligt in de orde van 20 tot 40 euro per ton. De ondergrens van windenergie kan rond 2020 in dezelfde kostenrange terecht komen als CO₂-afvang en opslag. Het grote aandeel en de grote bandbreedte van kapitaalkosten in de kWh-kosten van wind resulteren echter in een bovengrens tot 80 euro per ton. Meestook van biomassa in kolencentrales is in deze vergelijking minder kosteneffectief 40 tot 90 euro per ton. Ten opzichte van wind speelt hier het voordeel van technische vooruitgang een minder belangrijke rol en blijft de kostprijs sterk afhankelijk van de biomassaprijs. De aardgas-STEG is energiebesparend

¹ In de terminologie van de Methodiek milieukosten en het Optiedocument zijn dit eindverbruikerskosten.

ten opzichte van poederkool, de kosteneffectiviteit is hier sterk afhankelijk van de prijsverhouding tussen aardgas en kolen. Ook de kolenvergasser (KVSTEG) is energie-efficiënter dan poederkool, maar heeft ook veel hogere investeringskosten. Daardoor is de kosteneffectiviteit zeer gevoelig voor de technische en kostenaannamen.

Tabel 1 Overzicht investeringskosten van CO₂-emissiereducerende technieken voor elektriciteitsproductie vanuit investeerdersperspectief zichtjaar 2020, gebruik makend van IPCC (2005), Daniëls en Farla (2006b), ECN en AEA (nog te publiceren onderzoek) en Scheepers et al (2007). Jaar van ingebruikstelling 2020. Externe kosten en baten en overwegingen op het gebied van duurzaamheid en risico's zijn hierin niet meegenomen. In de rechterkolommen is een indicatie van de kosteneffectiviteit vanuit nationaal perspectief aangegeven. Grote bandbreedten bij de Aardgas STEG en KVSTEG duiden op grote gevoeligheid voor technische en kostenaannamen.

	Investering		Kosteneffectiviteit	
	euro/kW _e		euro/ton CO ₂	
	laag	hoog	laag	hoog
Aardgas STEG	560	840	0	70
Aardgas STEG met CCS	840	1260	20	60
Poederkool	1050	1750	referentietechniek	
Poederkool met CCS	1920	2880	20	40
KV STEG	1490	2230	0	150
KV STEG met CCS	1730	2590	20	40
Kerncentrale	2000	3000	0	20
Wind op land	880	1320	20	70
Wind op zee	1250	2100	20	80
Biomassa meestook	1050	1750	40	90

De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd in het kostenoverzicht van Figuur 1 en Tabel 1. Ten eerste hebben de kostengegevens betrekking op opwekking van elektriciteit in basislast, behalve bij windenergie. Windenergie concurreert met basislastvermogen. Daarnaast zijn niet alle opties even flexibel om in te spelen op fluctuaties in vraag of aanbod van elektriciteit. Kernenergie is namelijk relatief inflexibel terwijl aardgascentrales relatief flexibel zijn. Windenergie heeft een wisselend aanbod. Deze eigenschappen worden niet meegewogen in de gerapporteerde kosten. Voor windenergie is wel rekening gehouden met onbalanskosten, d.w.z. compensatiekosten voor onder andere het onzekere karakter van het windaanbod. Biomassa betreft meestook in kolencentrales. Het overzicht betreft nieuwe installaties, bij ingebruikstelling in 2020, kosten uitgedrukt in €₂₀₀₇. De gebruikte nominale disconteringsvoet vanuit investeerdersperspectief is 9 tot 10,5%, vanuit nationaal perspectief is deze 4%.

In Scheepers *et al.* (2007) zijn de kosten per kWh voor een kerncentrale inclusief kosten voor onderhoud & bediening, splijtstofkosten, afvalverwerking en -opberging, ontmantelingskosten, kapitaalkosten en rendement op eigen vermogen. Hierbij is uitgegaan van een bouwtijd van 5-7 jaar. De gehanteerde bandbreedte van de gasprijzen op lange termijn is 4 tot 10 euro per GJ en voor kolen op lange termijn 2 tot 4 euro per GJ. De huidige prijzen (zomer 2008) zitten aan de bovenkant van deze bandbreedte. Omdat de gas en kolen prijzen onderling gecorreleerd zijn, zijn aannames ten aanzien van de gas-kolen prijsverhouding gehanteerd bij het bepalen van de kosteneffectiviteit van een aardgas STEG. De kosten per kWh zijn inclusief kosten van CO₂-emissierechten van gemiddeld 35 euro per ton. De bandbreedte die voor de CO₂-prijs is verondersteld bedraagt 20 tot 50 euro per ton in een Europees handelssysteem, conform de scenario's EU-laag en EU-hoog uit ECN en MNP (2007).

3. Bandbreedten en onzekerheden

De aangegeven kosten bevatten verschillende technische en marktonzekerheden die leiden tot bandbreedten. Verschillende onzekerheden hebben een gelijke invloed op de verschillende technieken, zoals rente, staalprijzen en engineeringkosten. Er zijn echter ook onzekerheden die juist voor enkele opties zwaarder wegen dan bij andere opties. Zo wegen de brandstofkosten voor een gascentrale zwaarder mee in de kosten per kWh dan bijvoorbeeld in vergelijking met de brandstofkosten voor een kerncentrale. Verder varieert het belang van investeringskosten bij de verschillende opties. Bij wind-op-zee en kernenergie zijn de investeringskosten relatief hoog en wegen daarmee relatief zwaar mee in de kosten per kWh in vergelijking met minder kapitaalintensieve opties.

In deze notitie wordt gezien het belang van de huidige maatschappelijke discussie, bijzonder aandacht besteedt aan onzekerheden in de kosten van kernenergie. In de Fact Finding Kernenergie (Scheepers *et al.* 2007) en (MNP 2006) wordt nog een aantal oorzaken genoemd voor mogelijke extra kosten en onzekerheden rondom kernenergie. De Fact Finding studie refereert daarbij weer aan een aantal buitenlandse studies. Een deel van deze onzekerheden geldt overigens ook voor de andere CO₂-reducerende opties. Dit geldt in het bijzonder voor kapitaalintensieve opties zoals KV STEG, CCS en windenergie op zee, aangezien hiermee nog maar relatief weinig ervaring is opgedaan, vergelijkbaar als met de bouw van 3^e generatie kernenergiecentrales. Bij CCS kan daarnaast ook nog de dekking van aansprakelijkheid bij ongelukken een extra onzekerheid vormen. De volgende aspecten leiden mogelijk tot overschrijding van de in de Figuur 1 en Tabel 1 opgenomen kostenbandbreedten van kernenergie:

1. Toenemende bouw- en operationele kosten door aanvullende eisen ten opzichte van momenteel in aanbouw zijnde 3^e generatie kerncentrales. Maar ook overig beleid (zoals klimaat- en luchtbeleid) en andere externe factoren (zoals brandstofprijzen) hebben invloed op de kosten en kosteneffectiviteit van de besproken opties;
2. Technologische ontwikkelingen zijn onzeker en kunnen leiden tot hogere of lagere investeringskosten en kostprijzen;
3. Onderschatting investeringskosten (tot 30%) vanwege geringe ervaring met de bouw van 3^e generatie kerncentrales;
4. Onderschatting van de bouwtijd, die tot een aanzienlijke verhoging van de kapitaalkosten kan leiden;
5. Onderschatting van de (eind)bergingskosten van nucleair afval, omdat deze kosten in andere landen lager kunnen uitvallen dan in Nederland vanwege schaalvoordelen;
6. Bij andere verwerkingsmethoden van nucleair afval dan directe opslag, zoals bij opwerking, worden de kosten voor afvalverwerking mogelijk aanzienlijk hoger;
7. De exploitatieperiode van een kerncentrale is onzeker, omdat bijvoorbeeld inzichten in veiligheid kunnen veranderen;
8. De uiteindelijke omvang van het ontmantelingsfonds, dat tijdens de exploitatieperiode moet worden gevuld, is onzeker omdat deze sterk wordt beïnvloed door het veronderstelde rentepercentage en vereiste waarborgen. Daarbij zijn de kosten van eindberging zelf ook nog onzeker;
9. Overschatting van de veronderstelde bedrijfstijd (capaciteitsfactor). Vanwege incidenten of storingen kan een kerncentrale tijdelijk uit bedrijf worden genomen.
10. De exploitant is voor nucleaire ongevallen verzekerd, maar de wettelijke aansprakelijkheid is beperkt tot 340 miljoen euro. Als de schade groter is, dan stelt de overheid een bedrag te beschikking tot een schade omvang van 2.269 miljoen euro. Het is niet te voorzien of deze aansprakelijkheid en bijdrage van de overheid voldoende is om de werkelijke kosten te dekken. Daarnaast kunnen er ook niet-materiële kosten bij een nucleair ongeval spelen.

4. Externe kosten en baten

Bij toepassing van grootschalige elektriciteitsopwekking kunnen externe kosten en baten ontstaan. Hiervan is sprake als bij het produceren van elektriciteit negatieve of positieve effecten ontstaan die ten laste komen van derden en niet in de kosten voor de exploitant zijn verwerkt. Dit betreft bijvoorbeeld gezondheidschade door luchtverontreiniging, de kosten van klimaatverandering of de leveringszekerheid van energie. De externe kosten van gezondheidsschade die ontstaat bij ongevallen liggen volgens Scheepers *et al.* (2007) voor kernenergie beneden 1 eurocent per kWh. Dit is qua orde van grootte vergelijkbaar met de externe kosten voor andere opties waar de inzet van fossiele brandstoffen wordt vermeden, zoals met windenergie.. Voor elektriciteit geproduceerd uit kolen en gas zonder CO₂-opslag liggen die externe kosten een factor tien hoger. In een studie door Bollen en Eerens (2007) bedragen de gemonetariseerde gezondheidsbaten van een kerncentrale ten opzichte van een kolencentrale door een verbeterde luchtkwaliteit en een verminderde bijdrage aan klimaatverandering circa 0,5 eurocent per kWh. Andere externe kosten die in Scheepers *et al.* (2007) worden genoemd zijn bijvoorbeeld kosten die de overheid moet maken voor publieksvoorlichting over kernenergie, voor beveiliging van afvaltransporten en voor beveiliging tegen terroristische acties of hebben te maken met uitputting van uraniumvoorraden en gevolgen van proliferatie. Toepassing van kernenergie heeft daarnaast een gunstig effect op energievoorzieningszekerheid (Scheepers *et al.*, 2007). Voor fossiele brandstoffen speelt uitputting van voorraden en voorzieningszekerheid een rol, waarbij met name aardgas minder gunstig scoort.

Referenties

- Bollen, J.C. en H.C. Eerens (2007) The effect of a nuclear energy expansion strategy in Europe on health damage from air pollution. Publicatienummer 500116003, Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven.
- Daniëls, B.W. en J.C.M. Farla (2006a) Potentieelverkenning klimaatdoelstellingen en energiebesparing tot 2020. ECN rapportnummer ECN-C--05-106, ECN/MNP, Petten/Bilthoven.
- Daniëls, B.W. en J.C.M. Farla (2006b) Optiedocument energie en emissies 2010/2020. ECN rapportnummer ECN-C--05-105, ECN/MNP, Petten/Bilthoven.
- ECN en AEA (nog ongepubliceerd materiaal). ECN/AEA, Petten.
- ECN en MNP (2007) Beoordeling Werkprogramma Schoon en Zuinig. Rapport nr. ECN-E--07-067, ECN/MNP, Petten/Bilthoven.
- IPCC (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- MNP (2006) Kosten van kernenergie in het Optiedocument ECN/MNP. Webbericht van 28 februari 2006, MNP, Bilthoven.
- Scheepers, M.J.J., A.J. Seebregts, P. Lako, F.J. Blom en F. van Gemert (2007) Fact Finding Kernenergie t.b.v. de SER-Commissie Toekomstige Energievoorziening. ECN rapportnummer ECN-B--07-015, ECN/NRG, Petten.