

RIVM rapport 773008 003

Techno 2000

Modellering van de daling van eenheidskosten van
technologieën in de tijd

E. Honig, A. Hanemaaijer, R. Engelen,
A. Dekkers, R. Thomas

oktober 2000

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van DGM, in het kader van project 773008, Techno 2000, mijlpaal 'Invloed van Technologie op milieukosten'.

Abstract

When making projections in Environmental Outlooks, in estimating the future environmental costs RIVM considers these costs as being constant through time. However, in reality these costs are not constant, but they decrease as a result of scale- and learning effects. This report presents a method to determine the decrease of costs during a period of time.

In doing this, empirical data about environmental technologies is collected. Five clusters are composed, and per cluster a formula is derived that describes the cost decrease through time. These formulas are fitted with the help of a statistical package.

Using RIVM's database of environmental technologies, an exercise is done calculating the environmental costs by attaching each of the 800 technologies to one of the five clusters.

The conclusion is that by considering costs to be constant the total environmental costs are overestimated. The exercise shows that this overestimation is about 10%.

Because of the limited set of empirical data, the clustering of the technologies and the arbitrary attachment to the clusters the results of this study should be considered as indicative.

Inhoud

Samenvatting	4
1. Inleiding	5
2. Eerder verricht onderzoek	6
2.1 <i>Leercurven</i>	6
2.2 <i>Onderzoek naar kostenschattingen door het bedrijfsleven</i>	7
2.3 <i>Voorgangers van deze studie: TME en CPB</i>	7
3. Clustering van technieken, afleiden van kostencurves	9
3.1 <i>Clustering</i>	9
3.2 <i>Het afleiden van kostencurves</i>	11
3.3 <i>Modellering</i>	12
4. Milieukosten en MONNIE	15
4.1 <i>Aanpassing van het kostenmodel</i>	15
4.2 <i>Indeling maatregelen naar clusters</i>	16
4.3 <i>Resultaten</i>	18
4.4 <i>Analyse voor kosteneffectiviteit</i>	20
5. Conclusies en aanbevelingen	21
Literatuur	22
Bijlage A Gebruikte data per maatregel	24
Bijlage B Gegevens in S-PLUS	32
Bijlage C Tijdreeksen voor de 5 clusters	33
Verzendlijst	34

Samenvatting

Bij het vaststellen van toekomstige milieukosten wordt door het RIVM uitgegaan van constante eenheidskosten van maatregelen in de tijd. Dit leidt waarschijnlijk tot een overschatting van de milieukosten omdat in de praktijk de eenheidskosten van technieken vaak dalen, onder invloed van schaalvergroting en leereffecten.

De doelstelling van het voorliggende onderzoek is om een methode te ontwikkelen waarmee deze daling van de kosten van een techniek in de tijd kan worden bepaald. Het onderzoek beperkt zich tot de investeringskosten.

Hiertoe zijn empirische data over de kosten van verschillende milieutechnieken verzameld en statistisch verwerkt tot wiskundige formules die de kostendaling die in het verleden is opgetreden beschrijven.

De volgende werkwijze is gehanteerd:

1. Er zijn empirische data verzameld over de investeringskosten van technieken.
2. De technieken zijn op basis van een aantal kenmerken samengesteld tot clusters
3. Per cluster is een benadering van het kostenverloop in de tijd in de vorm van een wiskundige formule afgeleid met behulp van het statistische softwarepakket S⁺
4. Deze formules zijn omgezet in geïndexeerde tijdreeksen, lopend van $t = 1$ tot $t = 25$.

Bij wijze van eerste vingeroefening is tenslotte nagegaan hoe groot het effect van dalende eenheidskosten van technieken in de tijd is op de hoogte van de toekomstige milieukosten. Hieroe zijn alle maatregelen in het kostenmodel MONNIE aan één van de clusters toegedeeld.

De conclusie lijkt robuust dat door uit te gaan van constante eenheidskosten in de tijd de toekomstige milieukosten worden overschat. Voor de in de MV5 doorgerekende dataset (EC, 2020) blijkt de overschatting van de totale milieukosten ruim 10% te bedragen.

Voor maatregelen die op grote schaal worden genomen en die een groot aandeel investeringskosten hebben is de kostendaling waarschijnlijk nog groter. Een indicatieve analyse bij de doelgroep verkeer en vervoer laat zien dat voor maatregelen die veelal in Europees verband (en dus op grote schaal) worden ingevoerd door dalende eenheidskosten ruwweg een halvering van de totale milieukosten voor deze doelgroep in 2020 kan optreden.

Gegeven de beperkte set van empirische data, de clustering van deze empirische data en de arbitraire toekenning van de doorgerekende maatregelen aan deze clusters, moeten de resultaten van dit onderzoek als indicatief worden beschouwd.

1. Inleiding

In de prognoses die door het RIVM worden opgesteld (bijvoorbeeld in milieuverkenningen) wordt er tot nu toe van uitgegaan dat de kosten van milieumaatregelen constant zijn in de tijd. Met de invloed van technologische ontwikkeling op de kosten (door schaalvoordelen en concurrentie) wordt geen rekening gehouden. Toch is de verwachting dat technologische ontwikkeling invloed heeft op de kosten van met name nieuwe technologieën. Dit zou moeten worden verwerkt in de prognoses van bijvoorbeeld de MV5.

In de praktijk (ook uit eigen ervaring: bijvoorbeeld consumentenelectronica) zien we een daling van de kosten per eenheid 'technologie'. Redenen voor deze daling zijn:

- schaalvoordelen door grotere productie-aantallen en leereffecten;
- concurrentie-overwegingen: het goedkoper aanbieden van milieutechnologieën. Enerzijds om de strijd met concurrenten aan te gaan en anderzijds om prijsgevoelige afnemers aan te trekken.

Het voorliggende onderzoek heeft tot doel om wiskundige formules af te leiden die de relatie beschrijven tussen kostendaling en de tijd. De empirie vormt de basis voor de afleiding van de formules in dit kostenonderzoek. Van een aantal milieutechnologieën zijn kostengegevens verzameld en is het verloop hiervan in de tijd geanalyseerd. Hiertoe zijn clusters samengesteld van vergelijkbare technologieën. Helaas is er sprake van een kennislacune: van veel technologieën bestaat niet een gedegen inschatting (van de ontwikkeling) van de kosten. Omdat het in deze studie gaat om een grove inschattingmethode, is niet primair ingezet op verbetering van het databestand. Uitgaande van de gegevens die beschikbaar zijn is de analyse verricht. Een ander uitgangspunt is de inperking van de kostencijfers tot de investeringen. Exploitatiekosten (energiekosten, personeel, overige overhead) vallen buiten de studie. Ten slotte is uitsluitend naar de kosten gekeken en niet naar kosteneffectiviteit: eventuele grotere effectiviteit van technologieën tegen dezelfde kosten is buiten beschouwing gelaten.

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van eerder verricht onderzoek dat in deze context relevant is. In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe de clustering van technologieën in zijn werk is gegaan. Per technologie wordt ingegaan op de herkomst van de empirische cijfers, de uitgangspunten die gehanteerd zijn en de keuzes die gemaakt zijn. Verder wordt uiteengezet hoe met behulp van een statistisch pakket curven zijn afgeleid voor de kosten in de tijd. Hoofdstuk 4 gaat in op de modellering in het kostenmodel MONNIE en de doorwerking in de uiteindelijke milieukosten. Ten slotte worden in hoofdstuk 5 conclusies en aanbevelingen op een rij gezet.

2. Eerder verricht onderzoek

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan onderzoek dat raakvlakken heeft met het in dit rapport beschreven onderzoek. Eerst wordt ingegaan op de theorie van leercurven. Daarna komt onderzoekswerk naar kostenschattting door het bedrijfsleven aan bod, waarna het hoofdstuk wordt afgesloten met een overzicht van voorgangers van de voorliggende studie.

2.1 Leercurven

De voorliggende studie richt zich op kostendaling als functie van de tijd. Direct hieraan raakt onderzoek dat op brede schaal is verricht naar kostendaling als functie van produktievolume (Gruebler en Messner, 1998, IEA, 2000). Hierbij kunnen zogeheten *leercurven* worden opgesteld. Een leercurve laat zien dat de produktie van goederen op een steeds efficiëntere wijze kan plaatsvinden. Met de toename van de produktie gaan de eenheidskosten dalen. Er blijkt bij iedere veeveelvoudiging van de produktie eenzelfde procentuele daling in de prijs op te treden. De procentuele daling die optreedt bij iedere verdubbeling van de produktie wordt in de literatuur de *learning rate* genoemd. Ook de *progress rate*, zijnde 100% minus de learning rate, wordt vaak gehanteerd. Wanneer een leercurve behorende bij fotovoltaïsche zonne-energie (PV) een progress rate heeft van 82% wil dit zeggen dat de prijs met een factor 0.82 gereduceerd wordt bij iedere verdubbeling van de produktie. Die hierbij behorende learning rate is 18%, zijnde een prijsreductie van 18% bij iedere verdubbeling.

Het gaat dus om de relatie tussen dalingen in eenheidskosten en de cumulatieve produktie van goederen. Kenmerk van leercurven is dat de progress ratio dan wel learning rate hetzelfde zijn voor ieder deel van de curve. Dit heeft alles te maken met het gegeven dat een produkt sneller ‘leert’ van marktervaringen wanneer die jong is dan wanneer die reeds langer op de markt is. Ofwel: dezelfde absolute stijging in cumulatieve produktie heeft een sterker effect aan het begin van de ontwikkeling dan later. In bovenstaand PV-voorbeeld heeft een produktiegroei van 1 naar 2 MW PV-vermogen een kostendaling van 18% tot gevolg, terwijl bij een produktieniveau van 100 MW nog eens 100 MW nodig is voor een kostendaling van 18%. Dit illustreert dat de daling in eenheidskosten van een produkt sterk afhankelijk is van de levensfase waarin dit zich bevindt. Er wordt onderscheid gemaakt in twee fasen, de ontwikkelings/R&D-fase en de commerciële fase.

Er zijn vele studies verricht naar de leercurves van energieconversietechnieken, waarbij de resultaten soms significant verschillen. Een daarvan is die van het IASA (Cristiansson, 1995), waarbij leercurves zijn ontwikkeld voor windturbines en PV-cellen. Uit dit onderzoek blijkt bij windturbines de kostenreductie bij een verdubbeling van de produktie gemiddeld 16%. De kwantificering van deze learning rate komt voort uit een studie naar de windturbine markt in Californië (VS) in de jaren 1981-1987 (Cristiansson, 1995). Dit resultaat verschilt sterk van dat van een recent IEA-onderzoek (IEA, 2000) dat uitkomt op een learning rate van 4%.

De ontwikkeling van PV-cellen is veel trager verlopen dan de ontwikkeling van windturbines. Voor PV-cellen blijkt uit het IASA-onderzoek een gemiddelde kostenreductie van 19% bij elke verdubbeling van de produktie. Dit percentage is berekend uit een studie naar PV-cellen in Japan (marktleider) in de jaren 1979-1988. Het IEA-rapport komt uit op een vergelijkbare 18%. Ten slotte is recent in opdracht van Greenpeace door KPMG onderzoek verricht naar prijsdaling van PV als functie van produktievolume (KPMG, 1999). Een conclusie van deze studie is dat bij PV een prijsdaling van een factor 4 mogelijk is bij een produktiestijging van een factor 25.

Zoals gezegd gaat het in dit rapport om kostendaling uitgezet tegen de tijd, niet tegen het produktievolume. Er wordt bij de beschouwde cases echter wel impliciet uitgegaan van cumulatieve produktiestijging (specifieke informatie hierover ontbreekt).

2.2 Onderzoek naar kostenschattingen door het bedrijfsleven

Een door het Stockholm Environment Institute uitgevoerd onderzoek (in opdracht van het Zweedse Ministerie van Milieu) (SEI, 1999) gaat in op de strategie van het bedrijfsleven bij het inschatten van de kosten tijdens de onderhandelingen over nieuwe regelgeving voor het milieu. Aan de hand van 5 case studies is getracht een algemene lijn in de strategie van het bedrijfsleven te vinden. De cases hebben betrekking op emissies naar lucht voor grote verbrandingsinstallaties, emissie eisen aan voertuigen, het Europese Auto-Oil Programma, The Clean Air Act uit de VS en het protocol van Montreal over de aantasting van de ozonlaag. De algemene tendens uit deze cases is dat de kosten makkelijk worden overschat door sectoren in de economie met een groot innovatief potentieel. Deze innovatieve kracht draagt, samen met technische vooruitgang en economische schaalvoordelen bij aan de daling van de eenheidskosten van technologieën. Tussen de oorspronkelijke raming van de kosten van de invoer van nieuwe regelgeving voor het milieu door de industrie en de overheid is soms al sprake van een verschil van een factor 2 tot 4. De uiteindelijke kosten na invoer blijken volgens deze studie veelal lager te liggen dan de vooraf ingeschatte kosten door zowel de industrie als de overheid.

2.3 Voorgangers van deze studie: TME en CPB

Op het gebied van kostendaling van technologie in de tijd is reeds eerder onderzoek verricht. Enerzijds bouwt deze studie voort op een onderzoek dat in samenwerking met de leerstoel Milieu & Economie van de LUW is uitgevoerd (de Vries). Dat onderzoek bouwt op zijn beurt weer voort op werk van TME.

Anderzijds hanteert het CPB ook veronderstellingen op dit gebied. Beider werk wordt hier kort beschreven.

Door Jantzen et al (TME, 1995) zijn enige casestudies verricht die gegevens opleveren over het kostenverloop van enkele milieutechnologieën over een reeks van jaren. Deze zijn weer vertaald in zogenaamde technische coëfficiënten, die kunnen worden gebruikt voor de kostenreeksen in de kostenmodellen.

De Vries (1999) heeft vervolgens meer cases geïnventariseerd; hij heeft functies gemodelleerd die een beschrijving moeten geven van het verloop van de kosten van milieutechnologie in de tijd. Hiertoe is een ongewogen gemiddelde genomen over een aantal technologieën. De ontwikkelde functies blijken echter niet toepasbaar voor de langere termijn.

Ook het CPB heeft in haar prognoses te maken met de ontwikkeling van de kosten van technologie in de tijd. Het CPB veronderstelt daarbij dat deze kosten dalen met 2% per jaar. Dit is een ruwe schatting van het gemiddelde van de diverse bedrijfstakken in Athena (in de industriële sectoren is het percentage in het algemeen hoger dan bijvoorbeeld in de dienstensectoren). De TME-studie komt in specifieke gevallen duidelijk hoger uit. Dit komt doordat in de eerste jaren van een maatregel de besparingsmogelijkheden belangrijk groter zijn. Op termijn tendeert het percentage van specifieke maatregelen in de richting van het door het CPB gehanteerde cijfer.

Overigens zijn de TME-studie en de voor Athena gebruikte parameters op dit gebied niet echt vergelijkbaar: bij TME betreft het een enkele techniek, in Athena gaat het om een gemiddelde van een groot aantal technieken. De hoge technologische vooruitgang bij enkele (nieuwe) producten heeft weinig invloed op het gemiddelde cijfer. Hoewel Athena voortdurend aan revisie onderhevig is, verwacht het CPB dat de gehanteerde 2% als ruwe benadering niet echt zal veranderen. Overigens speelt bij het CPB - in tegenstelling tot de voorliggende studie - ook efficiencyverbetering van technologie een rol.

3. Clustering van technieken, afleiden van kostencurves

Dit hoofdstuk behandelt de werkwijze die is gevolgd bij de verwerking van de empirische dataset. Deze data is eerst geclusterd, waarna en kostencurves uit afgeleid zijn.

3.1 Clustering

De meeste technologieën die in deze studie zijn geanalyseerd zijn opgenomen in De Vries (1999). Van deze technologieën is het verloop van de investeringen bepaald en geïndexeerd. De indexering is de basis voor de bepaling van de procentuele kostendaling per jaar.

De Vries komt uit op één formule, die uitspraak doet over de kostenontwikkeling van technologieën verdeeld in drie groepen. In deze studie is geprobeerd een stap verder te gaan en clusters van technologieën te maken. Per cluster is uiteindelijk het verloop van de investeringen in de tijd weergegeven.

Het voordeel van clustering is dat op basis van een aantal karakteristieken van een technologie een verfijnder beeld van de kostenontwikkeling kan worden geformuleerd. Een nadeel is er ook: de beschikbare informatie is beperkt. Een verdere opdeling in kleinere clusters maakt een statistische analyse minder betrouwbaar. Er is hier van uit gegaan dat het voordeel zwaarder weegt dan het nadeel, zeker omdat clustering het inzicht in de materie vergroot. Vervolgonderzoek kan vervolgens leiden tot een beter fundament.

Voor de clustering is nagedacht welke criteria hiervoor zinvol kunnen worden gehanteerd. De volgende criteria zijn uiteindelijk geformuleerd:

- *schaalniveau*: de omvang van de markt: de mate waarin een techniek in potentie toepasbaar is in Nederland. Er is een hoog en een laag schaalniveau in markt/productieomvang onderscheiden (H/L). Met name dit schaalniveau is bepalend voor de leereffecten die gerealiseerd kunnen worden.
- *maatregeltype*: betreft het een ‘end-of-pipe techniek’ of een procesgeïntegreerde techniek (E/P). Hoewel ook van procesgeïntegreerde technieken de totale investeringen in ogenschouw zijn genomen (en niet alleen het ‘milieu’-deel van de techniek) is de veronderstelling dat de kostenontwikkeling anders is dan die van end-of-pipe technieken. Dat houdt verband met de veronderstelling dat het bij end-of-pipe gaat om een geheel nieuwe, additionele techniek, terwijl het in een procesgeïntegreerde geval veelal zal gaan om modificatie van een techniek.
- *technologie*: heeft de techniek (milieumaatregel) een hoge of een lage ‘technologie-intensiteit’. De verwachting is dat technologieën waar veel R&D-gelden in zijn geïnvesteerd een ander kostenpatroon kennen dan technieken waar dit niet het geval is (H/L).

Tabel 3.1.1 geeft de technieken die geanalyseerd zijn en de bijbehorende indeling naar criteria. Een korte beschrijving van de technieken staat in bijlage A.

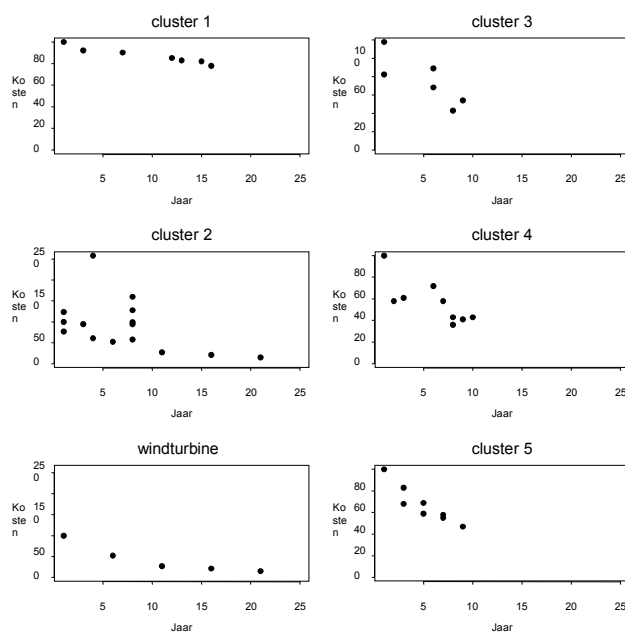
Tabel 3.1.1: Technieken, criteria en clusters

Techniek	Schaalniveau	Type	Technologie	Cluster
Hoogrendementsketel	H	P	H	1
Windturbine	L	P	H	2
LowNOx-branders	L	P	H	2
Precipitatie (RWZI)	L	E	H	3
Rookgasontzwaveling (ROI)	L	E	H	3
Selectieve Catalytische Reductie (SCR)	L	E	H	3
Geregelde driewegkatalysator	H	E	H	4
Ongeregelde driewegkatalysator	H	E	H	4
Zodenbemester	L	P	L	5
Sleufkouterbemester	L	P	L	5

Er zijn dus 5 clusters onderscheiden. Deze clusters zijn als volgt te omschrijven:

Cluster	Omschrijving
1	Alleen HR-ketels: op grote schaal (miljoenen per land) toegepast
2	Energiegerelateerde technieken, schaalniveau enkele duizenden per land
3	End-of-pipe zuiveringstechnieken, schaalniveau enkele duizenden per land
4	End-of-pipe zuiveringstechnieken, op grote schaal (miljoenen per land) toegepast
5	Landbouwtechnieken gericht op bemesting met zo weinig mogelijke emissies

Van de genoemde technieken zijn gegevens beschikbaar: zie bijlage A. Het betreft cijferreeksen over kosten in bepaalde jaren. De onderstaande figuur laat de puntenwolken zien die dit oplevert.



Figuur 3.1.1: Puntenwolken van de verschillende clusters

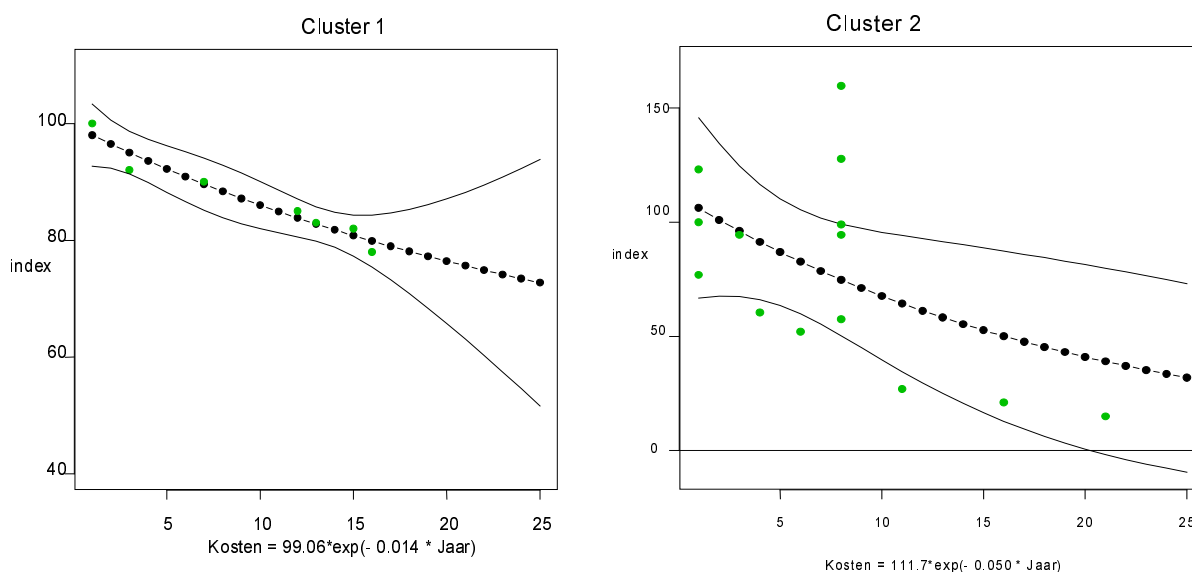
Ondanks dat de reeksen kort zijn, lijken ze interessante informatie te bevatten. De grote variatie in cluster 2 bevat uitschieters die nader onderzocht moeten worden. De figuur van de windturbines laat zien dat deze veel beter te modelleren zijn.

3.2 Het afleiden van kostencurves

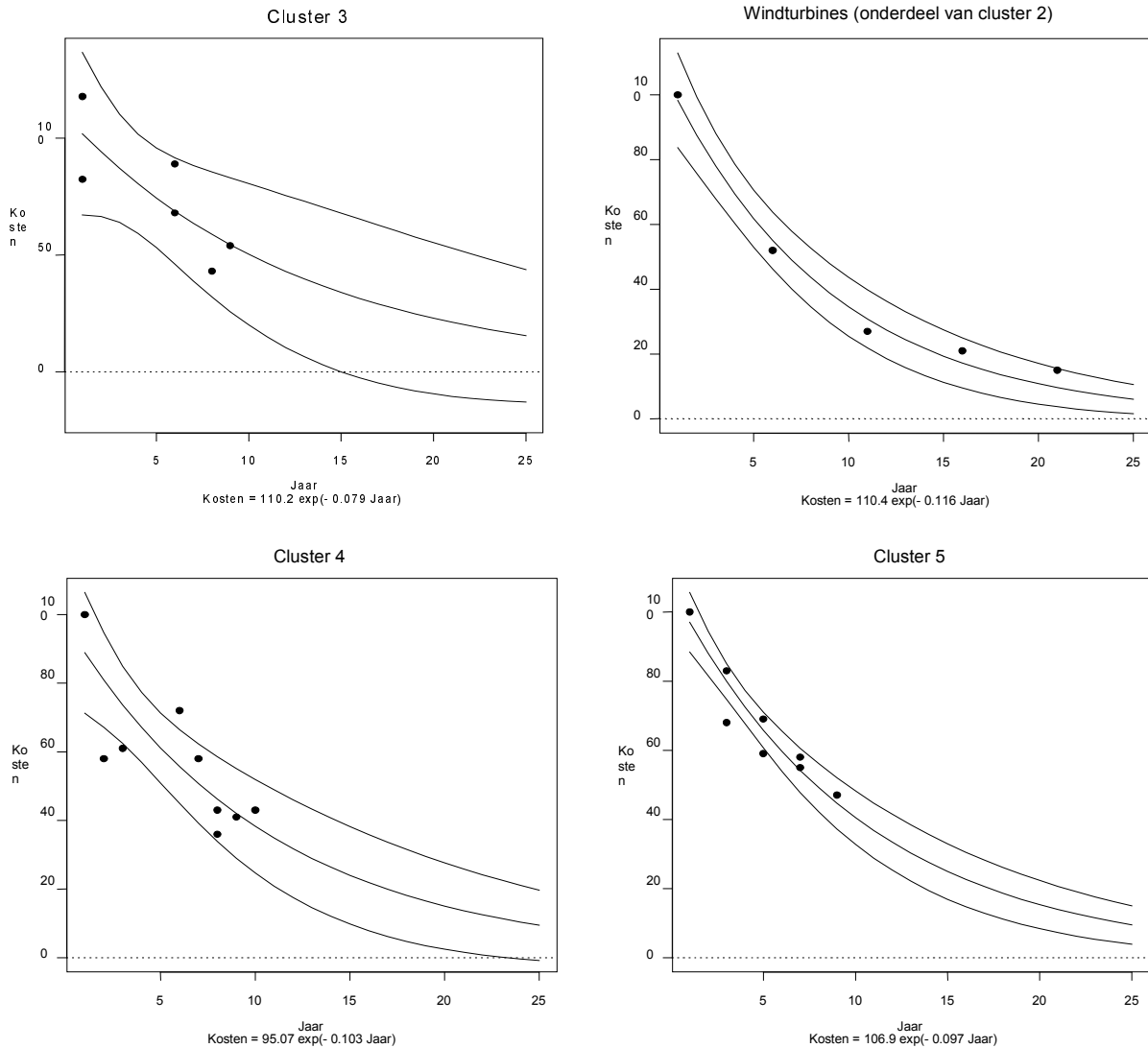
De volgende stap is het afleiden van kostencurves uit deze puntenwolken. Hiertoe is gebruik gemaakt van het statistische pakket S-PLUS (1999). De beschikbare kostengegevens zijn in dit pakket ingelezen¹. Soms zijn voor één jaar meerdere waarnemingen beschikbaar: deze zijn dan alle bij dat jaar ingevoerd. De uiteindelijk gebruikte gegevens in S-PLUS staan in de bijlagen A en B.

Figuur 3.2.1 laat de curves zien zoals die door S-PLUS gefit zijn op de data. Hierin zijn de losse punten de geïndexeerde waarnemingen; de gestippelde lijn is de berekende functie en daarom heen is het 95% betrouwbaarheidsinterval aangegeven. Bij cluster 1 is bijvoorbeeld te zien dat vanwege het ontbreken van waarnemingen vanaf t=15 het betrouwbaarheidsinterval steeds groter wordt. Ter illustratie is cluster 2 nog verder uitgesplitst: de curve voor windturbines is apart vermeld.

Figuur 3.2.1: kostencurves tegen de tijd



¹ Hierbij zijn niet de absolute jaren zijn gebruikt (bijv. 1989) maar 1 voor het eerste jaar, 2 voor het tweede etc. vanwege de numerieke verwerking van de gegevens. Verder betreft het geïndexeerde kosten, geïndexeerd naar het eerste jaar (1^e jaar = 100). Als er meerdere gegevens van het eerste jaar beschikbaar zijn (bijv. in een cluster met meerdere gelijkwaardige technologieën) dan is het *gemiddelde* van de gegevens voor dat jaar op 100% gesteld.



3.3 Modelling

De schaarse gegevens noodzaken tot een zo eenvoudig mogelijke modellering, dat wil zeggen een formule met zo min mogelijk parameters. Bij prognoses in de tijd zal de betrouwbaarheid afhangen van zowel de hoeveelheid gegevens als de ligging van de gegevens in de tijd en van de mate waarin de afname per jaar plaatsvindt. Een sterke afname in het begin kan ervoor zorgen dat de onbetrouwbaarheid beperkt blijft (cluster 4) terwijl weinig afname meer onzekerheid met zich meebrengt (cluster 1).

Een eenvoudige formule die bovenstaande situaties zou kunnen beschrijven is de volgende:

$$K(J) = a e^{-bJ} + c \tag{1}$$

waarbij $K(J)$ de kosten in jaar J voorstellen en a , b en c positieve parameters dienen te zijn. De parameter c geeft de minimumkosten van een technologie weer.

Deze formule geeft op een eenvoudige wijze de relatie tussen de jaren en de ontwikkelkosten weer. De parameters a , b en c zijn via een niet-lineaire regressie in S-PLUS te schatten, waarbij tevens de

prognoses voor de komende 25 jaar na het starten van de gegevens berekend kunnen worden met daarbij een 95% betrouwbaarheidsinterval voor de kromme.

In de literatuur wordt vaak de volgende formule voor leercurven gehanteerd (zie paragraaf 2.1):

$$K(T) = aT^{-b}$$

Waarin T de tijd voorstelt. Dit is gelijk aan:

$$K(T) = a e^{-b \log T}$$

Het omschrijven van de leercurve-formule laat zien dat de x-as (met log T) logaritmisch wordt². Dit is logisch omdat het om grote aantallen produkten gaat. Het is een cumulatief effect, zoals in de paragraaf over leercurven ook al werd beschreven. Wanneer in plaats van produktie de tijd wordt genomen, is dit niet cumulatief. Het is daarom logisch om bij een functie van de tijd de x-as niet logaritmisch te nemen, en als we de kosten zelf modelleren beschrijft (1) de relatie.

Bij de uitvoer van de niet-lineaire regressie blijkt dat in (1) de parameters a en c sterk negatief gecorreleerd zijn, -0.99. Er is dan sprake van zogeheten multicolineariteit. Dit houdt in dat als men c gelijk neemt aan 10 resp. 20, dat de parameterschatting voor a met 10 resp. 20 daalt. Bij het weglaten van parameter c in (1), blijkt dat er de multicolineariteit verdwenen is. Dit levert de kostenformule:

$$K(J) = a e^{-bJ} \tag{2}$$

Voor $J+1$ geldt dan: $K(J+1) = a e^{-b(J+1)} = K(J) e^{-b}$

Dit illustreert dat er sprake is van een daling met steeds een constante factor e^{-b} . Deze factor geeft de fractie aan waarmee per jaar de kosten afnemen, en komt dus overeen met de al eerder genoemde progress ratio bij leercurven.

Nadeel van (2) is dat de kosten naar nul kunnen afnemen, hetgeen niet realistisch is. Als het *ontwikkelkosten* betreft zou dit wel mogelijk zijn. Om dit te voorkomen is een afkapgrens gehanteerd: waar de 95%-betrouwbaarheidslijn de x-as snijdt wordt de curve afgebroken.

Tabel 3.3.1 geeft de resultaten weer.

Tabel 3.3.1: parameters behorende bij de verschillende clusters

Technologie cluster	schatting a	schatting b	afnamefactor in % per jaar	kosten gehalveerd na (jaren)
1	99.06	0.014	1.4	50
2	111.7	0.050	4.9	15
3	110.2	0.079	7.6	9
4	95.07	0.103	9.8	7
5	106.9	0.097	9.2	7

² Indien men de y-as ook logaritmisch neemt wordt de curve lineair.

De tabel toont een grote verscheidenheid in afnamefactoren per cluster. De kenmerken van ieder cluster zoals schaalniveau, technologie-intensiteit komen tot uiting in deze factor en aldus in het aantal jaren waarin de kosten gehalveerd worden. Opvallend is echter de lange halveringstijd bij cluster 1: HR-ketels. Hierbij zou men gezien het grote schaalniveau juist een grote afnamefactor verwachten. Een verklaring die hier gegeven wordt is het fenomeen dat de meerkosten van een HR-ketel ten opzichte van een gewone ketel relatief gering zijn. De basiskosten (zijnde de kosten van een gewone ketel) dalen naar verwachting niet meer en blijven dus constant, aangezien de gewone ketel is uitontwikkeld. De meerkosten van de HR-ketel dalen nog wel. De totale kostendaling verloopt als gevolg hiervan langzaam.

Een ander uitgangspunt is dat is uitgegaan van de investeringen van de techniek. Om (investeringen van) technieken met elkaar te vergelijken zijn in sommige cases de investeringen gerelateerd aan de capaciteit (bijvoorbeeld bij de capaciteit van precipitatietechnieken bij rioolwaterzuiveringsinstallaties). Ook is uitgegaan van de investeringen van de gehele installatie, ook als het procesgeïntegreerde technieken betreft. De investeringen van het milieudeel van procesgeïntegreerde technieken zijn dus niet geïsoleerd. Het voordeel is dat de kwaliteit van de gegevens zo zuiver mogelijk is (er hoeven immers geen inschattingen over de investeringen van het milieudeel worden gedaan). Bovendien zijn gegevens over investeringen het meest beschikbaar. Een nadeel is er ook: met investeringen is slechts een klein deel van de werkelijke kosten van technieken bekend. Exploitatiekosten van technieken beslaan vaak een groot deel van de totale kosten (in hetzelfde voorbeeld: de kosten van precipitatie worden voor 75% bepaald door de kosten voor de inkoop van chemicaliën).

4. Milieukosten en MONNIE

Door het RIVM worden al jaren berekeningen van de nationale milieukosten uitgevoerd. Om deze berekeningen te kunnen uitvoeren is inzicht nodig in de maatregelen (technologieën) die deze kosten bepalen en een rekenmodel om vervolgens de milieukosten te kunnen berekenen. Voor de 5^e Milieuverkenning (MV5) zijn de milieukostenberekeningen uitgevoerd met het nieuwe rekenmodel voor milieukosten: MONNIE. De invoer van MONNIE bestaat uit Excel bestanden, waarin per maatregel de verwachte investeringsbedragen, operationele kosten en besparingen zijn ingevoerd. Elke maatregel kent een ingangsjaar en veel maatregelen blijven ook in de toekomst van toepassing. Dit betekent dat herinvesteringen plaats vinden na de afschrijvingsperiode en/of dat de lopende kosten doorlopen. In de MV5 zijn voor de berekening van de totale milieukosten de komende jaren bij de MV5-scenario's EC en GC ruim 800 maatregelen doorgerekend.

Bij de berekening van de milieukosten wordt uitgegaan van de herziene Methodiek Milieukosten (VROM, 1998). Uitzondering hierop wordt gevormd op de maatregelen die niet zeer rendabel zijn. De herziene Methodiek schrijft voor dat deze maatregelen moeten worden meegenomen in de berekeningen, maar op dit moment zijn er nog onvoldoende gegevens beschikbaar om dit verantwoord te doen. De Methodiek is bij uitstek geschikt voor het berekenen van de huidige en toekomstige milieukosten op macroniveau. Enkele belangrijke uitgangspunten van de herziene Methodiek zijn:

1. Het betreft alleen de directe kosten en baten voor degene die de maatregel treft.
2. Er wordt lineair afgeschreven op investeringen.
3. Als er geen goede schatting valt te maken van de economische levensduur van een investering (en dat is vaak het geval), wordt gerekend met de standaard levensduur van 10 jaar voor electromechanische- en 25 jaar voor civiele investeringen.
4. Er wordt gerekend met de reële kapitaalmarktrente plus een sectorspecifiek opslagpercentage. Voor het bedrijfsleven bedraagt dit opslagpercentage 5%, voor consumenten, lagere overheden en de landbouw 0,5% en 0% voor het Rijk³.

De jaarlijkse kosten van investeringen (kapitaalskosten) bestaan uit de rente- en afschrijvingskosten, die volgens de zojuist omschreven uitgangspunten worden berekend. Door bij de kapitaalskosten de operationele kosten op te tellen, worden de bruto milieukosten bepaald. De netto milieukosten ontstaan vervolgens door van de bruto milieukosten de opbrengsten en besparingen af te trekken. Wanneer in dit rapport wordt gesproken van de milieukosten worden hiermee de netto milieukosten bedoeld, dus inclusief eventuele besparingen op energie of grondstoffen.

4.1 Aanpassing van het kostenmodel

Om met MONNIE het gevolg van dalende eenheidskosten op de totale milieukosten te kunnen doorrekenen is het model uitgebreid met een schaalfactor per maatregel. De schaalfactor is de geïndexeerde reeks getallen die voor elk van de eerder omschreven clusters is bepaald (zie bijlage C). In het rekenmodel is de mogelijkheid toegevoegd om bij de milieukostenberekening te rekenen met of zonder schaalfactor. Indien wordt gekozen voor het rekenen met schaalfactor, betekent dit dat vanaf het ingangsjaar van een maatregel de opgenomen bedragen bij de electromechanische

³ Het Rijk kan per definitie geld lenen tegen de kapitaalmarktrente en kent dus geen opslag.

investeringen worden vermenigvuldigd met de betreffende indexreeks. Voor het ingangsjaar heeft dit per definitie geen effect, omdat alle indexreeksen in het eerste jaar beginnen met een waarde van 1.0.

Om elk van de eerder genoemde ruim 800 maatregelen zinvol te kunnen koppelen aan een cluster zijn vervolgens twee clusters toegevoegd. Een *eerste* toevoeging betreft maatregelen waarbij geen daling van de eenheidskosten wordt verondersteld, in de vorm van cluster 0. Dit betreft maatregelen die geen electromechanische investeringen vergen of maatregelen die al lang geleden zijn ingevoerd en waarbij geen verdere kostendaling verwacht wordt. De gehanteerde indexreeks voor cluster 0 is voor alle jaren 1.0. Een *tweede* toevoeging betreft cluster 6 voor maatregelen waarbij niet exact bekend is welke concrete technieken er achter de milieukosten zitten; de zogenaamde CBS basisniveaus. Deze basisniveaus betreffen gerealiseerde kostencijfers van het bedrijfsleven (zie *tekstbox CBS basisniveaus*) en bestaan wat betreft leeftijdsopbouw uit een mix van milieutechnieken, met een leeftijdsopbouw (elektromechanisch) tussen 1 en 10 jaar. De verwachte kostendaling van deze techniekenmix, waarvan een deel al langer op de markt is, is kleiner dan die van nieuwe technieken.

CBS basisniveaus

De CBS basisniveaus hebben betrekking op in MONNIE opgenomen milieukosten van maatregelen, met als doel om recht te doen aan de milieukosten die door het CBS jaarlijks worden gerapporteerd in de statistiek 'Milieukosten van bedrijven' (CBS, t/m 1999), op basis van jaarlijkse enquêtes

onder het bedrijfsleven. Door het CBS wordt hierbij niet gerapporteerd welk soort milieutechnologieën dit betreft en welke emissies worden vermeden. Wel wordt gerapporteerd voor welk milieucompartment deze kosten zijn gemaakt, onderscheiden naar type investeringen en operationele kosten. Hierbij zijn onderscheiden: water, lucht, bodem, afval, geluid, landschap, onderzoek en coördinatie.

Verondersteld is dat de kostendaling die in de eerste 5 jaar na de introductie van een nieuwe techniek optreedt al verdisconteerd is in de hoogte van de milieukosten van de CBS basisniveaus. Ook is verondersteld dat er voor de compartimenten bodem, afval, landschap, onderzoek en coördinatie *geen* daling zal optreden voor de kosten en dat de snelheid en de mate van kostendaling voor de clusters lucht, water en geluid na een vertraging van 5 jaar overeenkomt met die van cluster 2. Dit betekent dat de CBS basisniveaus uiteindelijk met bijna 40% zullen dalen na een periode van 15 jaar.

4.2 Indeling maatregelen naar clusters

Na aanpassing van het rekenmodel is elk van de ruim 800 maatregelen ingedeeld naar één van de 7 onderscheiden clusters (zie bijlage C). Alhoewel een deskundige van de doelgroep industrie en een kostendeskundige al deze maatregelen hebben ingedeeld, blijft de koppeling van maatregelen aan clusters enigszins arbitrair en daarmee voor verbetering vatbaar. Per doelgroep wordt nu beknopt ingegaan op de indeling van de maatregelen aan de clusters. Alle maatregelen die geen electromechanische kosten component hebben, zijn toegedeeld aan cluster 0.

Voor de doelgroep *afvalverwijderingsbedrijven* zijn in de MV5 circa 100 maatregelen onderscheiden en de milieukosten doorgerkend. Voor een groot deel van deze maatregelen wordt geen verdere daling van de electromechanische investeringskosten verwacht en vindt derhalve

koppeling met cluster 0 plaats. Dit betreft onder andere de kosten voor inzameling van afval; bij een gelijkblijvende inzamelstructuur wordt voor de toekomst geen verdere daling van investeringskosten verondersteld⁴. Ook bij het storten van afval wordt geen daling van kosten meer verondersteld; deze techniek is verondersteld te zijn uitontwikkeld. Bij verbranding is verondersteld dat de toekomstige investeringen in rookgasreiniging- en DeNO_x installaties zullen dalen conform cluster 3 en dat de overige verbrandingskosten niet verder zullen afnemen.

De doelgroepen *bouw*, *consumenten* en *drinkwaterbedrijven* nemen gezamenlijk circa 30 maatregelen, waarvan de kosten in MV5 zijn berekend. Anti NO_x maatregelen bij de bouw en maatregelen aan gasmotoren bij consumenten zijn meegenomen onder cluster 2. Voor zonneboilers wordt verwacht dat de eenheidskosten zullen afnemen volgens de indexreeks van cluster 1. Maatregelen gericht op centrale deelontharding, actieve koolfilters en nitraatverwijdering bij drinkwaterbedrijven zijn gekoppeld aan cluster 3. Voor de overige maatregelen wordt geen kostendaling verwacht, omdat ze meestal geen electromechanische kosten component hebben.

Bij de doelgroep *energievoorziening* zijn circa 55 maatregelen genomen die tot kosten leiden in de MV5. Voor een deel betreft dit maatregelen waar geen kostendalingen zullen optreden, omdat er geen herinvesteringen plaats vinden. Dit geldt met name voor maatregelen bij bestaande kolencentrales. Voor de CBS basisniveaus van lucht, water en geluid van de openbare nutssector is gekoppeld aan cluster 6; de overige CBS basisniveaus zijn gekoppeld aan cluster 0. Voor maatregelen gericht op de reductie van NO_x wordt een daling van de eenheidskosten volgens cluster 2 verwacht; maatregelen gericht op de reductie van SO₂ is gekoppeld aan cluster 3.

Bij de doelgroep *handel- diensten, en overheid* (HDO) moet een onderscheid worden gemaakt tussen maatregelen van de overheden en maatregelen genomen door de handel- en dienstensector. De circa 120 maatregelen die door de overheid worden genomen betreffen uitgaven ten behoeve van het milieu, zonder een aandeel electromechanische investeringen en zijn derhalve onder cluster 0 gebracht. Ongeveer 80 milieumaatregelen worden genomen door de handel- en dienstensector. Voor maatregelen gericht op de reductie van NO_x wordt daling van de eenheidskosten volgens cluster 2 verwacht. Post-Sandoz voorzieningen en een deel van de KWS 2000 maatregelen zijn gekoppeld aan cluster 3. Voor de overige maatregelen wordt geen kostendaling verwacht, omdat ze geen electromechanische kosten component hebben of er geen herinvestering plaats vindt.

In totaal worden bijna 260 maatregelen genomen bij de doelgroep *industrie* (exclusief raffinaderijen) die tot kosten leiden in de MV5. Van de circa 90 CBS basisniveaus zijn de compartimenten lucht, water en geluid gekoppeld aan cluster 6 en de rest aan cluster 0. Voor de meeste maatregelen gericht op het verminderen van emissies naar water (circa 110) is de verwachting dat de kosten zullen dalen conform cluster 3. Voor de overige watermaatregelen wordt geen verdere kostendaling meer verwacht. De overige maatregelen hebben vrijwel uitsluitend betrekking op maatregelen om de emissies naar lucht te reduceren, met name gericht op de reductie van NO_x en VOS. De maatregelen gericht op de reductie van VOS en de toepassing van SCR technieken om NO_x te reduceren zijn gekoppeld aan cluster 3; voor de overige maatregelen gericht

⁴ Met name bij de inzameling van afval zou het interessant zijn om ook voor de operationele kosten voor personeel een indicatie te hebben van het effect van efficiencyverbetering in de toekomst.

op de reductie van NO_x (met name Low en Ultra Low NO_x) wordt een daling van de eenheidskosten volgens cluster 2 verwacht.

Bij de circa 40 maatregelen bij de doelgroep *landbouw* wordt bij een aanzienlijk deel geen daling van de electromechanische eenheidskosten verwacht en dus aan cluster 0 gekoppeld. Veel van deze maatregelen hebben alleen operationele kosten, zoals het verlagen van de mineralengehaltes in voer voor diverse diersoorten. Voor maatregelen gericht op de reductie van NO_x wordt daling van de eenheidskosten volgens cluster 2 verwacht. Voor de maatregelen die worden genomen in het kader van het Meer Jaren Programma Gewasbescherming wordt voor de electromechanische investeringen een daling conform cluster 5.

Door de doelgroep *raffinaderijen* worden bijna 50 maatregelen genomen die tot kosten leiden in de MV5. De CBS basisniveaus van lucht, water en geluid van de raffinaderijen zijn gekoppeld aan cluster 6; de overige CBS basisniveaus zijn gekoppeld aan cluster 0. De toepassing van SCR technieken om NO_x te reduceren zijn gekoppeld aan cluster 3; voor de overige maatregelen gericht op de reductie van NO_x (met name Low en Ultra Low NO_x) wordt een daling van de eenheidskosten volgens cluster 2 verwacht. Van maatregelen gericht op de reductie van VOS in het kader van KWS 2000 en de toepassing van Scot-installaties bij raffinaderijen, is de verwachting dat de kostendaling volgens cluster 3 zal verlopen. Overigens geldt ook bij deze doelgroep dat een deel van het totale aantal maatregelen is gekoppeld aan cluster 0, omdat ze geen electromechanische kostencomponent kennen of er geen herinvestering plaats vindt.

Van de forse investeringen door de doelgroep *riolering en rioolwaterzuivering* die gepaard gaan met de circa 15 maatregelen die door deze doelgroep worden genomen, is het aandeel electromechanische investeringen beperkt. Teneinde de bouwkundige voorzieningen op peil te houden of uit te breiden is de bulk van de investeringen nodig. Voor deze maatregelen wordt voor het kleine electromechanische deel dan ook geen verdere kostendaling verondersteld. Uitzondering hierop vormt de zuivering van afvalwater, waar voor de toekomst nog een daling verwacht wordt conform cluster 3.

Bij de doelgroep *verkeer* worden circa 75 maatregelen onderscheiden, die tot kosten leiden in de MV5. Het merendeel van deze maatregelen betreft op Europees niveau voorgeschreven voortschrijdende emissie-eisen aan het wegverkeer, waarvoor een kostendaling wordt verwacht volgens cluster 4. Daarnaast geldt ook bij deze doelgroep dat voor een deel van de maatregelen geen kostendaling verwacht wordt, omdat er uitsluitend sprake is operationele kosten of er geen herinvestering plaats vindt in de betreffende techniek.

4.3 Resultaten

Voor het EC-scenario zijn de gevolgen van het doorrekenen van de maatregelen met en zonder het toepassen van de schaalfactor in kaart gebracht. De uitkomst van deze rekenexercitie is gepresenteerd in tabel 4.3.1. Hierbij wordt opgemerkt dat gegeven de beperkte set van empirische data, de clustering van deze empirische data en de soms arbitraire toekenning van de maatregelen aan deze clusters, de resultaten als indicatief moeten worden beschouwd.

Tabel 4.3.1: Vergelijking van de milieukosten per doelgroep voor 2020 bij EC met en zonder schaalfactor, in miljoenen gulden, prijspeil 1999.

Doelgroep	Milieukosten in 2020 bij EC met en zonder schaalfactor	Milieukosten	Verskil in milieukosten	Procentueel verschil 2020
Afvalverwijdering	7859	7738	121	2%
Bouw	344	343	0	0%
Consumenten	441	352	89	20%
Drinkwaterbedrijven ¹	221	160	61	28%
Energievoorziening	854	757	97	11%
HDO	5350	5269	81	2%
Industrie ²	3807	3207	600	16%
Landbouw	1166	1143	24	2%
Raffinaderijen ²	623	459	165	26%
Riolering en RWZI ¹	4743	4416	327	7%
Verkeer en vervoer	4598	2414	2184	47%
TOTAAL	30008	26511	3496	12%

1 De drinkwaterbedrijven vormen samen met riolering en rioolwaterzuivering de NMP3-doelgroep actoren in de waterketen.

2 Raffinaderijen is in deze tabel nog als aparte doelgroep gepresenteerd, maar maakt onderdeel uit van de industrie.

Bij de berekening van de milieukosten in MV5 is uitgegaan van constante eenheidskosten van maatregelen in de tijd. De totale milieukosten bedragen 30 miljard gulden in EC 2020, ofwel circa 14 miljard Euro. Zo'n driekwart van deze kosten wordt gemaakt door 4 doelgroepen: afvalverwijderingsbedrijven, HDO, riolering en RWZI en verkeer en vervoer. Van deze (qua kosten dominante) doelgroepen valt alleen bij de doelgroep verkeer en vervoer een grote⁵ daling van de milieukosten te zien. Hierdoor blijft het effect van dalende eenheidskosten op de totale milieukosten beperkt. Voor 2020 wordt dit effect op de totale milieukosten voor EC indicatief geraamd op circa 3,5 miljard gulden, ofwel circa 12%.

Het gaat hier om een behoedzame schatting, enerzijds omdat alleen rekening is gehouden met het effect op de electromechanische investeringen en niet op de overige kosten. Anderzijds omdat voor veel maatregelen (zoals de uitgaven ten behoeve van het milieu door de overheden, het onderhoud van rioleringen en de inzameling en verwerking van afval) voor de toekomst geen verdere kostendaling is verondersteld. Deze vormen een groot deel van de totale milieukosten, zoals verklaard is in de vorige paragraaf.

Voor technische maatregelen die op grote schaal kunnen worden genomen en waarvan de electromechanische kostencomponent aanzienlijk is, is de verwachte kostendaling door dalende eenheidskosten groter dan de genoemde 12%. Zo is op basis van een indicatieve analyse bij de doelgroep verkeer en vervoer een kostendaling geraamd van bijna 50% in 2020 voor EC, voor technische maatregelen die veelal het gevolg zijn van Europese regelgeving en derhalve ook op Europese schaal worden genomen. Deze indicatie is nog aan de lage kant, omdat het voor een deel om de inzet van technieken gaat, die nog op de tekentafel liggen, zoals het toepassen van Euro4 en Euro5 bij het wegverkeer. Hiervoor is een zelfde mogelijke kostendaling aangehouden als voor technieken die nieuw op de markt worden gebracht, terwijl de mogelijke daling van eenheidskosten in deze fase van de ontwikkeling en productie van een product nog veel groter kan zijn. Daarnaast

⁵ Een daling van meer dan 10% van de kosten wordt in deze studie als 'groot' beschouwd.

geldt dat er in het onderhandelingsproces voor het voldoen aan nieuwe emissierichtlijnen door het bedrijfsleven de kosten vaak te hoog worden ingeschat, onder andere doordat de innovatieve potentie van het bedrijfsleven wordt onderschat (SEI, 1999).

Naast de doelgroep verkeer en vervoer treden ook bij de doelgroepen consumenten, drinkwaterbedrijven, energievoorziening, industrie en raffinaderijen relatief grote dalingen op, zij het in mindere mate dan bij verkeer. Een kanttekening daarbij is dat alleen de doelgroep industrie van deze doelgroepen een bijdrage heeft van meer dan 10% aan de totale milieukosten in 2020.

4.4 Analyse voor kosteneffectiviteit

Het effect van dalende eenheidskosten laat zich niet alleen zien in een raming van het gevolg voor de totale milieukosten, maar ook bij de bepaling van kosteneffectiviteit. Kosteneffectiviteit is gedefinieerd als de kosten van een milieumaatregel per ‘eenheid effect’ en wordt aldus berekend met de volgende formule:

$$\text{Kosteneffectiviteit} = \frac{\text{Kosten}}{\text{Effecten}}$$

waarin de kosten worden uitgedrukt in financiële eenheden en de effecten in de gereduceerde milieudruk. Er is sprake van een hoge mate van kosteneffectiviteit als de uit deze formule resulterende waarde relatief laag is (Vringer en Hanemaaijer, 2000).

Naast financiële draagkracht, gevolgen voor de concurrentie positie en bestuurlijke factoren (zoals handhaafbaarheid) is kosteneffectiviteit één van de factoren waar bij de vaststelling en uitvoering van het milieubeleid rekening mee wordt gehouden. Met behulp van kosteneffectiviteit kunnen de ‘goedkopere’ maatregelen opgespoord worden, wat van belang is bij de prioritering van maatregelen.

Kostendalingen die op kunnen treden door schaalvergroting van en leereffecten tijdens de productie zijn niet meegenomen in de ramingen van kosteneffectiviteit van het anti-verzuringbeleid in de MV5, bij gebrek aan een voldoende verantwoord inzicht in de kostendaling van individuele maatregelen. Hierdoor zijn de geraamde kosten per vermeden emissie in 2020 en daarmee ook de kosten van het vastgestelde anti-verzuringbeleid aan de hoge kant. Verder is het mogelijk dat verschillen tussen maatregelen in de mate van kostendaling in 2020 er toe leiden dat de kosten van de ene maatregel procentueel meer afnemen dan van een andere, waardoor bij de rangschikking van de maatregelen op basis van kosteneffectiviteit verschuivingen plaats vinden.

In eerdere studies is door het RIVM geconcludeerd dat in de periode 1985-1996 als gevolg van schaalvergroting een daling is opgetreden in de kosten per vermeden verzurende emissie per doelgroep (RIVM, 1998). Voor de toekomst kan deze conclusie echter niet zonder meer worden doorgetrokken. Wel geldt dat ook in de toekomst voor individuele maatregelen door schaalvergroting dalingen in de kosten per vermeden emissie kunnen optreden, echter door het nemen van opeenvolgende steeds duurdere maatregelen bij bijvoorbeeld verkeer liggen de gemiddelde kosten per vermeden emissie in de toekomst toch hoger dan nu.

5. Conclusies en aanbevelingen

Bij wijze van een vingeroefening is in deze studie op basis van geclusterde empirische data het effect van dalende eenheidskosten van technieken in de tijd op de milieukosten bepaald. Gegeven de beperkte set van empirische data, de clustering van deze empirische data en de arbitraire toekenning van de doorgerkende maatregelen aan deze clusters, moeten de resultaten als indicatief worden beschouwd. Er zijn dan ook nog vele uitbreidingen, verbeteringen en verfijningen aan te brengen. De studie levert de volgende conclusies op:

1. De toekomstige milieukosten worden overschat door uit te gaan van constante eenheidskosten in de tijd. Deze conclusie is robuust ondanks de vele onzekerheden die deze studie omgeven.
2. Een voorzichtige indicatieve raming voor 2020 in het EC-scenario met de voor MV5 doorgerkende dataset laat zien dat het effect op de totale milieukosten ruim 10% bedraagt.
3. Voor maatregelen die op grote schaal kunnen worden genomen en een groot aandeel investeringskosten hebben is de verwachte kostendaling veel groter.
4. Een indicatieve analyse bij de doelgroep verkeer en vervoer laat zien dat bij maatregelen die veelal in Europees verband (en dus op grote schaal) worden ingevoerd door dalende eenheidskosten ruwweg een halvering van de totale kosten in 2020 kan optreden.

De volgende aanbevelingen worden gedaan voor nader onderzoek:

1. De koppeling van maatregelen aan clusters is nooit geheel objectief te bepalen en daarmee enigszins arbitrair. De clustering is voor verbetering vatbaar door er een groter panel van deskundigen bij te betrekken.
2. In dit onderzoek is gekeken naar dalende eenheidskosten van technieken in de tijd. Een betere raming kan worden verkregen als wordt uitgegaan van de gerealiseerde of verwachte geproduceerde aantallen van een techniek. Deze gegevens waren in deze studie echter slechts sporadisch beschikbaar.
3. De resultaten staan of vallen verder met de beschikbaarheid van empirische data. Het is dus zinvol om de empirische dataset uit te breiden.
4. De uitbreiding van investeringskosten naar totale kosten is een logische volgende stap.

Literatuur

- S-PLUS 2000 Guide to Statistics, Vol 1, (1999), Data analysis Products Division, Mathsoft, Seattle, WA, U.S.A.
- Cristiansson, L., 1995, Diffusion and learning curves of renewable energy technologies. IIASA, Working Paper 95-126, Laxenburg.
- CBS (t/m 1999), Milieukosten van bedrijven t/m 1996, Voorburg.
- Dings, J.M.W., 1996, Kosten en milieueffecten van technische maatregelen in het verkeer; CE, Delft.
- Duyse van P., H. Heijnes, J. Jantzen en C. Sedee, 1996, Kosten van afvalverwijdering, TME, Den Haag.
- Grübler, A., 1998, Technology and Global Change, IIASA, Cambridge University Press, Cambridge.
- Grübler, A. and S. Messner, 1998, Technological Change and the timing of mitigation measures, Energy Economics 20: 495-512.
- IEA, 2000: Experience Curves for Energy technology Policy, prof. Wene, Chalmers University, Sweden
- IER, 1998: Evaluation and comparison of utility's and governmental DSM-programmes for the promotion of condensing boilers, Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy, University of Stuttgart.
- IKC landbouw, 1991 t/m 1995, Kwantitatieve Informatie veehouderij; projectgroep KWIN-veehouderij, publicatie nr. 6, Ede.
- Informatiecentrum Duurzame Energie, fax kostprijsontwikkeling windenergie d.d. 20 april 2000
- Jantzen, J., H. Heijnes en P. van Duyse, 1995, Technische vooruitgang en milieukosten, aanzet tot methodiek-ontwikkeling, TME, Den Haag.
- KPMG, 1999: Zonne-energie: van eeuwige belofte tot concurrerend alternatief, juli 1999, in opdracht van Greenpeace.
- RIZA, 1998, Strategie voor de aanpak van microverontreinigingen in communaal water, fase II. Lelystad.
- Stockholm Environment Institute (SEI), 1999, Costs and strategies presented by industry during the negotiation of environmental regulations, Stockholm, Sweden.
- RIVM (1998), Milieubalans 1998, Samsom H.D. Tjeenk Willink, ISBN 90 4220226 2, Alphen aan de Rijn.
- RIVM (2000), Nationale Milieuverkenning 5, augustus 2000, Bilthoven.

Vries, G.J. de, 1999, Milieukosten en technologische ontwikkeling, scriptie milieu-economie Wageningen Universiteit t.b.v. RIVM, Bilthoven.

Vringer, K. en A.H. Hanemaaijer (2000), Kosteneffectiviteit van Milieumaatregelen, RIVM rapportnummer 773008002, Bilthoven.

VROM, 1995, Kosteneffectiviteit van milieumaatregelen in de industrie. Deel B. Directie Lucht & Energie, Den Haag.

VROM (1998), Kosten en baten in het milieubeleid, definities en berekeningsmethoden; nr 1998/6, Publicatiereeks milieustrategie, Den Haag.

Wee, B. van, P. Feimann en A. Hanemaaijer (1999), Het prijskaartje van milieumaatregelen voor verkeer, Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 1999, pagina 843-862.

Wiersma, D., 1989, De efficiëntie van marktconform milieubeleid: een uitwerking van de SO₂ emissiebestrijding van de Nederlandse electriciteitssector. Rijksuniversiteit Groningen.

Bijlage A Gebruikte data per maatregel

In deze bijlage wordt per cluster uitgebreide informatie gegeven over de technologieën daarbinnen.

Cluster 1 - HR-ketel

Dit cluster bestaat slechts uit één case, namelijk HR-ketels. In een rapport van IER (1998) staan 2 figuren, die gecombineerd leiden tot tabel A1. Een figuur is een 'leercurve', waarin eenheidsprijzen zijn uitgezet tegen gecumuleerde aantallen⁶.

Tabel A1: Gecumuleerde verkochte aantallen HR-ketels in Nederland per jaar en investeringsbedragen

	Gecumuleerde aantallen (x1000)	Eenheidsprijs ² (in gld, pp 1998)	Geïndexeerd (1981=100)
1981	10	3600	100
1982	25		
1983	40	3300	92
1984	60		
1985	85		
1986	115		
1987	140	3250	90
1988	175		
1989	220		
1990	270		
1991	360		
1992	485	3050	85
1993	620	3000	83
1994	775		
1995	950	2950	82
1996	1150	2800	78

S-PLUS komt tot de volgende schatting van de geïndexeerde ontwikkeling van de investeringen in HR-ketels (=cluster 1) in de tijd:

$$I(t) = 99.06 e^{-0.014 t}$$

⁶ Helaas zijn de werkelijke waarden niet beschikbaar. Tabel 2 bestaat dus uit cijfers die afgelezen zijn uit grafieken en zijn dus een benadering.

*** Nonlinear Regression Model ***

Formula: $T1 \sim a * \exp(-b * \text{Jaar})$

Parameters:

	Value	Std. Error	t value
a	99.0580000	1.57725000	62.80430
b	0.0136885	0.00153509	8.91706

Residual standard error: 1.99142 on 5 degrees of freedom

Correlation of Parameter Estimates:

a	
b	0.841

Cluster 2: Windturbine en LowNO_x-branders

De informatie over windturbines is afkomstig van het Informatiecentrum Duurzame Energie⁷. Helaas is geen overzicht te geven van de ontwikkeling van de investeringen in de tijd, maar maken we gebruik van gegevens over de kostprijsontwikkeling in Eurocenten/kWh. De cijfers zijn afkomstig uit een grafiek, dus ook hier geldt net als voor de HR-ketels dat het afgelezen cijfers zijn. Voor de LowNO_x-branders is gebruik gemaakt van een inventarisatie van TME (1995). Bij 5 leveranciers heeft TME navraag gedaan over de investeringen van LowNO_x-branders met een vermogen van 3MW. Eén waarneming bij de LowNO_x-branders is in de statistische analyse als 'outlier'⁸ aangemerkt; deze is niet in de afleiding van de benaderingsfunctie meegenomen. Zie de tabel.

S-PLUS komt tot de volgende schatting van de geïndexeerde ontwikkeling van de investeringen in windturbines en LowNO_x-branders (=cluster 2) in de tijd:

$$I(t) = 111.7 e^{-0.05t}$$

*** Nonlinear Regression Model ***

Formula: T2 ~ a * exp(- b * Jaar)

Parameters:

	Value	Std. Error	t value
a	111.685000	21.4464000	5.20764
b	0.050128	0.0291401	1.72024

Residual standard error: 37.8441 on 12 degrees of freedom

Correlation of Parameter Estimates:

	a
b	0.767

⁷ Fax Informatiecentrum Duurzame Energie d.d. 20 april 2000

⁸ Deze uitschieter wordt dus als 'foute meting' beschouwd; wellicht een installatie die in speciale omstandigheden gebouwd en geplaatst moest worden.

Jaar	Windturbine Euroct/kWh	Windturbine Geïndexeerd (1980=100)	LowNO _x (f, pp 1994)	LowNO _x Geïndexeerd (gem1987=100)	Vanaf t=1 t =	Onder 1 noemer gebracht ⁹
1980	33	100			1	100 123 77
1981					2	
1982					3	94
1983					4	258 60
1984					5	
1985	17	52			6	52
1986					7	
1987			38534 ¹⁰ 24084	123 77	8	160 99 94 57 128
1988					9	
1989			29570	94	10	
1990	9	27	80800 18925	258 60	11	27
1991					12	
1992					13	
1993					14	
1994			50000 31000 29570 18000 40000	160 99 94 57 128	15	
1995	7	21			16	21
1996						
1997						
1998						
1999						
2000	5	15				15

⁹ De startjaren worden 'genormaliseerd'; in de statistische analyse is t=1 het eerste jaar dat er een bedrag van de techniek bekend is, dat betekent dat t=1 voor windturbines 1980 is, en voor de LowNO_x-branders is dat 1987.

¹⁰ Het gemiddelde van 38534 en 24084 = 31309; 31309 wordt als index op 100 gesteld

Cluster 3: Precipitatie, Rookgasontzwavelingsinstallatie en Selectieve Katalytische Reductie

Precipitatie

Er bestaat een aantal vormen van fosfaatverwijdering bij rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's). Omdat deze technieken zeer uiteenlopend zijn qua zowel techniek als kostenplaatje, beschouwen we slechts 1 techniek. Als de technieken in onderlinge samenhang worden gezien, geeft dat teveel kostenrevoluties (te schoksgewijze ontwikkeling) in plaats van kostenevoluties (geleidelijke kostenontwikkeling door technologische ontwikkeling). De keuze valt op de techniek waarvoor de meeste waarnemingen bekend zijn; dit is precipitatie. Opgemerkt moet worden dat kosten van deze techniek voor een groot deel bepaald worden door de kosten van de chemicaliën (gemiddeld 75%). Om de vergelijkbaarheid met andere cases te behouden, is toch uitgegaan van de investeringsbedragen. De empirische gegevens zijn uit 'Technische vooruitgang en milieukosten' (TME, 1995, tabel 5.2 en bijlage 2).

	Investering (fl, pp94)	Belasting i.e.	Investering/ belasting	Investering/belasting (geïndexeerd)
1974	882000	31000	28	100
1975	369000	17680	21	73
1976				
1977				
1978				
1979				
1980				
1981				
1982				
1983				
1984				
1985	679986	130000	5	18
1986				
1987				
1988				
1989				
1990				
1991				
1992	796600	96300	8	29

Rookgasontzwavelingsinstallatie (ROI)

Ook deze kosteninformatie komt van TME (1995). Er is geen aanvullend onderzoek verricht om de korte reeks investeringskosten uit te breiden. De genormaliseerde investeringen, dat wil zeggen investeringen omgerekend naar gulden in prijspeil 1994 (veel gegevens waren in buitenlandse valuta bekend, omdat een aantal van de investeringen in het buitenland gedaan zijn) en naar vermogen (kWe) zijn:

	Investerings fl/kW, pp94	Investerings geïndexeerd
1980	346 495	
1981		
1982		
1983		
1984		
1985	376 288	
1986		
1987	181	
1988	226	

Selectieve Katalytische Reductie (SCR)

Helaas is bij deze case niet veel gegevensmateriaal voorhanden. In een studie van DHV (1993) zijn 3 SCR's gepresenteerd, die met elkaar vergelijkbaar zijn qua capaciteit in debieten en qua NO_x-verwijderingsrendement. De investeringen die deze SCR's met zich meebrachten zijn:

	Investerings (mln. f, pp 1995)	Investerings geïndexeerd
1987	6.2	100
1988		
1989	2	32
1990		
1991		
1992		
1993	1.4	23

S-PLUS komt tot de volgende schatting van de geïndexeerde ontwikkeling van de investeringen in precipitatie, ROI en SCR (=cluster 3) in de tijd:

$$I(t) = 110.2 e^{-0.079t}$$

*** Nonlinear Regression Model ***

Formula: T3 ~ a * exp(- b * Jaar)

Parameters:

	Value	Std. Error	t value
a	110.2040000	15.9133000	6.92531
b	0.0785027	0.0304798	2.57556

Residual standard error: 17.9816 on 4 degrees of freedom

Correlation of Parameter Estimates:

	a
b	0.759

Cluster 4 (geregelde en ongeregelde katalysator)

Geregelde en ongeregelde driewegkatalysatoren worden sinds medio jaren tachtig toegepast in voertuigen. Uit twee bronnen zijn gegevens geput over het kostenverloop van deze katalysatoren: TME (1995) en CE (1996).

	Geregelde driewegkatalysator: kosten in f			Ongeregelde driewegkatalysator: kosten in f		
	CE	TME	land	CE	TME	land
1985		3043	Japan			
1986	1350	1764	Europa	625	634	VS
1987		1843	Europa			
1991					458	Nederland
1992	700	1092	Nederland	275	365	Nederland
1993					274	Nederland
1994		1300	Nederland		261	Nederland

S-PLUS komt tot de volgende schatting van de geïndexeerde ontwikkeling van de investeringen in geregelde en ongeregelde driewegkatalysatoren (=cluster 4) in de tijd:

$$I(t) = 95.07 e^{-0.03 t}$$

*** Nonlinear Regression Model ***

Formula: T4 ~ a * exp(- b * Jaar)

Parameters:

	Value	Std. Error	t value
a	95.074400	10.2349000	9.28920
b	0.103087	0.0251642	4.09657

Residual standard error: 16.448 on 12 degrees of freedom

Correlation of Parameter Estimates:

a	
b	0.751

Cluster 5 (zodenbemester en sleufkouterbemester)

Van twee bemestingstechnieken is een historische reeks investeringen bekend, namelijk van zoden- en sleufkouterbemester (IKC-landbouw, 1991). De investeringen van de afzonderlijke technieken zijn vergelijkbaar, omdat ze dezelfde werkbreedte (dezelfde capaciteit) hebben.

	Investerings zodenbemester (gld. pp 1997)	Investerings zodenbemester geïndexeerd	Investerings sleufkouter (gld. pp 1997)	Investerings sleufkouter geïndexeerd
1989	49800	100		
1990				
1991	33900	68	28600	100
1992				
1993	29400	59	23800	83
1994				
1995	27500	55	19800	69
1996				
1997	23400	47	16700	58

S-PLUS komt tot de volgende schatting van de geïndexeerde ontwikkeling van de investeringen in bemesters (=cluster 5) in de tijd:

$$I(t) = 106.9 e^{-0.097 t}$$

*** Nonlinear Regression Model ***

Formula: T5 ~ a * exp(- b * Jaar)

Parameters:

	Value	Std. Error	t value
a	106.882000	4.9655300	21.52480
b	0.097027	0.0113972	8.51323

Residual standard error: 5.93138 on 7 degrees of freedom

Correlation of Parameter Estimates:

	a
b	0.813

Bijlage B Gegevens in S-PLUS

techno1		techno2		techno3		techno4		techno5	
Jaar	T1	Jaar	T2	Jaar	T3	Jaar	T4	Jaar	T5
1	100	1	123.1	1	82.3	1	100	1	100
3	92	1	76.9	1	117.7	1	100	1	100
7	90	3	94.4	6	89.0	2	58	3	83
12	85	4	258.1	6	68.0	3	61	3	68
13	83	4	60.4	8	43.0	6	72	5	59
15	82	8	159.7	9	54.0	7	58	5	69
16	78	8	99.0			8	36	7	55
		8	94.4			8	43	7	58
		8	57.5			9	41	9	47
		8	127.8			10	43		
		1	100.0						
		6	52.0						
		11	27.0						
		16	21.0						
		21	15.0						

Bijlage C Tijdreeksen voor de 5 clusters

<i>index: 1e jaar =1</i>										
t =	Cluster 1	<i>index</i>	Cluster 2	<i>index</i>	Cluster 3	<i>index</i>	Cluster 4	<i>index</i>	Cluster 5	<i>index</i>
1	97.68	1.00	106.25	1.00	101.83	1.00	85.77	1.00	97.02	1.00
2	96.32	0.99	101.07	0.95	94.09	0.92	77.37	0.90	88.05	0.91
3	94.99	0.97	96.14	0.90	86.95	0.85	69.80	0.81	79.91	0.82
4	93.67	0.96	91.45	0.86	80.34	0.79	62.97	0.73	72.52	0.75
5	92.36	0.95	86.99	0.82	74.24	0.73	56.80	0.66	65.82	0.68
6	91.08	0.93	82.75	0.78	68.60	0.67	51.24	0.60	59.73	0.62
7	89.81	0.92	78.71	0.74	63.39	0.62	46.23	0.54	54.21	0.56
8	88.56	0.91	74.87	0.70	58.57	0.58	41.70	0.49	49.20	0.51
9	87.33	0.89	71.22	0.67	54.13	0.53	37.62	0.44	44.65	0.46
10	86.12	0.88	67.75	0.64	50.01	0.49	33.94	0.40	40.52	0.42
11	84.92	0.87	64.45	0.61	46.21	0.45	30.62	0.36	36.78	0.38
12	83.74	0.86	61.30	0.58	42.70	0.42	27.62	0.32	33.38	0.34
13	82.58	0.85	58.31	0.55	39.46	0.39	24.92	0.29	30.29	0.31
14	81.43	0.83	55.47	0.52	36.46	0.36	22.48	0.26	27.49	0.28
15	80.30	0.82	52.76	0.50	33.69	0.33	20.28	0.24	24.95	0.26
16	79.18	0.81	50.19	0.47	31.13	0.31	18.29	0.21	22.64	0.23
17	78.08	0.80	47.74	0.45	28.77	0.28	16.50	0.19	20.55	0.21
18	76.99	0.79	45.41	0.43	26.58	0.26	14.89	0.17	18.65	0.19
19	75.92	0.78	43.20	0.41	24.56	0.24	13.43	0.16	16.93	0.17
20	74.87	0.77	41.09	0.39	22.70	0.22	12.12	0.14	15.36	0.16
21	73.83	0.76	39.09	0.37	20.97	0.21	10.93	0.13	13.94	0.14
22	72.80	0.75	37.18	0.35	19.38	0.19	9.86	0.11	12.65	0.13
23	71.79	0.73	35.37	0.33	17.91	0.18	8.90	0.10	11.48	0.12
24	70.79	0.72	33.64	0.32	16.55	0.16	8.03	0.09	10.42	0.11
25	69.81	0.71	32.00	0.30	15.29	0.15	7.24	0.08	9.46	0.10
26	68.84	0.70	30.44	0.29	14.13	0.14	6.53	0.08	8.58	0.09
27	67.88	0.69	28.96	0.27	13.06	0.13	5.89	0.07	7.79	0.08
28	66.94	0.69	27.54	0.26	12.06	0.12	5.32	0.06	7.07	0.07
29	66.00	0.68	26.20	0.25	11.15	0.11	4.80	0.06	6.42	0.07
30	65.09	0.67	24.92	0.23	10.30	0.10	4.33	0.05	5.82	0.06
31	64.18	0.66	23.71	0.22	9.52	0.09	3.90	0.05	5.29	0.05
32	63.29	0.65	22.55	0.21	8.80	0.09	3.52	0.04	4.80	0.05
33	62.41	0.64	21.45	0.20	8.13	0.08	3.18	0.04	4.35	0.04
34	61.54	0.63	20.41	0.19	7.51	0.07	2.87	0.03	3.95	0.04
35	60.69	0.62	19.41	0.18	6.94	0.07	2.58	0.03	3.59	0.04

Zoals beschreven in hoofdstuk 4 is er voor ieder cluster een afkapgrens gehanteerd bij de 95%-betrouwbaarheidslijn. Dit betekent dat de index constant gehouden wordt na deze afkapgrens. Deze afkapgrenzen zijn per cluster:

- Cluster 1: geen afkapgrens
- Cluster 2: na 20 jaar
- Cluster 3: na 15 jaar
- Cluster 4: na 12 jaar
- Cluster 5: na 12 jaar
- Cluster 6: na 15 jaar

Verzendlijst

1. VROM, DGM, directeur SB of SBM, mr. ing. J.H. Enter
2. VROM, DGM, SB, drs. K.J. Moning
3. VROM, DGM, SB, drs. R.A. Versfeld
4. VROM, DGM, SB, drs. C.H.T. Vijverberg
5. VROM, DGM, SB, mw. drs. P.J.C. van Duijse
6. VROM, DGM, Klimaatverandering en Industrie, ing. L. de Jonge
7. VROM, DGM, Klimaatverandering en Industrie, drs. C.J. Sliggers
8. VROM, DGM, SB, ing. C.M. Moons

9. Ministerie van Economische Zaken, drs. J.K. Hensems
10. Ministerie van Economische Zaken, drs. I. Demandt
11. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, drs. C.J.W. Hiddink
12. Provincie Zuid-Holland, drs. E. de Haan
13. Provincie Limburg, dr. P. Levels
14. Landbouw Universiteit Wageningen, prof. dr. E.C. van Ierland
15. Landbouw Universiteit Wageningen, drs. R.B. Dellink
16. TME, Den Haag, drs. J. Jantzen
17. CPB, Den Haag, drs. M.W.A.M. Vromans
18. CBS, Voorburg, drs. E.J. Dietz
19. ECN, Petten, ir. P. Boonekamp
20. RIZA, Lelystad, mw. drs. J. Bouma

21. Depot Nederlandse Publikaties en Nederlandse Bibliografie
22. Directeur milieu, Prof. dr. N.D. van Egmond
23. Directeur sector 5, Ir. F. Langeweg
24. MNV, drs. R.J.M. Maas
25. MNV, drs. K. Wieringa
26. MNV, drs. O.J. van Gerwen
27. MNV, mw. dr. S. Kruitwagen
28. MNV, dr. L.C. Braat
29. MNV, drs. A. de Moor
30. LLO, ir. R.A.W. Albers
31. LLO, drs. J. van Dam
32. CIM, drs. A.L.M. Dekkers
33. LAE, mw. dr. J.A. Hoekstra
34. LAE, dr. T.G. Aalbers
35. LAE, drs. J.A. Annema
36. LAE, drs. L.T. Brandes
37. LAE, dr. H.P.C. Drissen
38. LAE, ir. P.M. van Egmond
39. LAE, mw. drs. P.F.L. Feimann
40. LAE, ir. N.J.P. Hoogervorst
41. LAE, mw. dr. ir. A.M. Idenburg
42. LAE, mw. dr. M.A.J. Kuijpers-Linde
43. LAE, mw. ir. Z.I. van Lohuizen
44. LAE, drs. D. Nagelhout

45. LAE, drs. J.G.J. Olivier
46. LAE, drs. J.A. Oude Lohuis
47. LAE, drs. J.P.M. Ros
48. LAE, drs. M.W. van Schijndel
49. LAE, ir. W.L.M. Smeets
50. LAE, dr. R. Thomas
51. LAE, prof. dr. G.P. van Wee
52. LAE, dr. ir. L.G. Wesselink
53. LAE, drs. R.A. van den Wijngaart

54. LAE, ir. E. Honig
55. LAE, ir. R.F.J.M. Engelen
56. LAE, drs. A.H. Hanemaaijer

57. SBD/Voorlichting & Public Relations
58. Bureau Rapportenregistratie
59. Bibliotheek RIVM
- 61-80 Bureau Rapportenbeheer
- 81-90 Reserve exemplaren auteurs