

# Kosteneffectieve reductie van CO<sub>2</sub>-emissies

C.W. Lee\*

**H**et verminderen van de uitstoot van broeikasgassen vraagt een mondiale aanpak en gaat gepaard met zeer hoge investeringen. Daarbij is het van groot belang dat de internationale milieufondsen zo efficiënt mogelijk worden ingezet. Dit artikel bevat een simulatie die laat zien in welk deel van de wereld welke maatregelen zouden moeten worden getroffen om ervoor te zorgen dat de internationaal afgesproken emissiereductie tegen zo laag mogelijke kosten wordt gerealiseerd.

Het broeikas-effect wordt door politici in toenemende mate als een urgente kwestie beschouwd. De Toronto conferentie van 1988 concludeerde dat, om de atmosferische concentraties van CO<sub>2</sub> te stabiliseren, een uitstootvermindering van meer dan 50% ten opzichte van 1988 noodzakelijk is. Eerder al dat jaar werd in Montreal overeengekomen om CFK's, die eveneens een belangrijke bijdrage aan het broeikas-effect leveren, in geïndustrialiseerde landen uit te bannen. Ook op de UNCED-conferentie in Rio (1992) is de politieke wil geuit om de klimaatverandering een halt toe te roepen. Beseft wordt, dat een echt effectieve aanpak niet mogelijk is, anders dan op een mondiale schaal.

Het is echter onduidelijk, hoeveel een dergelijk mondiaal beleid zal gaan kosten en hoeveel de emissies in diverse regio's gereduceerd dienen te worden. Omdat de totale investeringen in emissiereducerende maatregelen van grote omvang zijn, kunnen grote kostenbesparingen geboekt worden, door veel te investeren in gebieden waar relatief goedkoop gereduceerd kan worden en in technieken die dit relatief goedkoop bewerkstelligen.

De vraag is nu, hoe de reductienormen zo efficiënt mogelijk kunnen worden gerealiseerd. Anders gesteld, wat is de meest kosteneffectieve allocatie van emissiereductie? Onderstaand wordt de kern van een model geschetst, dat als raamwerk kan dienen om deze vraag te beantwoorden. Hiermee wordt voornamelijk niet beoogd om één 'harde' einduitkomst te presenteren, maar veeleer om een idee te verkrijgen van de richting en de orde van grootte van noodzakelijke beleidsmaatregelen<sup>1</sup>.

## Simulatie

Het zoeken naar kosteneffectieve allocaties kan eenvoudig worden vertaald in een lineair programmeringsmodel. Hiermee wordt getracht de totale kosten voor de wereld als geheel te minimaliseren onder de

randvoorwaarde van een maximale uitstootnorm. De kosten worden hierbij onderscheiden naar regio en naar soort maatregel<sup>2</sup>. Ofwel, minimaliseer

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m K_{ij} (q_{ij}) \quad \text{onder nevenvoorwaarde}$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (q_{ij}) \geq N \quad \text{waarbij}$$

$q_{ij}$  = hoeveelheid gereduceerde emissie in tonnen CO<sub>2</sub>

$K_{ij}$  = kosten

$i$  = index voor de soort maatregel (in totaal  $m$  soorten)

$j$  = index voor de regio (in totaal  $n$  regio's)

$N$  = politiek bepaalde emissienorm.

Onderscheiden zijn drie regio's: de OESO, Oost-Europa en de rest van de wereld (ROW), en vijf soorten maatregelen: energiebesparing, een 'fuel switch'<sup>3</sup>, bosbeheer<sup>4</sup>, het overschakelen op alternatieve energie en het substitueren van CFK's. De reductienorm is ge-

\* De auteur is student aan de economische faculteit van de Rijksuniversiteit Groningen. Dit artikel vormt een samenvatting van de resultaten van zijn afstudeeropdracht. De auteur betuigt dank aan C.J. Jepma voor zijn begeleiding.

1. Het probleem ligt met name in het gebrek aan gegevens over kosten, gespecificeerd per regio en per techniek.

2. Bovendien worden de kosten, hoewel theoretisch vaak niet-lineair, voor de goede werking van het model benaderd door lineaire, discontinue functies.

3. Onder een fuel switch wordt verstaan de substitutie van kolen en/of olie door aardgas.

4. Bosbeheer omvat maatregelen als bebossing van nieuwe arealen en het systematisch kappen en duurzaam conserveren van hout, gevolgd door herbebossing. De eerste maatregel vergroot de totale absorptie van CO<sub>2</sub> slechts eenmalig en kan daarom in deze context uitdrukkelijk niet als duurzaam worden beschouwd. Bij de tweede maatregel is het absorberend vermogen theoretisch vrijwel onbeperkt.

steld op 50% van de emissies van CO<sub>2</sub> en CFK's ten opzichte van 1985 in CO<sub>2</sub>-equivalente<sup>5</sup> eenheden<sup>6</sup>.

Cruciaal voor de uitkomsten van het model zijn de bedragen voor de kosten per regio en per techniek K<sub>ij</sub>. Deze gelden als exogene invoer voor het model. In de literatuur bestaan helaas slechts weinig schattingen met enig onderscheid naar regio en techniek. Bovendien gaan de meeste studies uit van één bedrag aan gemiddelde kosten per techniek; het is echter te verwachten dat de marginale kosten toenemen, waardoor de totale kosten meer dan proportioneel zullen stijgen. Getracht is daarom, de waarden van de marginale kosten af te leiden uit een beperkt aantal meer uitgebreide studies<sup>7</sup>. Het ligt buiten de opzet om deze bedragen zelf met een afzonderlijk model te schatten. Onderstaand zijn deze waarden getabelleerd. Aangezien de resultaten van het model niet 'harder' zijn dan de gebrekkige kwaliteit van de invoer, dienen zij vooral als een simulatie gelezen te worden.

De waarden in de tabel geven per regio weer, hoeveel miljoenen dollars in een techniek geïnvesteerd dienen te worden, om hiermee de uitstoot met één miljoen ton koolstof te verminderen. Om de efficiëntie van verschillende instrumenten onderling vergelijkbaar te maken, is hun bijdrage op gemeenschappelijke eenheden herleid, te weten op CO<sub>2</sub>-equivalente eenheden<sup>8</sup>.

Duidelijk blijkt, dat de marginale kosten stijgen naarmate meer wordt gereduceerd. Doorgaans is die stijging aanvankelijk geleidelijk, maar loopt zij bij verdergaande reductie vrij abrupt op tot extreem hoge waarden. De reden hiervan is, dat de goedkope mogelijkheden voor het inzetten van een maatregel op een gegeven moment zijn uitgeput. Om nog meer CO<sub>2</sub> te reduceren, moet dan worden overgestapt op duurdere tot zeer dure methoden. Wanneer ook deze ten volle zijn benut, zijn de grenzen van de capaciteit van het instrument bereikt. Nog meer willen reduceren kan dan alleen maar door het ontwikkelen van nog niet bestaande technologie, hetgeen uiterst kostbaar is. Met name uit de cijfers voor alternatieve energie blijkt dat de grenzen van de beschikbare capaciteit snel zijn bereikt.

Het verloop van de waarden in de tabel en hun onderlinge verhoudingen zijn het resultaat van een complex van oorzaken. Hier worden slechts enkele voorname factoren genoemd. De negatieve waarden bij energiebesparing duiden erop, dat aanvankelijk kostenbesparingen geboekt kunnen worden. Het energiegebruik is zo inefficiënt, dat de investeringen aanvankelijk gemakkelijk terugverdiend kunnen worden. De mogelijkheden hiervoor zijn echter het grootst in de OESO, omdat het energiegebruik hier veel hoger is dan elders. De capaciteit voor emissiereductie via een goedkope energiebesparingsmethode is in de OESO daardoor veel groter dan elders. In andere regio's worden de grenzen van goedkope energiebesparing veel eerder bereikt.

Oost-Europa boekt lage cijfers voor een fuel switch vanwege zijn aanzienlijke voorraden gas, wat de transportkosten beperkt. De cijfers voor de rest van de wereld worden sterk beïnvloed door China, dat over immense voorraden kolen beschikt, hetgeen

**Tabel 1. Marginale kosten emissiereductie (mln \$/MtC)**

Maatregel	regio	Intervallen (in MtC)						
		0-25	25-50	50-100	100-150	150-250	250-500	500-1000
Energie besparing	OESO	-8	10	25	30	45	150	1000
	O-Eur.	-5	15	30	85	150	600	1500
	ROW	3	20	70	100	190	800	1800
Fuel switch	OESO	10	20	35	60	90	180	1000
	O-Eur.	5	10	15	25	40	100	400
Herbebossing	ROW	15	30	80	100	180	240	1200
	OESO	20	60	110	250	500	1500	3000
	O-Eur.	12	20	40	75	100	300	2000
Alternatieve energie	ROW	5	10	20	30	45	60	100
	OESO	10	25	60	95	200	600	1500
	O-Eur.	30	100	160	200	800	1400	3000
CFK's	ROW	35	90	140	220	700	1500	3000
	OESO	5	6	15	20	40	60	500
	O-Eur.	20	45	80	180	800	1200	2000
	ROW	12	45	90	140	220	1500	700

een fuel switch duur maakt. Oorzaken voor de lage kosten van herbebossing in de rest van de wereld zijn de veel grotere beschikbare arealen, de veel lagere grondprijs en lagere managementkosten.

De relatief lage kosten van alternatieve energie in de OESO kunnen samenhangen met het feit dat daar reeds relatief veel aan de ontwikkeling ervan is gedaan, en dat toepassing ervan goedkoper is dan een eerste begin elders. Ten slotte scoort de OESO ook laag bij CFK's. Ook dit wordt verklaard door het feit dat de andere regio's een kleiner CFK-verbruik hebben, waardoor goedkope substituties reeds eerder de grens van hun capaciteit bereiken.

## Resultaten

In tabel 2 worden de resultaten van een eerste simulatie, hierna aangeduid als basissimulatie, gepresenteerd. Uit de tabel blijkt dat, om de beoogde doelstelling van 50% emissiereductie te halen, mondiaal zo'n \$ 270 miljard in emissiereducerende en/of absorptievergrotende maatregelen zal moeten worden geïnvesteerd. Bij deze omvang van de inspanning zijn de kosten van één extra ton uitstoorteductie reeds opgelopen tot \$ 150. Volgens de tabel is het efficiënt om de instrumenten energiebesparing, fuel switch en substitutie van CFK's in ongeveer gelijke mate in te zetten en (voorlopig) weinig gebruik te maken van alternatieve energie. Daarbij heeft de OESO een comparatief kostenvoordeel in energiebesparing en substitutie van CFK's en Oost-Europa in een fuel switch<sup>9</sup>.

5. De CO<sub>2</sub>-equivalentie van bij voorbeeld 1 ton CFK's, is die hoeveelheid CO<sub>2</sub>, die zou leiden tot een even grote opwarming van de globale temperatuur. In het vervolg zijn deze hoeveelheden uitgedrukt in tonnen koolstof (C).

6. Dit komt neer op ca. 4 GtC (4 mrd ton koolstof) per jaar.

7. W.D. Nordhaus, The cost of slowing climate change: a survey, *The Energy Journal*, jg. 12, 1991; W.D. Nordhaus, To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect, *The Economic Journal*, juli 1991, blz. 920-937; en McKinsey & Co., *Protecting the global environment, findings and conclusions*, Ministerial conference on atmospheric pollution and climate change, Noordwijk 1989.

8. Zie voor de inhoud van dit begrip noot 6.

Opvallend is de sterke inzet van bosbeheer, een maatregel die vooral aantrekkelijk is in de ROW. De inspanningen in de drie regio's zijn ongeveer gelijkwaardig in termen van tonnen gereduceerde koolstof, maar niet in termen van geld: in de landen buiten de OESO en Oost-Europa moet verreweg het meest worden geïnvesteerd.

### Gevoeligheidsanalyse

De resultaten van de basissimulatie tonen de meest efficiënte verdeling van maatregelen over de regio's, gegeven de gekozen waarden van de onderliggende variabelen. De juiste hoogte van de waarden van deze variabelen is echter allesbehalve zeker. Om het effect van een verandering in deze waarden te bestuderen, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In tabel 3 worden hiervan de resultaten per regio en per maatregel samengevat. In het nu volgende worden per veranderde variabele de belangrijkste consequenties besproken.

#### Andere hoogte van de norm

Het is denkbaar, dat in de politiek emissiereductie-normen voor de diverse broeikasgassen worden overeengekomen, die in het model een andere hoogte voor de gemeenschappelijke norm impliceren dan de gekozen hoogte van 50%. Ook is het mogelijk, dat de gekozen 50%-norm wel realistisch is, maar dat hiervan achteraf wordt afgeweken, omdat meer bekend is geworden over het verband tussen emissies en een versnelling van het broeikas-effect.

Om deze redenen zijn in de gevoeligheidsanalyse simulaties uitgevoerd voor normwaarden van 35%, 45%, 55% en 65% emissiereductie. Hieruit blijkt dat de totale kosten meer dan evenredig stijgen met een stijging van de emissienorm. De marginale kosten lopen eveneens snel op van \$ 100, \$ 100, \$ 180 naar \$240 per ton koolstof. Opvallend is dat bij een soepe-

le norm van 35% bijna de helft (42%) van de reducties in de OESO plaatsvindt. 24% van de mondiale reducties geschiedt in Oost-Europa en 34% in de overige landen. Naarmate de norm wordt aangescherpt, wisselt deze verdeling, waarbij uiteindelijk bij een 65%-norm de inspanningen in de ROW het leeuwedeel vormen (40%). De opvallendste veranderingen in de verdeling tussen maatregelen zijn, dat eerst bosbeheer in belang toeneemt en later een fuel switch.

#### Verdere ontwikkeling van alternatieve energie

Uit de basissimulatie bleek dat de rol van alternatieve energie (vooral snog) beperkt is. Indien echter de technologische ontwikkeling en toepassing van alternatieve energiebronnen in de komende jaren onverminderd doorgaat, zal het overschakelen op alternatieve energie goedkoper worden dan in de basissimulatie is verondersteld. In de gevoeligheidsanalyse is daarom het effect bekeken van een geringere stijging van de marginale kosten met een factor 1/2, 1/5, 1/10 en 1/20. Gezien de verregaande invloed van de technologische vooruitgang op de kosten, lijken deze getallen niet onrealistisch.

Zoals te verwachten valt dalen de totale kosten, echter in verhouding tot de daling in de kosten van alternatieve energie niet in grote mate. Dit komt uiteraard, doordat de kosten van alternatieve energie slechts een deel uitmaken van de kosten van het totale pakket maatregelen. De interregionale verdeling verandert slechts weinig, waarbij de inspanning in met name de ROW afneemt. De stijging in het gebruik van alternatieve energie verloopt precies parallel met de daling in de inzet van bosbeheer. Alternatieve energie kan de veelbelovendste van alle opties worden, maar in de gevoeligheidsanalyse gebeurt dit pas wanneer de stijging van de marginale kosten met een factor 20 vermindert (!).

#### Goedkopere fuel switch

Technologische vooruitgang kan tevens de substitutie van kolen en olie door aardgas goedkoper doen verlopen. Bekeken is het effect van een halvering van de hellingshoeken van de desbetreffende kosten-curve.

Uit tabel 3 blijkt, dat de totale kosten sneller dalen dan bij het goedkoper worden van alternatieve energie. Dit hangt samen met het feit dat het belang van de fuel switch in de basissimulatie veel groter is dan dat van alternatieve energie.

De veranderingen in de interregionale verdeling van de inzet van instrumenten zijn zeer klein, maar opvallend is dat nu veel minder kosten gemaakt worden in Oost-Europa, ondanks een vrijwel gelijke re-

Tabel 2. Resultaten van de basissimulatie

Inzet maatregel (MtC <sup>a</sup> )	OESO	O-Eur.	ROW	Totaal
1. energiebesparing	350	250	150	750
2. fuel switch	250	500	150	900
3. bosbeheer	100	250	1000	1350
4. alternatieve energie	150	50	100	300
5. CFK's	500	100	150	750
Totaal	1350	1150	1550	4050
Kosten maatregel (mrd \$)	OESO	O-Eur.	ROW	Totaal
1. energiebesparing	22,3	21	9,075	52,375
2. fuel switch	14,5	31,375	10,125	56
3. bosbeheer	7,5	16,55	72,375	96,425
4. alternatieve energie	8,625	3,25	10,125	22
5. CFK's	21,025	5,625	12,925	39,575
Totaal	73,950	77,8	114,625	266,375

a. 1 MtC = 106 ton koolstof = 1 miljoen ton koolstof.

NB. Marginale kosten in het optimum: \$150 per ton koolstof.

9. Uitspraken aangaande de interregionale verdeling in dit artikel dienen niet onjuist te worden geïnterpreteerd. De uitkomsten van de simulaties zijn slechts een antwoord op de vraag, hoeveel van elk instrument in de onderscheiden regio's moet worden ingezet en hoe groot de kosten daarvan in deze regio's zijn, gegeven de doelstelling om een mondiale norm zo efficiënt mogelijk te realiseren. Dit betekent niet, dat deze gevonden inzet van maatregelen ook daadwerkelijk door deze regio's bewerkstelligd moet worden, of dat deze kosten ook volgens deze verdeling door deze regio's gedragen moeten worden.

ductie-inspanning. Anders gezegd, de regio met de laagste comparatieve kosten in deze techniek kan haar voornaamste instrument nu nog goedkoper inzetten.

### Bosbeheer

Schattingen omtrent de absorptiecapaciteit van bos variëren van circa 7 tot 135 ton CO<sub>2</sub> per ha per jaar. Bovendien lopen de geschatte kosten per ha bos wijd uiteen. Hierdoor bestaat grote onzekerheid over de aantrekkelijkheid van maatregelen in het vlak van bosbeheer. In de simulaties is geëxperimenteerd met respectievelijk een verdubbeling, een vervijfvoudiging en een vertienvoudiging van de hellingshoeken van de onderhavige kostencurve. Een neerwaartse verschuiving van de kostencurve is niet beschouwd, omdat blijkens de basisresultaten de in de basissimulatie gebruikte waarden mogelijk reeds aan de lage kant zijn.

De resultaten tonen een toename in de totale kosten, echter in afnemende mate. Dit valt te verklaren, doordat nu het duurder geworden bosbeheer wordt gesubstitueerd door andere technieken. De emissiereductie in de ROW daalt, hetgeen vooral door een vergrote inspanning in de OESO wordt opgevangen. Tegenover een forse stijging in de inzet van een fuel switch staat een daling in de inzet van bosbeheer: de reductie middels bosbeheer daalt van 1350 naar 175 MtC! Deze drastische daling geeft aan dat, met de huidige onzekerheid over de kosten per gereduceerde ton koolstof, geen harde conclusies kunnen worden getrokken omtrent de rol van dit instrument.

### Voortrekkersrol van de OESO

Het is denkbaar, dat geen overeenstemming wordt bereikt over een mondiale norm, en dat de OESO een voortrekkersrol wil vervullen door als enige haar uitstoot te verminderen<sup>10</sup>. De vraag is dan, of zij alleen in staat is de totale mondiale emissies met een normpercentage te verminderen. Uitgegaan wordt van een wat lagere norm van 20% en 35%.

Een voortrekkersrol wordt mogelijk bij een vergrote inspanning in de OESO in alle maatregelen. De totale kosten in de eerste simulatie dalen bijna evenveel als de norm wordt versoepeld, te weten 60%. Echter, indien de OESO iets meer van de mondiale emissies moet gaan reduceren, stijgen de kosten explosief van \$ 118 naar \$ 749 miljard. Dit wijst erop, dat de OESO wellicht de capaciteit heeft om een begin te maken met de reducties, maar zeker niet in staat is om de last van de gehele wereld te dragen.

### Conclusies

Uit het voorgaande mag blijken, dat voor het invullen van mondiaal beleid een nadere beschouwing van comparatieve kosten tussen regio's en technieken de moeite waard is.

**Tabel 3. Gevoeligheidsanalyse: totale kosten (mrd. \$) en totalen van emissiereductie (MtC)**

Onderwerp van simulatie/ gevoeligheidsanalyse	totale kosten	Totale emissiereductie per regio			Totale emissiereductie per maatregel				
		OESO	Oost- Europa	ROW	energie- besp.	fuel switch	bos- beheer	altern. energie	CFK's
Basissimulatie	266.375	1350	1150	1550	750	900	1350	300	750
norm 35%	130.375	1200	675	960	500	600	810	225	700
norm 45%	211.375	1200	995	1450	550	900	1270	225	700
norm 55%	333.775	1705	1200	1550	900	1105	1350	350	750
norm 65%	502.475	1850	1300	2115	1000	1465	1350	550	900
Alternatieve energie (x 1/2)	242.875	1350	1150	1550	550	900	1350	550	700
alternatieve energie (x 1/5)	221.575	1350	1150	1550	550	900	1350	550	700
alternatieve energie (x 1/10)	202.975	1450	1250	1350	550	900	1000	900	700
alternatieve energie (x 1/20)	179.175	1450	1300	1300	550	900	700	1200	700
fuel switch (x 1/2)	220.375	1450	1050	1550	550	1250	1300	250	700
bosbeheer (x 2)	345.300	1700	1150	1200	950	1250	700	350	900
bosbeheer (x 5)	402.200	1775	1150	1125	1000	1250	350	550	900
bosbeheer (x 10)	423.200	1775	1100	1175	1000	1425	175	550	900
OESO voortrekker bij 20%-norm	118.050	1620	0	0	500	370	100	150	500
OESO voortrekker bij 35%-norm	748.950	2835	0	0	500	685	250	400	1000

De getallen tussen de haakjes geven aan met welke factor de hellingshoeken van de desbetreffende kostencurven zijn vermenigvuldigd.

In de OESO is het efficiënt te investeren in energiebesparing, alternatieve energie en substitutie van CFK's. In Oost-Europa zijn energiebesparing en een fuel switch van kolen en/of olie naar gas aantrekkelijk. In de overige landen moet de ontbossing een halt toegeroepen worden en moeten grote arealen herbebost worden.

Energiebesparing en het substitueren van CFK's kunnen een voorname en stabiele rol spelen in ieder broeikasbeleid. Een fuel switch is een belangrijk tot zeer belangrijk instrument. Bosbeheer kan een extreem belangrijke optie zijn, maar de potentiële rol ervan wordt omgeven door even grote onzekerheid. Bovendien mag niet worden vergeten, dat deze maatregel niet in alle gevallen werkelijk duurzaam is, en wellicht vooral moet worden gezien als een mogelijkheid om tijd te winnen. Alternatieve energie is voorlopig van beperkte betekenis. Pas als de kosten ervan door voortschrijdende technologische ontwikkeling drastisch worden teruggebracht, kan het tot de veelbelovendste instrumenten behoren.

Hoewel geen consensus bestaat over de juiste hoogte van een mondiale uitstootnorm, zullen de kosten van een broeikasbeleid explosief stijgen, naarmate de norm wordt aangescherpt in de richting van de meest verregaande richtlijnen. Voor de OESO lijkt vooral een initiërende rol te zijn weggelegd. Bij lagere waarden van de norm kan zij veel bijdragen. Echter, naarmate de norm serieus wordt aangescherpt, is een reductie in de overige regio's onontbeerlijk.

**C.W. Lee**

10. Een dergelijke voortrekkersrol houdt in dat uitsluitend maatregelen worden getroffen in de OESO, en dat uitsluitend de OESO de lasten hiervan draagt. Anders gezegd, niet bekeken wordt de mogelijkheid dat maatregelen ook buiten de OESO genomen worden, waarvan uitsluitend de OESO de lasten draagt.