



# Milieu-innovatie en kosten van emissiereductie

In de afgelopen twee decennia is in de industrie grote voortgang geboekt met het terugdringen van emissies. Tegen de verwachtingen in zijn de kosten per eenheid vuilbestrijding niet sterk gestegen, maar juist gedaald dankzij milieutechnische vooruitgang.

**O**m vervuiling naar lucht en water te verminderen legt de Nederlandse overheid vanaf de jaren zeventig van de vorige eeuw milieueisen aan bedrijven op. Vooral in de beginjaren bestond daar sterke weerstand tegen, uit angst dat door strengere milieueisen de kosten van bedrijven sterk zullen oplopen. Nog steeds prenten de leerboeken milieueconomie en milieumanagement het de studenten in dat bij toenemende emissiereductie de kosten per eenheid reductie progressief toenemen (Perman et al., 1999). Veelal gaat men ervan uit dat eerst de goedkope opties worden ingevoerd, waarna de duurdere technieken moeten worden gebruikt. Ook de modellen die de overheid gebruikt om de gevolgen van een scherper milieubeleid te beoordelen bestaan uit discrete gemiddelde kostenfuncties die te benaderen zijn met een exponentieel toenemende functie. De data in deze kostenmodellen zijn meestal

technisch van aard en afkomstig van leveranciers van milieutechnologie en van deskundigen in de vervuulende bedrijven die de technologie gebruiken. Voorbeeldstudies van milieutechnologie suggereren weliswaar dat milieu-innovaties de kostentoeename kunnen beperken (Jantzen et al., 1995), waarbij sommigen de schaalvoordelen bij verkoop van milieutechnologie (Nakicenovic, 2002) en anderen relevantie van onderzoek en ontwikkeling (Faber en Van Welie, 2004) benadrukken, maar de opvatting dat bij toenemende emissiereductie de kosten meer dan evenredig zullen stijgen blijft overeind.

De werkelijkheid vertoont echter een ander beeld. In de afgelopen decennia is er door bedrijven zwaar geïnvesteerd in intensivering van de vervuilingsbestrijding. In de belangrijkste vervuulende sectoren is in de periode 1985 tot en met 2002 de reductie van emissies naar lucht en water verdubbeld van rond 40 procent naar circa 80 procent van de onbestreden emissies. Dat ging hand in hand met een stevige daling van de kosten per eenheid reductie in plaats van de voorspelde stijging. Mogelijk was de kostenverlagende milieutechnische vooruitgang sterker dan de kostenoprijvende werking van de toenemende emissiereductie.

---

**YORAM KROZER EN ANDRIES NENTJES**  
 Directeur van het Cartesius Instituut, Kenniscentrum Duurzame Innovaties van de Nederlandse Technische Universiteiten, emeritus hoogleraar economie Rijksuniversiteit Groningen.

## Emissiereductie

In dit artikel worden de kosten, berekend met de kostenfuncties van een van de meest gebruikte milieukostenmodellen in het Nederlandse en Europese beleid (Jantzen, 1992), vergeleken met de kostenontwikkeling geconstrueerd met behulp van statistische data van het Centraal Bureau voor de Statistiek (Krozer, 2002 en 2006). Voor de berekening zijn in de allereerste plaats gegevens nodig over de gerealiseerde emissiereductiepercentages. Vervolgens kan met behulp van het eerder genoemde kostenmodel worden berekend wat de kosten per eenheid reductie zouden zijn geweest als de milieutechnologie niet was verbeterd. Hoe de kosten zich in werkelijkheid hebben ontwikkeld is dan de volgende stap, waarna de hypothetische kostenontwikkeling, dus zonder milieutechnische vooruitgang, wordt vergeleken met de feitelijke kosten die het resultaat zijn van een ontwikkeling met milieutechnische vooruitgang. De emissiereductie die heeft plaatsgevonden tussen 1985 en 2002 is dus het verschil tussen de emissies die zouden zijn opgetreden als er geen emissiebestrijding was geweest en de feitelijke emissies, die lager zijn omdat er een bestrijdingsinspanning is geleverd. De emissiereductie zelf kan statistisch niet direct worden waargenomen omdat de onbestreden emissies niet worden waargenomen. Maar we kunnen de onbestreden emissies wel benaderen door ervan uit te gaan dat de onbestreden emissies recht evenredig toenemen met het materiaalverbruik. De index voor de onbestreden emissie is gebaseerd op materiaalgebruik in fysieke termen, vermeld in het Statistisch Zakboek. Voor de elektriciteitssector dient de elektriciteitsproductie als index voor de onbestreden emissie. Volgens deze indexen stijgen over de periode 1985 tot en met 2002 de onbestreden emissies in de industrieën met percentages tussen 6,9 en 8,5 procent per jaar. De restemissies, dat zijn de emissies die overblijven na bestrijding en dus feitelijk worden uitgestoten, worden vastgelegd in de Nationale Emissieregistratie, te vinden op CBS Statline. De data betreffende onbestreden emissie en restemissie zijn verzameld voor de verzurende emissie naar lucht in de raffinaderijen, chemische industrie, basismetaal en de elektriciteitsproductie, alsmede voor emissie van zuurstofbindende stoffen naar water in de voedingsmiddelenindustrie en in de chemische industrie met raffinaderijen tezamen, omdat aparte data voor die twee sectoren pas recent beschikbaar zijn. De verzurende emissie is berekend in zuurequivalenten (Z-eq of H<sup>+</sup>), aan de hand van de waargenomen restemissies NO<sub>x</sub> en SO<sub>2</sub>, waarbij één eenheid NO<sub>x</sub> gelijk is aan 1 Z-eq en een eenheid SO<sub>2</sub> aan 0,7 Z-eq. De gekozen vier sectoren dekken circa 90 procent van de totale industriële SO<sub>2</sub>-emissies en circa 85 procent van de industriële NO<sub>x</sub>-emissie in 2002. De zuurstofbindende stoffen omvatten vele in afvalwater voorkomende stoffen die bij hun afbraak zuurstof aan het water onttrekken. Ze worden gemeten in vervuilingsequivalenten (v.e.). De emissies van de gekozen sectoren omvat bijna 82 procent van de totale industriële vervuilingsequivalenten in 2002.

Bij de constructie van de indexen zijn voor het jaar 1980 de index van de onbestreden en van de restemissie op 100 gesteld. Dit basisjaar is gekozen omdat pas na 1980 strenger wordende milieueisen daadwerkelijk tot bestrijding van emissies leiden. Dat komt redelijk overeen met het milieubeleid voor de verzurende emissie naar lucht, maar past minder goed voor lozingen van zuurstofbindende stoffen naar water waarvoor vanaf 1974 emissie-eisen zijn gesteld. De emissiereductie is dus berekend als de geraamde onbestreden emissie minus de statistisch waargenomen restemissie. Het emissiereductiepercentage is de emissiereductie gedeeld door de onbestreden emissie in dat jaar. De ontwikkeling is spectaculair: zowel voor bestrijding van verzurende emissie naar lucht als van zuurstofbindende stoffen naar water is de emissiereductie gestegen van 30 tot 50 procent in 1985 naar 60 tot 80 procent in 2002; zoals tabel 1 laat zien.

## Kostenontwikkeling

De informatie over de kosten van emissiereductie komt eveneens uit de CBS-statistieken. In geval van ontbrekende data zijn de kosten berekend door middel van interpolatie. Alle kostendata zijn omgerekend in de constante prijzen van 1980 op basis van de afzet van industrie. Er is aangenomen dat alle statistisch waargenomen milieukosten naar lucht gericht zijn op de bestrijding van verzuring en de milieukosten naar water gericht zijn op de zuurstofbindende stoffen. Dit komt redelijk goed overeen met de situatie in de vorige eeuw omdat de milieukosten van bestrijding van alle andere emissies veel lager zijn geweest. Om de kosten per eenheid emissiereductie te berekenen zijn de totale milieukosten in constante prijzen in de sector gedeeld door de emissiereductie in de desbetreffende sector. In de analyse zijn de jaren 1985 tot en met 2002 beschouwd omdat de emissiedata uit de jaren daarvoor onvoldoende betrouwbaar zijn, terwijl recentere data vooralsnog ontbreken.

De statistisch waargenomen emissiereductiepercentages en kosten per eenheid emissiereductie in euro's per kilogram emissiereductie bij bestrijding van verzuring naar lucht en zuurstofbindende stoffen naar water zijn in tabel 1 samengevat. In alle sectoren is trendmatig een forse toename van het emissiereductiepercentage in het jaar 2002 ten opzichte van 1985 bereikt en zijn de kosten per eenheid emissiereductie in alle sectoren in 2002 ten opzichte van 1985 afgenomen. Van jaar tot jaar zijn er soms aanzienlijke verschillen, maar trendmatig tekent ook hier zich een duidelijke en sterke daling af die in de ene sector groter is dan in de andere.

## Milieutechnische vooruitgang

Over de gehele periode 1985 tot en met 2002 is het emissiereductiepercentage fors gestegen en zijn de kosten per eenheid emissiereductie gezakt. Een mogelijke verklaring hiervoor is een kostenverlagende milieutechnische vooruitgang. Maar hoe sterk was die? Om dat te bepalen moeten wij inzicht hebben in de relatie tussen emissiereductiepercentage en de kosten per eenheid emissiereductie bij afwezigheid van milieutechnische vooruitgang. Deze informatie is beschikbaar in databestanden over de bestaande milieutechnologieën en de geraamde kosten daarvan die begin jaren negentig bijeen zijn gebracht (Jantzen, 1992). Uit de modelgegevens zijn de hypothetische kostenfuncties afgeleid, met de kanttekening dat bij zuurstofbindende stoffen dezelfde kosten per eenheid emissiereductie zowel voor de voedingsmiddelenindustrie als voor de raffinaderijen met chemie zijn gebruikt, omdat precieze sectorale uitsplitsing lastig is. In dit onderzoek hebben de kostendata de vorm van gemiddelde kosten per eenheid emissiereductie als functie van het emissiereductiepercentage, waarbij per percentage reductie de gemiddelde kosten met een vast percentage toenemen. De berekende percentages staan vermeld in kolom 2 van tabel 2. Daartegenover staat in kolom 3 de feitelijke procentuele ontwikkeling van de gemiddelde kosten als functie van het gerealiseerde emissiereductiepercentage. De som van de percentages uit kolom 2 en 3 staat in kolom 4. Dit percentage is dus het verschil tussen de 'voorspelde' kostenstijging bij toenemende emissiereductiepercentage en de feitelijke ontwikkeling van de kosten. Dit kan worden gezien als een maatstaf voor de omvang van de milieutechnische vooruitgang.

tabel 1

Emissiereductie percentage en eenheidskosten in euro's per H<sup>+</sup> bij verzurende emissie en euro's per v.e. bij emissie van zuurstofbindende stoffen op basis van CBS-data

	Verzurende emissie naar lucht								Zuurstofbindende stoffen naar water			
	Raffinaderijen		Chemie		Basismetalaal		Elektriciteitssector		Voedingsmiddelen-industrie		Chemie en raffinaderijen	
	%		%		%		%		%		%	
1985	11	2,9	39	0,9	36	7,1	48	0,20	40	44	43	244
1986	32	1,1	37	1,0	22	11,2	57	0,18	33	51	46	179
1987	27	1,7	45	0,8	26	8,9	57	0,27	33	49	49	166
1988	26	1,8	46	0,7	33	6,4	58	0,34	39	38	55	135
1989	28	1,7	53	0,7	32	6,4	62	0,38	44	32	61	120
1990	28	1,8	62	0,6	26	8,5	66	0,40	42	37	60	131
1991	38	1,4	65	0,7	22	10,4	72	0,35	65	24	69	158
1992	42	1,2	63	0,9	32	6,1	73	0,32	65	25	69	164
1993	41	1,2	68	0,9	40	4,0	77	0,32	66	26	70	158
1994	48	1,1	81	0,8	59	2,3	74	0,46	67	28	72	159
1995	50	1,0	81	0,7	61	1,7	79	0,43	72	25	82	126
1996	50	0,8	80	0,7	42	2,2	80	0,42	70	30	82	118
1997	52	0,4	77	0,3	46	1,7	86	0,17	73	21	82	59
1998	68	0,6	79	0,3	52	1,4	84	0,16	65	24	82	56
1999	68	0,7	85	0,3	59	1,2	86	0,31	72	22	81	58
2000	78	0,6	78	0,6	55	1,3	83	0,29	73	21	81	56
2001	78	0,6	82	0,6	61	1,0	80	0,15	71	48	81	54
2002	80	0,6	84	0,6	61	0,8	82	0,03	72	24	81	54

Een voorbeeld. Voor verzurende emissie van raffinaderijen nemen, bij afwezigheid van milieutechnische vooruitgang, de gemiddelde kosten per eenheid emissiereductie toe met ruim 1,6 procent voor elk opeenvolgend procent emissiereductie (kolom 2). Daardoor zouden in 2002 bij een emissiereductiepercentage van 80 procent de gemiddelde kosten zijn opgelopen tot 8,70 euro per H<sup>+</sup>, uitgaande van een berekende 2,90 euro per H<sup>+</sup> in 1985 aan de hand van de statistieken. Veronderstelt men de kostenverlagende milieutechnische vooruitgang die zich voordeed dan kon het emissiereductiepercentage in alle sectoren worden verhoogd tegen dalende gemiddelde kosten; tabel 1 laat dat zien. Voor raffinaderijen was de daling van de gemiddelde kosten per eenheid emissiereductie 1,4 procent voor elk opeenvolgend percentage emissiereductie (zie kolom 3 van tabel 2). Door die ontwikkeling lagen in 2002 voor raffinaderijen bij een feitelijk emissiereductiepercentage van 80 procent de feitelijke kosten op 0,60 euro per H<sup>+</sup>. De kostenverlagende milieutechnologische vooruitgang wordt berekend door de feitelijk gerealiseerde kostenontwikkeling af te zetten tegen de kostentoeename die zich zou hebben voorgedaan zonder de vooruitgang. Voor raffinaderijen gaat het dan om de 1,6 procent stijging per reductiepercentage die werd voorkomen plus de 1,4 procent daling die feitelijk werd gerealiseerd; samen 3,0 procent gemiddelde kostenverlagende milieutechnische vooruitgang per percentage gerealiseerde emissiereductie. Kolom 4 laat de cijfers voor alle sectoren zien. In ons getallenvoorbeeld voor raffinaderijen bestaat bij een emissiereductie van 80 procent het kostenvoordeel per bestreden H<sup>+</sup> emissie uit het verschil tussen de (virtuele) 8,70 euro en de feitelijk gerealiseerde 0,60 euro, dat is 8,10 euro. Dit impliceert een daling van de gemiddelde kosten met 93 procent dankzij de milieutechnische vooruitgang.

De bovengenoemde kostenbesparing werd gerealiseerd in een periode van zeventien jaar. Op jaarbasis, berekend op grond van behaalde extra emissiereductie in de desbetreffende periode, komt dat voor raffinaderijen neer op een kostenverlagende technische vooruitgang van gemiddeld circa 9,9 procent per jaar (zie kolom 5). Bij dat tempo wordt een halvering van de kosten bereikt in circa zeven jaar tijd (te zien in kolom 6). Tabel 2 laat de resultaten zien voor alle onderzochte sectoren. Met betrekking tot de bestrijding van verzurende emissies naar lucht kent de basismetalaal de sterkste kostenverlagende milieutechnische voor-

uitgang en de elektriciteitsproductie toont de minst krachtige milieu-innovatie. De milieutechnische vooruitgang bij bestrijding van vervuiling in afvalwater is lager dan die bij bestrijding van verzuring, waarbij de chemie en raffinaderijen flink grotere vooruitgang hebben geboekt dan de voedingsmiddelenindustrie.

## Conclusies

Dat bij verdergaande emissiereductie de eenheidskosten fors toenemen, omdat eerst de goedkope opties worden ingevoerd, waarna de duurdere technieken moeten worden gebruikt, is een voor de hand liggende gedachte. Maar ze wordt door feiten weerlegd. In de potentieel meest vervuilende industriële sectoren steeg van 1985 tot en met 2002 het emissiereductiepercentage per sector met factor 2 tot 4; dat ging gepaard met een daling van de kosten per eenheid emissiereductie met 4 tot 12 procent per jaar ten opzichte van de voorspelde stijging. De uitwerking van de investeringen in milieutechnologie, de relatie tussen investeringen in milieutechnologie, emissiereductie en kosten is complexer dan de 'common wisdom' het wil hebben. Het mag dan zo zijn dat strenger milieubeleid bedrijven tot milieuinvesteringen dwingt die de totale kapitaallasten doen toenemen, maar dat betekent niet dat daarmee ook de kapitaal- en overige kosten per eenheid emissiereductie omhoog gaan. Door te investeren in verbeterde, of geheel nieuwe, meer efficiënte zuiveringsapparatuur die op de markt is verschenen, dan wel, nog een stap verder, door het gehele productieproces te vernieuwen lukt het om de kosten per eenheid emissiereductie omlaag te brengen. De

tabel 2

## Kostenverlagende milieutechnische vooruitgang in procenten per eenheid emissiereductie

(1)	Voorspelde procentuele kostentoeename per extra procent emissiereductie	Feitelijke procentuele kostentoeename per extra procent emissiereductie	Kostenverlagende milieutechnische vooruitgang per extra procent emissiereductie (%)	Kostenverlagende milieutechnische vooruitgang per extra procent emissiereductie per jaar (%)	Halfwaardetijd
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<b>Verzurende emissie</b>					
Raffinaderijen	1,6	1,4	2,6	9,9	7
Chemie	2,7	0,5	3,1	8,0	8
Basismetaal	2,8	3,5	6,2	12,0	5
Elektriciteitsproductie	2,2	1,9	4,1	6,8	10
<b>Zuurstofbindende emissie</b>					
Voedingsmiddelen- industrie	1,0(*)	1,0	1,0	4,4	15
Chemie en raffinaderijen	1,0	1,5	2,6	5,3	12

(\*) gelijk bij voedingsmiddelenindustrie en chemie

milieuwetgeving creëert daar ook ruimte voor. Aan nieuwe strengere milieueisen behoeft niet stante pede op het tijdstip van ingang te worden voldaan; Ze worden doorgaans pas op het moment van ingrijpende vernieuwing van de productiecapaciteit en uiteraard bij nieuwbouw uitgevoerd. Deze spelregel biedt bedrijven de gelegenheid de milieutechnologie geïntegreerd in een nieuw productieproces door te voeren en zo bijvoorbeeld water- en energiebesparing en andere kostenbesparingen te verwezenlijken. Nog meer kostenbesparingen zijn te behalen als het moment van vernieuwing samenvalt met vergroting van de productieschaal, bijvoorbeeld door samenvoeging van productie-eenheden. Er zijn dan vaak ook schaalvoordelen in vervuilingsbestrijding te behalen. Door *learning by doing* slagen de gebruikers van milieutechnologie er in de loop van de tijd in de efficiëntie van de toegevoegde of procesgeïntegreerde zuiveringstechnologie te verhogen. Door de internationale verspreiding van milieubeleid en het gelijktrekken van milieueisen in de EU kunnen de leveranciers van milieutechnologie hun producten seriematig maken en verkopen, waarmee ze schaal-effecten bereiken en voor de kopers de prijs omlaag gaat.

Het niveau van milieu-innovatie varieert per sector. De ene sector is kennelijk beter in staat om de stijgende kapitaallasten te compenseren door kostenbesparende maatregelen en verbeteringen in de bedrijfsvoering dan de andere.

Het onderzoek naar milieu-innovaties staat nu nog in de kinderschoenen. Weliswaar is er geen gebrek aan theoretische literatuur, maar empirisch onderzoek is dun gezaaid en er liggen nog veel open vragen. Nader onderzoek zou ook moeten uitwijzen in hoeverre de waargenomen daling van de kosten over zo'n lange periode gebeurt door verspreiding van de verbeterde versies van de al langer beschikbare milieutechnologie bij vele bronnen (adaptatie) dan wel door meer inzet van effectievere en kostenbe-

sparende nieuwe milieutechnologie (innovatie) bij een beperkt aantal bronnen. Ook kan dan worden onderzocht of onze hypothese juist is dat bedrijven lang niet altijd voor de goedkoopste optie van milieutechnologie kiezen maar voor de qua kapitaalinvestering duurdere opties waarmee ze gedurende een lange tijd van hun kopzorgen over het milieubeleid zijn verlost en waaraan ze naderhand nog voldoende aanpassingen kunnen realiseren om op de kosten te besparen. Onduidelijk is nog steeds welke rol schaalvoordelen spelen bij milieutechnologische vernieuwing. Het onderzoek geeft aan dat strengere milieueisen op korte termijn weliswaar haaks kunnen staan op de bedrijfseconomische doelen maar dat bedrijven goed in staat zijn om hun bedrijfsvoering aan de veranderingen in de kostenfactoren aan te passen, mits ze de ruimte krijgen om goede oplossingen toe te passen.

## LITERATUUR

- Arrow, K.J. (1962) The economic implications of learning by doing. *Review of Economic Studies* 29(3), 153-177.
- Jantzen, J. (1992) *Model on sustainable environmental strategies (Moses)*. Den Haag: Institute for Applied Environmental Economics.
- Faber, A. en D. van Welie (2004) *Research and development voor ecologische transitie*. Rijswijk: RMNO.
- Jantzen, J. (red.), H. Heijnes, P. van Duijse (m.m.v. J-M. Visser, M. Buist en B. van Diepen) (1995) *Technische vooruitgang en milieukosten*. Nootdorp: Instituut voor Toegepaste Milieueconomie.
- Krozer, Y. (2002) *Milieu en innovaties*. Groningen: Rijksuniversiteit Groningen.
- Krozer, Y. (2006) *Advies over milieutechnologische vooruitgang: aanzet tot een model voor milieubalans*, Amsterdam.
- Nakicenovic, N. (2002) Technological change and diffusion as a learning process. In: Grubler et al., (red.) *Technological change and the environment*. Laxenburg: IASA, 160-182.
- Perman, R., Y. Ma, J. McGilvray en M. Common (1999) *Natural resource and environmental economics*. Londen: Addison-Wesley/Longman.