

rapportnr. 840568001

OPTIMALISATIE BESTRIJDING VERZURENDE EMISSIES

B.H. Tangena

Juli 1984

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht en ten laste van het Directoraat-Generaal voor Milieuhygiëne, Directie Lucht in samenwerking met het Energie Studie Centrum van het Energie-onderzoek Centrum Nederland en Technica Consulting Scientists and Engineers te Londen.

## Verzendlijst

1. Directeur Lucht van het Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne
2. Secretaris-Generaal van het Ministerie van Welzijn, Volksgezondheid en Cultuur
3. Secretaris-Generaal van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
4. Directeur-Generaal voor de Milieuhygiëne
5. Plv. Directeur-Generaal voor de Milieuhygiëne
- 5a. De Hoofdinspecteur van de Volksgezondheid belast met het toezicht op de hygiëne en het milieu
6. Ir. L.C. van Beckhoven, directie lucht Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne
7. Drs. R. Boerée, directie lucht Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne
8. Ir. H. van Oostveen, directie lucht Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne
9. Ir. D.M. van Zuidam, directie lucht Directoraat-Generaal voor de Milieuhygiëne
10. Ir. H. van Asselt, Ministerie Economische Zaken
11. Drs. H.E. Brouwer, Ministerie Economische Zaken
12. Drs. F. van Oostvoorn, Energie-onderzoek Centrum Nederland te Petten
13. W. van Arkel, Energie-onderzoek Centrum Nederland te Petten
14. Dr. A.A. Olsthoorn, Instituut voor Milieuvraagstukken Vrije Universiteit Amsterdam
15. Mr. M.A. Seaman, Technica Consulting Scientists and Engineers London  
11 John Street  
London WC 1 N 2 EB  
England
16. Directie RIVM
17. Ir. A.M.H. Bresser (BP)
18. Ir. H.A. van Duist (CWM)
19. Dr. F.A.A. de Leeuw (LLO)
20. Ir. J. Linders (ECOWAD)
21. Drs. R. Maas (LAE)
22. Dr.Ir. T. Schneider
23. Drs. V.M. Sekhuis (CWM)
24. Auteur
- 25-26. Bureau Projecten- en Rapportenregistratie
- 27-31. reserve-exemplaren

## INHOUD

	Pag
Samenvatting	
1. Inleiding	1
2. Probleemstelling	4
3. Het optimalisatiemodel	7
4. Scenariogegevens	11
5. Emissies en bestrijdingsmaatregelen	15
5.1. Verbrandingsemissies van SO <sub>2</sub> en NO <sub>x</sub>	15
5.1.1. Emissiefactoren	15
5.1.2. Bestrijdingsmaatregelen	17
5.2. Procesemissies en bestrijdingsmaatregelen voor SO <sub>2</sub> en NO <sub>x</sub>	23
5.3. Emissies en bestrijdingsmaatregelen voor NH <sub>3</sub>	27
5.3.1. Emissies	27
5.3.2. Bestrijdingsmaatregelen	31
6. Berekeningen en resultaten	34
6.1. Berekeningsvarianten	34
6.2. Resultaten modelberekeningen	38
6.2.1. Emissie-effecten en kosten van de varianten	38
6.2.2. Combinatie van berekeningsvarianten	53
6.2.3. Emissie-effecten en kosten van afzonderlijke bestrijdingsmaatregelen	55
6.2.4. Optimale bestrijdingsmaatregelen	62
Conclusies en aanbevelingen	72
Literatuur	76
Bijlagen	78

## SAMENVATTING

Om de schadelijke effecten van verzuring van bodem, water en vegetatie tegen te gaan is het noodzakelijk de uitworp van de belangrijkste verzurende stoffen (zwaveldioxide, stikstofdioxiden en ammoniak) drastisch te verminderen. Dit kan in principe op twee manieren, namelijk door de activiteiten die deze uitworp veroorzaken te beperken en door toepassing van emissiebeperkende voorzieningen. De eerste mogelijkheid, waarbij gedacht kan worden aan maatregelen in de sfeer van het energiebeleid ( $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$ ) en het landbouwbeleid ( $\text{NH}_3$ ), is in deze studie niet beschouwd. De economische ontwikkeling en de daarmee samenhangende energie-inzet is als niet te beïnvloeden randvoorwaarde beschouwd, waarvoor een scenario is ontwikkeld. Het onderzoek heeft zich derhalve geconcentreerd op de toepassing van emissiebeperkende technologieën, zowel aanvullende zuiveringstechnologieën (bijv. rookgasontzwaveling), als procesgeïntegreerde technologieën (bijv. werfelbedverbranding) en brandstofsamenstelling (het zwavelgehalte van stookolie). In het onderzoek is de huidige kennis omtrent bestrijdingstechnieken van  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  en  $\text{NH}_3$ -emissies op een geïntegreerde wijze samengebracht en geëvalueerd. Dit is de waarde die het onderzoek toevoegt aan soortgelijke studies op dit gebied. Omdat evenwel op deel terreinen de kennis nog onvolledig is, dienen de resultaten met de nodige voorzichtigheid gebruikt te worden.

De centrale vraagstelling in de studie is: met welke bestrijdingstechnieken kan een bepaalde na te streven emissiereductie worden bereikt zodanig dat de kosten van deze maatregelen minimaal zijn. Het gaat dus om een optimalisatie van zulke maatregelen, zodat deze beoordeeld kunnen worden op kosten-effectiviteit gelet op bepaalde na te streven uitworp. Omdat verspreiding en depositie van verzurende componenten buiten beschouwing zijn gebleven kunnen geen uitspraken worden gedaan over de effectiviteit van bestrijdingsmaatregelen gelet op het uiteindelijke verzurende effect in het milieu. Voorts is de studie beperkt tot Nederlandse emissiebronnen.

De na te streven emissiereductie kan worden afgeleid uit de lange-termijndoelstellingen van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Volgens het concept Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1985-1989 is het beleid erop gericht in Nederland de  $\text{SO}_2$ -uitworp terug te brengen met een factor 3,5, de  $\text{NO}_x$ -uitworp met een factor 1,5 en de  $\text{NH}_3$ -uitworp met een factor 2. Dit is voor de onderhavige studie vertaald in een landelijke emissiestreefwaarde voor de lange termijn (waarvoor het jaar 2000 is gekozen) van ca. 150.000 ton  $\text{SO}_2$ /jaar, ca. 350.000 ton  $\text{NO}_x$ /jaar en ca. 60.000 ton  $\text{NH}_3$ /jaar. Deze streefwaarden komen overeen met een totale potentieel verzurende uitworp van ca. 16 miljard mol  $\text{H}^+$ .

De belangrijkste emissiebronnen zijn de energievoorziening (SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>), het transport (vooral NO<sub>x</sub>), de chemische industrie (SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>) en de veehouderij (NH<sub>3</sub>). De economische ontwikkeling die daaraan ten grondslag ligt en de bijbehorende finale vraag naar energie zijn ontleend aan recente gegevens van het Centraal Planbureau. Op basis daarvan heeft het Energie Studie Centrum een scenario voor de energievoorziening ontwikkeld, dat gekarakteriseerd kan worden als een aangepaste versie van het zogenaamde Referentiescenario t.b.v. de Maatschappelijke Discussie Energiebeleid. Emissies die niet aan de energievoorziening zijn gerelateerd, zijn rechtstreeks uit de CPB-gegevens berekend.

Met behulp van een inventarisatie van emissiefactoren, d.w.z. emissies per eenheid productie of energie-input, zijn eerst de emissies bepaald zonder de introductie van bestrijdingstechnieken (afgezien van de maatregelen die momenteel al in kracht zijn). Vervolgens zijn op basis van gegevens over emissiereductie en kosten van bestrijdingsmaatregelen een aantal bestrijdingsvarianten (groepen van maatregelen) doorgerekend op hun emissie- en kosten - effecten. De gegevensverzameling is goeddeels verricht door het bureau Technica en het RIVM.

De resultaten van de berekeningen zijn in onderstaande tabel samengevat.

Emissiereductie en kosten van bestrijdingsmaatregelen.

Bestrijdingsvariant	1980	1990			2000		
	emissie (10 <sup>3</sup> ton/ jaar)	(rest) emissie (10 <sup>3</sup> ton/ jaar)	emissie- reductie* (10 <sup>3</sup> ton/ jaar)	kosten (10 <sup>6</sup> gld/ jaar)	(rest) emissie (10 <sup>3</sup> ton/ jaar)	emissie- reductie* (10 <sup>3</sup> ton/ jaar)	kosten (10 <sup>6</sup> gld/ jaar)
SO <sub>2</sub> -ongewijzigd beleid	484	413	-	71	361	-	262
SO <sub>2</sub> -volledige bestrijding	-	181	232	583	156	205	653
NO <sub>x</sub> -ongewijzigd beleid	516	543	-	2	558	-	6
NO <sub>x</sub> -verdergaande bestrijding**	-	501	42	62	462	96	224
NO <sub>x</sub> -volledige bestrijding**	-	501	42	62	250	308	2497
NH <sub>3</sub> -ongewijzigd beleid	121	141	-	0	164	-	0
NH <sub>3</sub> -eenvoudige bestrijding	-	72	69	549	82	82	588

\* ten opzichte van de betreffende ongewijzigd beleid-variant.

\*\* optimale NO<sub>x</sub>-bestrijding gericht op een restemissie van 350.000 ton/jaar in 2000 kost ca. 550 miljoen gulden

Uit deze tabel blijkt dat een SO<sub>2</sub>-emissiestreefwaarde van 150.000 ton/jaar in 2000 vrijwel gerealiseerd kan worden bij zogenaamde volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding. Dit houdt de volgende bestrijdingstechnieken in:

- rookgasontzwaveling bij kolencentrales, kolengestookte ketels in de industrie en stoomketels en fornuizen in de raffinaderijsector;
- ontzwaveling van zware en lichte stookolie tot respectievelijk 0.5 en 0.15 gewichtsprocent zwavel;
- wervelbedverbranding bij kleine industriële ketels;
- maatregelen om procesemissies te beperken bij raffinaderijen (Clausfabrieken) en bij de petrochemische industrie.

Met dit pakket maatregelen is ca. 650 miljoen gulden per jaar gemoeid (prijspeil 1980), waarvan ca. 260 miljoen ten laste komt van het huidige beleid.

Een NO<sub>x</sub>-emissiestreefwaarde van 350.000 ton/jaar in 2000 wordt bij zogenaamde verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding (voornamelijk toepassing van lage NO<sub>x</sub>-branders) niet en bij volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding (voornamelijk toevoeging van extra selectieve katalytische reductie en driewegkatalysatoren) ruimschoots gerealiseerd.

Om tot een uitworp van ca. 350.000 ton/jaar te komen is het volgende pakket van bestrijdingsmaatregelen optimaal:

- lage NO<sub>x</sub>-branders in combinatie met lage branderzônebelasting bij alle grote vuurhaarden;
- katalytische reductie bij warmtepompen;
- stoominjectie bij gasturbines en STEG-eenheden;
- lage-NO<sub>x</sub> CV-ketels in de gezinshuishoudingen;
- selectieve katalytische reductie bij nieuwe kolencentrales;
- emissie-afstelling bij arme-mengselmotoren in personenauto's op benzine en LPG.

De kosten van dit pakket bedragen ca. 550 miljoen gulden per jaar (prijspeil 1980).

Een NH<sub>3</sub>-emissiestreefwaarde van 60.000 ton/jaar in 2000 kan met de thans beschikbare kennis over bestrijdingstechnieken niet bereikt worden. Daarbij is geen rekening gehouden met mogelijke effecten van de zogenaamde superheffing, waardoor naar verwachting de veestapel en daarmee de NH<sub>3</sub>-emissies zullen afnemen. De minimaal te realiseren uitworp bedraagt ca. 80.000 ton/jaar, waarvoor de volgende maatregelen (zogenaamde eenvoudige bestrijding) moeten worden getroffen:

- grondfilters bij mestproductie in de stal;
- vlak boven de grond verspreiden en direct onderploegen van mest op bouwland;
- injectie van mest op grasland;
- maatregelen in de kunstmestindustrie en de chemische industrie.

Dit pakket maatregelen kost ca. 590 miljoen gulden per jaar (prijspeil 1980).

Indien men andere uitworpplafonds wenst te hanteren is in het rapport aangegeven op welke wijze dan de goedkoopste pakketten van bestrijdingsmaatregelen kunnen worden samengesteld.

Uit het onderzoek is voorts gebleken dat ten aanzien van het emissie-effect en de kosten van een aantal bestrijdingsmaatregelen ( $\text{NO}_x$  bij warmtepompen en gasturbines,  $\text{NH}_3$  in zijn geheel) nog grote onduidelijkheid bestaat. Voortgezet onderzoek hiernaar is dan ook gewenst.

Tenslotte moet benadrukt worden dat de onderhavige studie slechts een deelaspect van de verzuringsproblematiek belicht. Immers, bestrijdingsmaatregelen dienen in laatste instantie in verband gebracht te worden met de uiteindelijke effecten van verzurende stoffen op mens en milieu.

## I. INLEIDING

In het beleid van de Directie Lucht van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer wordt een belangrijke plaats ingeruimd voor de problematiek van de verzuring. Daarbij kan o.a. gewezen worden op de beleidsvoornemens zoals die zijn neergelegd in het "Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1984-1988" [1] en in de "Notitie inzake Verzuring" [2], die in januari 1984 aan de Tweede Kamer is aangeboden.

Howel de kennis omtrent processen die leiden tot verzuring van bodem en water en de gevolgen daarvan op vegetatie, flora, fauna, het aquatisch milieu en gebouwen en goederen nog onvolledig is, staat wel vast dat de belangrijkste oorzaak van verzuring gelegen is in de uitworp van zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak. Bestrijding van de verzuring moet dan ook vooral gezocht worden in beperking van de uitworp van deze stoffen, zowel binnen Nederland als daarbuiten. Het Nederlandse beleid is erop gericht, in overeenstemming met andere Europese landen, de uitworp van verzurende stoffen te reduceren met een factor 3 à 4 t.o.v. de situatie in 1980. De termijn waarop deze reductie bereikt moet worden, staat nog ter discussie.

Het introduceren van emissiebeperkende maatregelen heeft uiteraard financiële consequenties. Gelet op het scala van mogelijke bestrijdingsmaatregelen doet zich de vraag voor welke maatregelen uit financieel oogpunt optimaal bijdragen aan de gewenste emissiereductie. Het ligt in de bedoeling om in het Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1985-1989 aan deze problematiek een nadere uitwerking te geven. Daartoe is door de Directie Lucht een onderzoeksoopdracht verstrekt aan het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM).

In deze opdracht is als doelstelling van het onderzoek verwoord:

Bepaling van die maatregelen, die gelet op kosten en milieuhygiënische consequenties optimaal bijdragen aan vermindering van de potentieel verzurende emissies in Nederland, zowel per verzurende stof afzonderlijk als in combinatie ( $SO_2 + NO_x$  en zo mogelijk  $SO_2 + NO_x + NH_3$ ).

Voor uitvoering van het onderzoek heeft het RIVM onderdelen uitbesteed aan het Energie Studie Centrum (ESC) te Petten en aan het adviesbureau Technica Consulting Scientists and Engineers te Londen.



Ten aanzien van de in het onderzoek te beschouwen aspecten zijn door de opdrachtgever de volgende randvoorwaarden opgelegd:

- Uitsluitend de Nederlandse situatie beschouwd;
- Voor de economische activiteiten en vormen van energie-omzetting en energiegebruik wordt één scenario aangehouden, en wel een aangepaste versie van het zgn. Referentiescenario t.b.v. de Maatschappelijke Discussie over het Energiebeleid (hierna te noemen het ESC-Scenario); er zijn dus geen varianten in de sfeer van het energiebeleid (bijv. aardgasinzet) beschouwd;
- Het onderzoek beperkt zich tot de uitworp van  $SO_2$ ,  $NO_x$  en  $NH_3$ ; aan verspreiding en depositie wordt geen aandacht geschonken;
- Te gebruiken basisgegevens dienen zoveel als mogelijk is in overeenstemming te zijn met door de Ministeries van VROM, Economische Zaken en Landbouw en Visserij ter zake gehanteerde beleidsuitgangspunten;
- Indirecte sociaal-economische effecten (werkgelegenheid, betalingsbalans) van bestrijdingsmaatregelen worden niet beschouwd;
- Bestrijdingsmaatregelen betreffen technische maatregelen aan de bron, te weten aanvullende (zuiverings)technologieën, procesgeïntegreerde technologieën en de samenstelling van de brandstof (zwavelgehalte van stookolie; inkoop van zwavelarme steenkool is niet beschouwd).

Om het onderzoek uit te voeren is onder projectleiding van het RIVM een projectteam samengesteld, bestaande uit onderzoekers van de 3 participerende instellingen en aangevuld met vertegenwoordigers van het Instituut voor Milieuvraagstukken der Vrije Universiteit, het Ministerie van Economische Zaken en de Directie Lucht van het Ministerie van VROM.

Binnen het projectteam is globaal de volgende taakverdeling overeengekomen:

- ESC: uitvoering optimalisatieberekeningen;
- Technica: gegevensverzameling t.a.v. uitworp en bestrijding van  $SO_2$  en  $NO_x$  in het bijzonder in de sectoren verkeer, raffinaderijen en procesindustrie;
- RIVM: gegevensverzameling t.a.v. uitworp en bestrijding van  $NH_3$ .

Het voorliggende rapport geeft een integraal overzicht van de uitgevoerde werkzaamheden en de behaalde resultaten. Voor gedetailleerde informatie wordt verwezen naar deelrapporten die zijn opgesteld door respectievelijk het ESC, Technica en het RIVM [3, 4, 5].

Naast deze inleiding bestaat het onderhavige rapport uit zeven hoofdstukken. In hoofdstuk 2 wordt een nadere uitwerking gegeven van de probleemstelling.

Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van het gebruikte optimalisatiemodel en daarvoor gehanteerde schematisaties van het systeem van emissieprocessen en bestrijdingsmaatregelen. In hoofdstuk 4 wordt een overzicht gegeven van de economische en energetische basisgegevens waaruit toekomstige emissies kunnen worden bepaald. In hoofdstuk 5 worden de gegevens t.a.v. de emissies van de verzurende stoffen, en de kosten en efficiëntie van bestrijdingsmaatregelen weergegeven. Hoofdstuk 6 geeft de berekeningsvarianten en de resultaten van de modelberekeningen. Tenslotte worden in hoofdstuk 7 enige conclusies en aanbevelingen voor voortgezet onderzoek verwoord.

## 2. PROBLEEMSTELLING

De Nederlandse uitworp van verzurende stoffen was in 1980 als volgt [2 en dit rapport ]:

	Totale uitworp ( $10^6$ kg)	Uitworp per inwoner (kg/inw.)
SO <sub>2</sub>	484	34.6
NO <sub>x</sub>	516	36.9
NH <sub>3</sub>	120	8.6

In tabel 2.1 is deze uitworp onderverdeeld naar een aantal relevante broncategorieën.

Tabel 2.1 Emissies van verzurende stoffen in 1980 (in miljoenen kg)

Gegevensbron: TAC en dit rapport

Bron	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
<u>Verbrandingsemissies</u>			
. Elektriciteitscentrales, inclusief wijk- en stadsverwarming	193	92	-
. Raffinaderijen	106	20	-
. Overige industrie, inclusief warmte/kracht- opwekking	54	47	-
. Huishoudens	8	22	-
. Verkeer, inclusief zeescheepvaart	46	296	-
. Overige bronnen	15	11	-
<u>Landbouwemissies</u>	-	-	113
<u>Procesemissies</u>	62	28	7.6
Totaal	484	516	120

Uit de totale uitworp kan de potentieel verzurende uitworp (in molen H<sup>+</sup>-ionen) berekend worden uitgaande van de vorming van 2 mol H<sup>+</sup> uit 1 mol SO<sub>2</sub>, 1 mol H<sup>+</sup> uit 1 mol NO<sub>x</sub> en 1 mol H<sup>+</sup> uit 1 mol NH<sub>3</sub> bij volledige omzetting. De betrekking voor de potentieel verzurende uitworp (E<sub>p</sub>) luidt dan:

$$E_p = \frac{2}{64} E_{SO_2} + \frac{1}{46} E_{NO_x} + \frac{1}{17} E_{NH_3} \quad \text{mol H}^+ \quad (1)$$

waarbij E voor de drie stoffen is uitgedrukt in grammen. Voor de situatie van 1980 levert dat een waarde op van  $E_p = 33.4 \times 10^9 \text{ mol H}^+$ . Een in de toekomst na te streven waarde van de potentieel verzurende uitwerp kan op de volgende wijze worden afgeleid.

In 1980 bedroeg de landelijk gemiddelde depositie van verzurende stoffen ca. 6000 mol  $H^+$ /ha. In het IMP-Lucht 1984-1988 wordt als doelstelling van het beleid een gemiddelde depositie van 1800 mol  $H^+$ /ha, jaar genoemd; beneden deze waarde zijn waarschijnlijk geen nadelige effecten van verzuring te verwachten, ook niet in de meest gevoelige gebieden. Om deze doelstelling te bereiken dient de depositie t.o.v. 1980 met een factor van ca. 3.3 te worden gereduceerd.

De depositie in Nederland wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door emissies van buitenlandse bronnen. Dit betreft voornamelijk emissies van  $SO_2$  en  $NO_x$ ; aan  $NH_3$ -emissies wordt over het algemeen een sterk lokaal karakter toegekend. Om de depositie te reduceren dienen dan ook de emissies van  $SO_2$  en  $NO_x$  op Europese schaal gereduceerd te worden. Het ministerie van VROM gaat uit van een emissiereductie met een factor 3.5 voor  $SO_2$  en 1.5 voor  $NO_x$  op Europese schaal; voor  $NH_3$  wordt geen reductie op deze schaal noodzakelijk geacht. In het concept Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1985-1989 worden voor de Nederlandse situatie de volgende reductiefactoren voorgesteld: 3.5 voor  $SO_2$ , 1.5 voor  $NO_x$  en 2 voor  $NH_3$ . Deze reductie geldt steeds ten opzichte van de situatie in 1980. De emissiestreefwaarden die hieruit kunnen worden afgeleid, zijn in tabel 2.2 vermeld.

Tabel 2.2. Lange termijn-emissiedoelstellingen

	$SO_2$	$NO_x$	$NH_3$	Totaal
Emissie 1980 ( $10^3$ ton/jaar)	484	516	120	
Emissie 1980 ( $10^9$ mol $H^+$ /jaar)	15.1	11.2	7.1	33.4
Reductiefactor	3.5	1.5	2	
Emissiestreefwaarde ( $10^3$ ton/jaar)	150	350	60	
Emissiestreefwaarde ( $10^9$ $H^+$ /jaar)	4.7	7.6	3.5	15.8

De termijn waarop deze doelstellingen bereikt moeten zijn staat nog niet vast; in de onderhavige studie wordt het jaar 2000 aangehouden. Aanvullend op deze doelstellingen geldt de overeenkomst van de Conferentie van Ottawa om de SO<sub>2</sub>-uitworp in 1993 met 30% terug te brengen t.o.v. het niveau in 1980, dat officieel is vastgesteld op 500.000 ton. Op basis hiervan wordt gerekend met een in 1990 te realiseren uitworp van ca. 350.000 ton/jaar.

Het onderzoek beoogt het vaststellen van die emissiebeperkende technieken waarmee de na te streven uitworp met minimale kosten gerealiseerd kan worden. Het gaat daarbij zowel om de drie afzonderlijke stoffen als om het totaal verzurende potentieel van deze stoffen.

### 3. HET OPTIMALISATIEMODEL

Emissies van verzurende stoffen kunnen worden onderscheiden in drie categorieën, namelijk:

- emissies, die het gevolg zijn van verbranding van fossiele brandstoffen ten behoeve van de energie-opwekking ( $SO_2$  en  $NO_x$ );
- emissies bij chemische productieprocessen ( $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ );
- emissies in de landbouw ( $NH_3$ ).

Uitworp, uitworpreductie en kosten van bestrijdingsmaatregelen voor de eerste categorie zijn berekend met het door het ESC ontwikkelde model SELPE (Statisch ESC Lineair Programmerings Energie /Milieumodel). Voor de beide andere categorieën zijn deze berekeningen met de hand uitgevoerd.

SELPE is een statisch optimalisatiemodel van de energievoorziening, d.w.z. het model berekent voor een vast tijdstip (planjaar) de optimale allocatie van energiestromen op landelijke schaal. Daartoe is in het model de structuur van de Nederlandse energievoorziening in een netwerk samengebracht (zie figuur 3.1). De knooppunten stellen de energiemarkten voor en de pijlen de energiestromen. Onderscheid wordt gemaakt tussen de zogenaamde energiesector (energieproductie) en de vraagsector (energiegebruik). Energiestromen worden getransformeerd in diverse processen zoals invoer, winning, omzetting en transport. Een proces wordt gekarakteriseerd door de volgende technische, economische en milieuhygiënische variabelen.

#### - Technische variabelen

- procesrendement
- type brandstof
- vaste input- uitputverhouding (bijv. bij warmte/krachtopwekking)
- produktiecapaciteit
- beschikbaarheidsfactor (relatie tussen produktie en produktiecapaciteit)
- restricties aan input en/of output.

#### - Economische variabelen

- investeringen
- eenheidsgrootte
- levensduur
- discontovoet
- variabele proceskosten



- Milieu-variabelen

- emissiefactoren (emissie per eenheid van energie-input)
- type emissie (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, stof, koolwaterstoffen, CO, aldehyden)
- kosten van emissiebeperkende maatregelen

Uitgaande van een bepaalde energievraag en bovenstaande procesvariabelen wordt met het model de energie-allocatie berekend, zodanig dat onder nader te definiëren voorwaarden een doelstelling zijn minimale of maximale waarde bereikt. Deze doelstelling is bijvoorbeeld minimalisatie van de totale systeemkosten, minimalisatie van de totale emissie of maximalisatie van de aardgasinzet. Bij minimalisatie van de totale systeemkosten gaat het om proceskosten (vast en variabel), accijnzen, aardgaswinsten en overige toeslagen.

De belangrijkste randvoorwaarden zijn:

- procesvergelijkingen die de relatie tussen inputs en outputs van een proces beschrijven;
- balansvergelijkingen die zorgen voor het evenwicht tussen vraag en aanbod van energie op een deelmarkt (knooppunt);
- capaciteitsvergelijkingen die de relatie leggen tussen produktie en produktiecapaciteit;
- reservecapaciteitsvergelijkingen die de relatie leggen tussen de geleverde electriciteit door de openbare voorziening en het minimaal op te stellen produktievermogen.

Andere randvoorwaarden kunnen worden opgelegd, afhankelijk van de probleemstelling. Het gaat dan vaak om beleidsmatige beperkingen bijvoorbeeld aan aardgasinzet, kernenergievermogen of aan emissies (emissieplafonds, emissienormen).

De volgende outputs kunnen met het model worden gekwantificeerd:

- optimale brandstofinzet;
- kosten van de energievoorziening per sector;
- energieprijzen;
- energiebatan van de overheid (aardgaswinsten, accijnzen);
- emissies per sector;
- kosten van emissiebeperkende maatregelen en technieken;
- energiebalans met het buitenland.

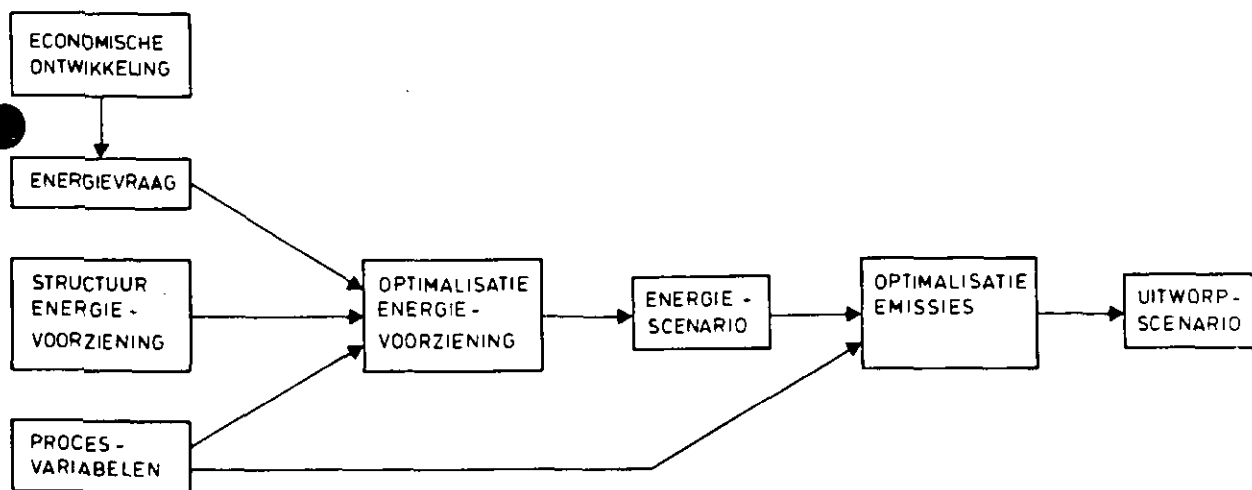
Voor meer informatie over SELPE wordt verwezen naar de literatuur [9, 10].



In de onderhavige studie is het model allereerst gebruikt om de optimale energie-allocatie te bepalen. De totale systeemkosten, uitgezonderd de kosten van milieu-maatregelen, zijn geminimaliseerd voor de jaren 1990 en 2000. Bij de berekeningen is uitgegaan van projecties van de economische ontwikkeling en daarbij behorende energievraag, die door het Centraal Planbureau zijn opgesteld. De optimale energie-allocatie levert een energie-scenario op dat neerkomt op een aangepaste versie van het EZ-referentiescenario ten behoeve van de Maatschappelijke Discussie over het Energiebeleid.

Vervolgens zijn uitgaande van dit energie-scenario (het zogenaamde ESC-scenario) kosten van emissiebestrijdingsmaatregelen geminimaliseerd. Dit heeft als belangrijke consequentie dat geen substitutie tussen energiedragers en bijgevolg tussen energietechnologieën mogelijk is. De bestrijdingsmaatregelen betreffen daardoor uitsluitend technische maatregelen aan de bron in de vorm van aanvullende emissiebeperkende voorzieningen en maatregelen als verlaging van het zwavelgehalte van brandstoffen; bij het laatste is alleen stookolie beschouwd.

In figuur 3.2 is de berekeningsgang schematisch weergegeven.



Figuur 3.2 Schema van de berekeningsgang met SELPE

#### 4. SCENARIO-GEGEVENS

Om de toekomstige emissies van verzurende stoffen te bepalen wordt de volgende algemene relatie gebruikt:

$$E_{i,j,t} = A_{i,j,t} * ef_{i,j,t} \quad (2)$$

Hierin is:

$E_{i,j,t}$  = emissie van stof j bij activiteit i in jaar t (ton/jaar)

$A_{i,j,t}$  = omvang van de activiteit i in jaar t waarbij stof j wordt geëmitteerd (activiteitskental/jaar)

$ef_{i,j,t}$  = emissiefactor voor stof j bij activiteit i in jaar t (ton/activiteitskental)

Bij "activiteit" kan gedacht worden aan energieproductie (PJ/jaar), aan energiegebruik (PJ/jaar) of aan productie in bedrijfstakken (productievolume/jaar).

De emissiefactoren voor de onderscheiden stoffen, activiteiten en jaren worden behandeld in hoofdstuk 5. Door toepassing van emissiebeperkende voorzieningen zijn ze aan verandering onderhevig en als zodanig variabele in het model.

De omvang van de activiteiten zelf worden in de berekeningen als vast gegeven verondersteld, zodat daarvoor een scenario moet worden vastgesteld.

● economische ontwikkeling die ten grondslag ligt aan het ESC-scenario is samengevat in tabel 4.1. Hieruit resulteert een daling van de energievraag in 1990 met 5% en in 2000 met 1% ten opzichte van de situatie in 1980. Vergeleken met het Referentiescenario is globaal sprake van een lagere brutoproductie van bedrijven, meer invoer van elektriciteit tot 1990, een lager binnenlands elektriciteitsverbruik en meer besparingen in de gezinshuishoudingen. Voor de transportsector is een daling van het energieverbruik per kilometer aangehouden, en wel van 15% voor benzine, 5% voor LPG en 21% voor dieselolie. Wat betreft de prijsontwikkeling wordt uitgegaan van een stijging van de ruwe olieprijs met circa 2% per jaar over de periode 1980-2000.

Voor de niet aan de energievoorziening gerelateerde activiteiten (procesindustrie, landbouw) worden eveneens de in tabel 4.1 genoemde groeicijfers aangehouden.

Tabel 4.1. Projectie economische activiteiten uitgedrukt in groei van de brutoproduktiewaarde (1980 = 100)

Bron: CPB

Economische sector	1990	2000
Landbouw-rundveehouderij	122	147
Landbouw-intensieve veehouderij	111	121
Voeding en genot	115	133
Textiel	90	109
Papier	107	131
Overige chemie	175	302
Petrochemie	122	131
Kunstmestindustrie	125	168
Metallurgie *	112	166
Overige metaal	134	198
Overige industrie	89	108
Bouwnijverheid	85	91
Transport	126	149
Overige diensten	107	126

\* Geen groei in de non-ferro-industrie na 1984 verondersteld.

In tabel 4.2 en 4.3. zijn de resultaten van dit scenario voor het binnenlands primaire energiegebruik vermeld, onderscheiden naar sector en naar primaire energiedrager. Daarbij is de sectorindeling volgens SELPE aangehouden [3].

Tabel 4.2. Projectie van het primaire energiegebruik naar sector in 1990, uitgedrukt in PJ.

Bron: ESC

Sector	Primaire energiedrager					Totaal
	steenkool + cokes	olie- prod.	gas	kernener- gie	overig	
Openbare electriciteits- voorziening	205.0	40.0	143.4	40.6	3.9 *	432.9
Openbare warmte/kracht- koppeling	0.0	0.0	27.1	0.0	0.0	27.1
Industriële warmte/ krachtkoppeling	22.3	55.0	33.6	0.0	0.0	110.9
Wijk- en stadsverwarming	0.0	0.0	3.3	0.0	8.7	12.0
Kolenvergassing	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Raffinaderijen	0.0	139.4	0.1	0.0	0.0	139.5
Cokesfabrieken	29.7	2.2	-12.8	0.0	0.0	19.1
Basisindustrie )						
Overige industrie )	74.0	334.4	381.7	0.0	8.0	798.1
Gezinshuishoudingen	0.0	15.0	385.7	0.0	0.3	401.0
Overige gebruikers	0.0	101.0	132.9	0.0	3.4	237.3
Verkeer	0.0	302.0	0.0	0.0	0.0	302.0
Mutatieverbruiken	0.3	0.0	9.1	0.0	0.0	9.4
<b>Totaal</b>	<b>331.3</b>	<b>989.0</b>	<b>1104.3</b>	<b>40.6</b>	<b>24.3</b>	<b>2489.5</b>

\* windenergie

Tabel 4.3. Projectie van het primaire energiegebruik naar sector in 2000,  
uitgedrukt in PJ  
Bron: ESC

Sector	Primaire energiedrager				Totaal
	steenkool + cokes	olie- prod.	gas	overig	
Openbare electriciteits- voorziening	404.0	0.7	65.4	15.2 *	485.3
Openbare warmte/kracht- koppeling	0.0	0.0	34.5	0.0	34.5
Industriële warmte/kracht- koppeling	54.9	21.0	89.2	0.0	165.1
Wijk- en stadsverwarming	0.0	0.0	12.1	5.9	18.0
Kolenvergassing	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Raffinaderijen	0.0	133.0	- 0.1	0.0	132.9
Cokesfabrieken	37.1	2.8	- 16.0	0.0	23.9
Basisindustrie )	101.0	335.0	397.1	8.0	841.1
Overige industrie)					
Gezinshuishoudingen	0.0	9.0	365.4	1.0	374.4
Overige gebruikers	0.0	86.0	118.7	10.9	215.6
Verkeer	0.0	306.1	0.0	0.0	306.1
Statieverbruik	0.0	0.0	4.7	0.0	4.7
Totaal	597.5	893.5	1071.0	41.0	2601.6

\* windenergie

## 5. EMISSIES EN BESTRIJDINGSMAATREGELEN

### 5.1. Verbrandingsemissies van SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>

#### 5.1.1. Emissiefactoren

De emissies van SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> bij verbrandingsprocessen worden berekend uit de energie-input m.b.v. de volgende betrekking:

$$E_{i,t} = EI_{i,t} * ef_{i,t} \quad (3)$$

Merin is:  $E_{i,t}$  = emissie van proces i in jaar t (ton/jaar)  
 $EI_{i,t}$  = energie-input van proces i in jaar t (PJ/jaar)  
 $ef_{i,t}$  = emissiefactor van proces i in jaar t (ton/PJ).

De emissiefactor kan in de tijd variëren door autonome ontwikkelingen in de betreffende sector en door een gericht milieubeleid in de vorm van de toepassing van emissiebeperkende voorzieningen. Autonome ontwikkelingen worden alleen verondersteld in de verkeerssector (naast gerichte bestrijdingsmaatregelen). Bestrijdingsmaatregelen en de consequenties daarvan voor de emissiefactoren komen aan de orde in paragraaf 5.1.2.

In de onderhavige paragraaf wordt een overzicht gegeven van de emissiefactoren voor de zgn. onbestreden emissies. Daarbij zijn de verbrandingsprocessen ingedeeld in de tien sectoren die in het SELPE-model worden onderscheiden. Voorts is onderscheid gemaakt in de soort brandstof die wordt verstoekt. De gegevens zijn gebaseerd op informatie van de Technische Adviescommissie voor de SO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-bestrijding (TAC), van het Instituut voor Milieuvraagstukken in het kader van het Reken- en Informatiesysteem Milieuhygiëne (RIM) en van het Energie Studie Centrum in het kader van de SELPE-modelstudies.

Emissiefactoren voor SO<sub>2</sub> worden in hoge mate bepaald door het zwavelgehalte van de brandstof. In tabel 5.1 wordt een overzicht gegeven van de aangehouden zwavelgehalten.

Tabel 5.1. Zwavelgehalten van brandstoffen (1980)

brandstof	zwavelgehalte (gew. % S)
aardgas, LPG, cokesovengas } hoogovengas, biogas	0
zware stookolie	1.6 *
lichte stookolie	0.27
steenkool	1.0
raffinaderijgas	0.32
benzine	0.03
dieselolie	0.27

\* Deze waarde wordt gehanteerd voor alle sectoren, behalve de raffinaderijen, waarvoor 2.6 gewichtsprocent S wordt aangehouden.

De emissiefactoren voor de onbestreden emissies bij stationaire verbrandingsprocessen zijn vermeld in bijlage 1.

In de verkeerssector is een autonome ontwikkeling in de emissiefactoren voor  $\text{NO}_x$  verondersteld. Het betreft hier de introductie vanaf 1990 van de zgn. arme-mengsel-motor in auto's op benzine en LPG. Dit motortype wordt gekarakteriseerd door een besparing op het brandstofverbruik van ca. 20% en een vermindering van de  $\text{NO}_x$ -uitworp van ca. 40% ten opzichte van de huidige motor. Er wordt vanuit gegaan dat de arme-mengsel-motor uit economische overwegingen ontwikkeld wordt; de vermindering van de  $\text{NO}_x$ -uitworp is dan een secundair effect. De emissiefactoren in de verkeerssector zijn vermeld in tabel 5.2; ze zijn betrokken op het brandstofverbruik. Voor verdere informatie wordt verwezen naar [4].

Tabel 5.2. Emissiefactoren in de verkeerssector bij autonome ontwikkeling

Voertuigtype	Brandstof	Emissiefactor (ton/PJ)			
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>		
			1980	1990	2000
personenauto's en lichte vrachtauto's	o benzine	13	931	1052	854/732 *
vrachtauto's en bussen met directe insputing	o LPG	0	649	724	611/528
vrachtauto's en bussen met directe insputing	o dieselolie	125	1246	1246	1324
overige voertuigen **	o benzine	13	1000	1000	1000
	o dieselolie	125	740	650	650

\* ERGA-gegevens/gegevens Directie Lucht

\*\* uitgezonderd zeeschepen en luchtvaart; hiervoor wordt uitgegaan van een constante totale emissie van 26 mln kg SO<sub>2</sub>/jaar en 13 mln kg NO<sub>x</sub>/jaar.

### 5.1.2. Bestrijdingsmaatregelen

#### SO<sub>2</sub>-emissies

emissies van SO<sub>2</sub> bij stationaire verbrandingsinstallaties te verminderen worden drie maatregelen beschouwd, te weten:

- ontzwaveling van stookolie;
- rookgasontzwaveling;
- introductie van wervelbedverbranding.

Bij ontzwaveling van zware stookolie wordt ervan uitgegaan dat het zwavelgehalte gereduceerd dient te worden tot 0.5 gewichtsprocent S. Dit leidt tot de in tabel 5.3 vermelde reductiepercentages voor de onderscheiden soorten zware stookolie.



Tabel 5.3. Emissiereductie bij ontzwaveling zware stookolie.

zwavelgehalte (1980) (gew. % S)	toepassingsgebied	reductie- percentages
2.6	raffinaderijen/stoomketels en for- nuizen <250 MW <sub>t</sub>	82
1.6	overige sectoren en processen met zware stookolie < 200 MW <sub>t</sub>	70

Hoewel technisch gezien olie-ontzwaveling ook toegepast kan worden bij relatief grote installaties (raffinaderij-installaties >250 MW<sub>t</sub> en overige installaties > 200 MW<sub>t</sub>) wordt deze mogelijkheid niet beschouwd uit kostenoverwegingen; bij grotere installaties blijkt rookgasontzwaveling namelijk goedkoper te zijn [4]. De kosten van ontzwaveling van zware stookolie bedragen ca. f. 5.600,- per ton verwijderde zwavel, oftewel f. 2.800,- per ton verwijderd SO<sub>2</sub>. Aangenomen wordt dat deze kosten onafhankelijk zijn van de installatiegrootte. Ontzwaveling van lichte stookolie van 0.27 naar 0.15 gewichtsprocent zwavel kost ca. f 1.300,- per ton verwijderd SO<sub>2</sub>.

Bij rookgasontzwaveling worden twee typen processen onderscheiden, namelijk het S-regeneratieproces en het gipsproducerende proces. Voor de raffinaderijsector wordt het S-regeneratieproces verondersteld, omdat raffinaderijen reeds producenten van elementair zwavel zijn. Het gipsproducerende proces kan worden toegepast bij alle verbrandingsinstallaties die zware stookolie of steenkool gebruiken. Zoals reeds opgemerkt is rookgasontzwaveling alleen kosten-attractief bij relatief grote installaties. Voorts wordt aangenomen dat rookgasontzwaveling alleen toegepast wordt bij installaties met een resterende economische levensduur van tenminste 10 jaar. Voor beide typen processen wordt uitgegaan van een emissiereductie van 90%, gebaseerd op informatie van de TAC [12].

In tabel 5.4 zijn de investerings- en bedrijfskosten van rookgasontzwaveling voor de in aanmerking komende processen vermeld. De gegevens zijn gebaseerd op de TAC [12].

Verondersteld is dat de investering in een bestaande installatie ca. 30% hoger is dan die in een nieuwe installatie.

Om uit het investeringsbedrag de jaarlijkse kapitaalslasten te berekenen wordt een rentevoet van 5% gehanteerd en voorts de volgende afschrijvingstermijnen (economische levensduur):

- openbare electriciteitsvoorziening en openbare wkk: 20 jaar;
- wijk- en stadsverwarming : 15 jaar;
- alle industriële sectoren : 10 jaar.

Tabel 5.4. Investerings- en bedrijfskosten rookgasontzwaveling

Sector	Proces (tussen haakjes: gem.installatie- grootte)	Brandstof	Specifieke investering		Bedrijfs- kosten  (f/GJ <sub>1</sub> )
			nieuw	bestaand	
I. Openbare elektr. voorzie- ning	o oliegestookte eenheid (300 MW <sub>e</sub> )	zware stook- olie	256 f/kW <sub>e</sub>	333 f/kW <sub>e</sub>	0.46
	o conventionele kolencentrale (600 MW <sub>e</sub> )	steenkool	206 "	268 "	0.39
II/III. Open- bare/indus- triële Wkk	o oliegestookte ketel (250 MW <sub>t</sub> )	zware stook- olie	205 f/kW <sub>t</sub>	267 f/kW <sub>t</sub>	0.76
	o poederkoolketel (250 MW <sub>t</sub> )	steenkool	197 "	256 "	0.73
V. Kolenver- gassing	o diverse	steenkool	197 "	256 "	0.73
Raffina- derijen	o stoomketels > 250 MW <sub>t</sub>	zware stook- olie	157/178 " *	204/231 " *	2.04/2.21*
	o fornuizen > 250 MW <sub>t</sub>	zware stook- olie	228 "	296 "	2.05
VI/VIII.	o ketels > 200 MW <sub>t</sub>	petrocokes	208 "	270 "	1.45
		zware stook- olie	169	220	0.66
Basis/ove- rige indus- trie		steenkool	162 "	211 "	0.63

\* waarden voor 1990/2000

Door toepassing van wervelbedverbranding kan de SO<sub>2</sub>-uitworp ook aanzienlijk worden verminderd. T.o.v. een conventionele kolengestookte ketel daalt de emissiefactor van 680 ton/PJ naar 70 ton/PJ (ca. 90% reductie).

De SO<sub>2</sub>-emissies in de verkeerssector kunnen worden bestreden door het zwavelgehalte van dieselolie te verlagen. Halvering van de huidige waarde (0.27 gewichtsprocent S) kost circa f. 1.300,-/ton verwijderd SO<sub>2</sub>.

NO<sub>x</sub>-emissies

De volgende maatregelen ter bestrijding van NO<sub>x</sub>-emissies bij stationaire verbrandingsinstallaties worden beschouwd:

- lage branderzône-belasting (LBZB);
- lage NO<sub>x</sub>-branders (LNB);
- selectieve katalytische reductie (SKR);
- stoom- en waterinjectie;
- wervelbedverbranding.

De eerste 3 technieken worden meestal in combinatie toegepast, en wel: LBZB + LNB en LBZB + LNB + SKR. Ze zijn toepasbaar bij alle verbrandingsprocessen, behalve bij wervelbedverbranding en de verbranding van petrocokes in raffinaderijen, waar SKR alleen afzonderlijk mogelijk is. SKR wordt toepasbaar geacht bij installaties met een resterende economische levensduur van minstens 10 jaar. Stoom- en waterinjectie wordt toegepast bij gasturbines. De te bereiken emissiereducties hangen enigszins af van de gebruikte brandstof; tabel 5.5 geeft daarvan een overzicht, dat gebaseerd is op de TAC [6].

Tabel 5.5. NO<sub>x</sub>-emissiereductie bij stationaire verbrandingsinstallaties (in procenten).

brandstof techniek	Gas	Zware Stookolie	Lichte Stookolie	Steenkool
	o LBZB + LNB	39	37	n.v.t.
o LBZB + LNB + SKR	89	89	n.v.t.	87
o SKR	80	80	80	80
o Stoom- en waterinjectie	50	n.v.t.	50	n.v.t.
o Wervelbedverbranding	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	68

De investerings- en bedrijfskosten van LBZB + LNB en LBZB + LNB + SKR zijn vermeld in tabel 5.6. Bij stoominjectie maken de investeringskosten slechts een klein gedeelte uit van de brandstofkosten en zijn daarom verwaarloosd.

Tabel 5.6. Investerings- en bedrijfskosten van NO<sub>x</sub>-bestrijding bij stationaire verbrandingsinstallaties

Sector	Proces (tussen haakjes gem. installatie- grootte)	Brandstof	LBZB + LNB		LBZB + LNB + SKR		Bedrijfskosten (f/GJ)
			Specifieke investering		Specifieke investering		
			nieuw	bestaand	nieuw	bestaand	
I. Openbare elektriciteitsvoorziening	oliegestookte eenheid (300 MW <sub>e</sub> )	zware stookolie	9.4 f/kW <sub>e</sub>	19.5 f/kW <sub>e</sub>	43.6 f/kW <sub>e</sub>	56.7 f/kW <sub>e</sub>	0.40
	gasgestookte eenheid (300 MW <sub>e</sub> )	aardgas	9.4 "	19.5 "	23.1 "	30.0 "	0.18
	gasgestookte eenheid (400 MW <sub>e</sub> )	hoogovangas	9.0 "	18.4 "	21.8 "	28.3 "	0.18
	kolencentrale (600 MW <sub>e</sub> )	steenkool	8.5 "	17.0 "	41.8 "	54.3 "	0.61
II/III. Openbare/industriële warmte/krachtkoppeling	oliegestookte ketel (250 MW <sub>t</sub> )	zware stookolie	4.3 f/kW <sub>t</sub>	9.5 f/kW <sub>t</sub>	21.3 f/kW <sub>t</sub>	27.7 f/kW <sub>t</sub>	0.40
	gasgestookte ketel	aardgas	4.3 "	9.5 "	11.2 "	14.6 "	0.18
	poederkoolketel (250 MW <sub>t</sub> )	steenkool	4.3 "	9.5 "	23.4 "	30.4 "	0.61
V. Kolenvergassing	wervelbedverbranding	steenkool	n.v.t.	n.v.t.	19.1 "	n.v.t.	0.61
	diverse	steenkool	4.3 "	9.5 "	23.4 "	30.4 "	0.61
VI. Raffinaderijen	stoomketels < 250 MW <sub>t</sub>	zware stookolie	3.5 "	7.2 "	16.1 "	20.9 "	0.40
		raffinaderijgas	3.5 "	7.2 "	8.5 "	11.1 "	0.18
	stoomketels > 250 MW <sub>t</sub>	raffinaderijgas	5.0 "	11.4 "	14.7 "	19.1 "	0.18
	fornuizen > 250 MW <sub>t</sub>	zware stookolie	4.1 f/kW <sub>t</sub>	8.9 f/kW <sub>t</sub>	19.9 f/kW <sub>t</sub>	25.9 f/kW <sub>t</sub>	0.40
		raffinaderijgas	4.1 "	8.9 "	10.5 "	13.7 "	0.18
		petrocokes	4.1 "	8.9 "	21.9 "	28.5 "	0.61
		raffinaderijgas	4.8 "	10.9 "	12.9 "	16.8 "	0.18
VII/VIII. Basisindustrie/overige industrie	ketels > 250 MW <sub>t</sub>	zware stookolie	4.2 "	9.0 "	20.0 "	26.0 "	0.40
		gas	4.2 "	9.0 "	10.5 "	13.7 "	0.18
		steenkool	4.2 "	9.0 "	22.0 "	28.6 "	0.61
	ketels 50-200 MW <sub>t</sub>	zware stookolie	4.8 "	10.9 "	24.3 "	31.6 "	0.40
		gas	4.8 "	10.9 "	12.8 "	16.7 "	0.18
		steenkool	4.8 "	10.9 "	26.7 "	34.7 "	0.61

Bij het samenstellen van deze tabel zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Bedrijfskosten voor LBZB + LNB zijn verwaarloosbaar;
- Investeringskosten bij bestaande installaties zijn voor LBZB + LNB ca. 100% hoger dan bij nieuwe installaties (gem. capaciteit van 600 MW<sub>e</sub>) en voor LBZB + LNB + SKR ca. 30% hoger;
- Gebruikte TAC-gegevens voor een 600 MW<sub>e</sub>-installatie zijn herleid voor andere capaciteiten met de betrekking:

$$\frac{I_1}{I_2} = a \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^b \quad (4)$$

waarin I<sub>i</sub> ≈ investeringskosten van een installatie met capaciteit C<sub>i</sub>

C<sub>i</sub> ≈ capaciteit van installatie i

a ≈ constante

b ≈ schaalfactor

De volgende waarden voor de schaalfactor zijn gebruikt:

- LBZB + LNB bij nieuwe installaties : b = 0.8
- LBZB + LNB bij bestaande installaties : b = 0.85
- LBZB + LNB + SKR, zowel bij nieuwe als bestaande installaties : b = 0.8

Ten aanzien van de NO<sub>x</sub>-emissies in de verkeerssector worden de volgende bestrijdingsmaatregelen beschouwd:

- emissie-afstelling;
- driewegkatalysator.

Onder de eerste groep valt de zgn. hooggecomprimeerde arme-mengsel-motor op benzine en LPG. Ook echter de optimalisatie aan het verbrandingsverloop met uitlaatgasrecirculatie van de conventionele motor. De driewegkatalysator is mogelijk bij de conventionele motor op (loodvrije) benzine en LPG. Voor zware dieselmotoren komen uitsluitend verbrandingsmodificaties in aanmerking. Er wordt vanuit gegaan dat de lage NO<sub>x</sub>-uitwerp vanaf 1990 gerealiseerd wordt. Voor de personenauto's en lichte vrachtauto's wordt deze in 2000 voor 100% toegepast geacht, voor dieselmotoren in vrachtauto's en bussen wordt dan een penetratie van 60% verondersteld.

Voor de investeringskosten van deze bestrijdingsmaatregelen wordt uitgegaan van een vast bedrag per voertuig; de bedrijfskosten volgen uit de toename in het brandstofverbruik. Voor de levensduur van personenauto's en lichte vrachtauto's wordt 8 jaar aangehouden. In tabel 5.7 wordt een overzicht gegeven van de gegevens terzake. Bij de verdere berekeningen zijn de gegevens van de Directie Lucht gebruikt. Deze zijn gebaseerd op binnenkort te publiceren resultaten van het onderzoeks- en demonstratieproject "zuinige en schone auto" (Ricardo en Porsche).

Tabel 5.7. Emissiereductie en kosten van bestrijding NO<sub>x</sub>-emissies in de verkeerssector.

techniek	toepassingsgebied	emissiereductie t.o.v. autonome ontwikkeling (%)	extra produktiekosten (f/voertuig)	toename brandstofverbruik t.o.v. autonome ontwikkeling (%)
verbrandingsmodificaties	personenauto's en lichte vrachtauto's op benzine en LPG	33/25*	110	10/1*
drieweg-katalysator	personenauto's en lichte vrachtauto's op benzine	72/67*	370	35/35*
verbrandingsmodificaties	vrachtauto's en bussen op dieselolie	50***	-	1.5***

\* gegevensbron: ERGA respectievelijk Directie Lucht

\*\* 50% van de kosten zijn toe te rekenen aan vermindering van de NO<sub>x</sub>-emissie.

\*\*\* gegevensbron: Directie Lucht

## 2. Procesemissie van SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>

Om de procesemissies van SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> te bepalen kan dezelfde methode gevolgd als bij de verbrandingsemisies. De volgende betrekking wordt gebruikt:

$$E_{i,t} = A_{i,t} * ef_{i,t} \quad (5)$$

waarin:  $E_{i,t}$  = emissie van proces  $i$  in jaar  $t$  (ton/jaar)

$A_{i,t}$  = activiteitsniveau van proces  $i$  in jaar  $t$  (produktievolume/jaar)

$ef_{i,t}$  = emissiefactor van proces  $i$  in jaar  $t$  (ton/produktievolume).

Er wordt vanuit gegaan, dat het activiteitsniveau van het betreffende proces zich ontwikkelt overeenkomstig de ontwikkeling van de economische sector waartoe het proces gerekend kan worden. Deze economische ontwikkeling is in hoofdstuk 4 vermeld. De emissiefactor kan in de tijd variëren door autonome ontwikkelingen en door een gericht milieubeleid in de vorm van toepassing van emissiebeperkende

voorzieningen. Bij een aantal processen zijn evenwel in de praktijk geen voorzieningen mogelijk, terwijl bij andere altijd een of andere vorm van emissiebeperking zal worden toegepast, ongeacht het te voeren milieubeleid. Om deze redenen zijn de te beschouwen processen onderverdeeld in twee groepen, namelijk die waarbij emissiebeperking als milieubeleids optie wordt beschouwd, en die waarbij dit niet het geval is. Deze laatste groep kan dan geaggregeerd worden tot een "rest-groep".

In tabel 5.8 wordt een overzicht gegeven van de emissies van de onderscheiden processen en de bestrijdingsmaatregelen. De gegevens zijn gebaseerd op informatie van de TAC [6] en van het IvM [7,8]. Bij deze tabel zijn de emissies reeds berekend uit het produktievolume van het proces en de emissiefactor volgens berekening (5). Voorts kan nog het volgende worden toegelicht :

- Bij salpeterzuurfabrieken wordt een onderscheid gemaakt in installaties die voor en na 1980 zijn (worden) gebouwd, omdat de emissiefactor voor oude en nieuwe installaties zeer aanzienlijk verschilt (zeer oude installaties 21 kg  $\text{NO}_x$ /ton  $\text{HNO}_3$ , in 1980 gemiddeld 9.7 kg  $\text{NO}_x$ /ton  $\text{HNO}_3$ , moderne installaties minder dan 1.5 kg  $\text{NO}_x$ /ton  $\text{HNO}_3$ ).
- Door middel van "tail gas units" in Clausfabrieken wordt een toename van de efficiëntie van de zwavelverwijdering van 95% naar 99% verondersteld.
- Bij olie-ontzwaveling t.b.v. roetfabrieken wordt ervan uitgegaan dat de zgn. zwavelpremie stijgt tot het niveau van de kosten van olie-ontzwaveling.

Wat betreft de "rest-groep" wordt in tabel 5.9 een nadere specificatie gegeven.

Tabel 5.8. Procesemissies en bestrijdingsmaatregelen

Economische sector	Proces	"Onbestreden" emissie (10 <sup>3</sup> ton)										Bestrijdingsmaatregelen	Emissie-reductie (%)	Kapitaalskosten (f/ton behandelde verontreiniging)	Bedrijfskosten (f/ton behandelde verontreiniging)
		1980		1985		1990		1995		2000					
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>				
Raffinaderijen	Clausfabrieken	18.0		20.0		22.0		24.0		25.0		"tail gas units"	80	2100	400
Overige chemische ind.		4.3		5.4		7.5		9.9		13.0		Uitwassen H <sub>2</sub> S- ("gas sweetening")	90	1000	1000
Petrochemische industrie	Productie van roet	4.4		4.1		5.4		5.6		5.8		ontzwaveling grondstof-olie	66	-	1800
Kunstmest-industrie	productie van salpeterzuur														
	- install. voor 1980		14.5		13.8		9.5		4.4		0.7	sel.kat.reductie	80	700	700
	- install. na 1980		-		0.5		2.2		4.3		6.1	idem	80	2800	2800
Petrochem. industrie			7.0		6.7		8.6		9.0		9.3	idem	80	850	700
Diverse	Restgroep	33.1	6.2	23.4	5.9	26.6	5.9	27.7	6.4	28.9	7.0	-	-	-	-
<b>Totaal</b>		<b>59.8</b>	<b>27.7</b>	<b>52.9</b>	<b>26.9</b>	<b>61.5</b>	<b>26.2</b>	<b>67.2</b>	<b>24.1</b>	<b>72.7</b>	<b>23.1</b>				



Tabel 5.9 Specificatie procesemissies in de "rest-groep"

Proces	"Onbestreden" emissie (10 <sup>3</sup> ton)									
	1980		1985		1990		1995		2000	
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Zwavelzuur- produktie	8.9		9.6		10.7		10.2		9.8	
Overige che- mische proces- sen	12.6		3.9		5.2		5.9		6.5	
Basismetmaal- industrie	7.4	1.0	5.1	0.9	5.1	1.1	5.2	1.4	5.2	1.7
Vuilverbran- ding	1.7	2.7	2.0	3.2	2.4	3.8	2.9	4.5	3.5	5.3
Bouwmaterialen industrie	2.0		2.2		2.5		2.7		3.0	
Ammoniakpro- ductie		2.5		1.8		1.0		0.5		0
Diversen	0.5		0.6		0.7		0.8		0.9	
<b>Totaal</b>	<b>33.1</b>	<b>6.2</b>	<b>23.4</b>	<b>5.9</b>	<b>26.6</b>	<b>5.9</b>	<b>27.7</b>	<b>6.4</b>	<b>28.9</b>	<b>7.0</b>

### 5.3. Emissies en bestrijdingsmaatregelen voor NH<sub>3</sub>

#### 5.3.1. Emissies

Ammoniakemissies treden hoofdzakelijk op in de landbouw (bij de produktie en het gebruik van dierlijke mest en bij het gebruik van kunstmest) en in mindere mate in de chemische industrie.

De emissie uit dierlijke mest hangt vooral af van de volgende factoren:

- de omvang van de mestproduktie, die per diersoort verschilt;
- het stikstofgehalte van de mest (zowel anorganisch als totaal stikstof); deze verschilt eveneens per diersoort;
- de wijze van mestproduktie en mestgebruik, het "emissieproces".

De grootte van de emissie wordt berekend m.b.v. de volgende betrekkingen:

$$E_{i,t} = M_{i,t} * ef_i \quad (6)$$

met  $ef_i = a_i * N \quad (7)$

In deze betrekkingen is:

$E_{i,t}$  = emissie bij proces i in jaar t (ton NH<sub>3</sub>/jaar)

$M_{i,t}$  = omvang mestproduktie of mestgebruik bij proces i in jaar t (ton mest/jaar)

$ef_i$  = emissiefactor bij proces i (ton NH<sub>3</sub>/ton mest)

$a_i$  = evenredigheidsfactor tussen NH<sub>3</sub>-emissie en N-gehalte van de mest (ton NH<sub>3</sub>/ton N)

N = stikstofgehalte van de mest (ton N/ton mest)

Om de omvang van de mestproduktie te bepalen is uitgegaan van de CBS-landbouwtellingen 1980 [5]. Toekomstige waarden zijn berekend in overeenstemming met de economische ontwikkeling in de rundveehouderij en de intensieve veehouderij (zie hoofdstuk 4), waarbij een evenredige toename van de mestproduktie met de brutoproduktiewaarde is verondersteld. Tabel 5.10 geeft een projectie van de mestproduktie. Er wordt voor de verdere berekeningen vanuit gegaan dat alle mest die in de stal wordt geproduceerd, op het land wordt verspreid.

Tabel. 5.10. Projectie van de mestproduktie naar diersoort (in 10<sup>6</sup> ton/jaar)

Diersoort	1980	1985	1990	2000
<u>Produktie op het weiland</u>				
rundvee (faeces)	14.5	16.1	17.7	21.3
rundvee (urine)	9.7	10.8	11.8	14.2
<u>Produktie in de stal</u>				
rundvee	33.6	37.3	41.0	49.2
mestkalveren	1.3	1.3	1.4	1.6
mestvarkens	9.4	10.0	10.5	11.5
lokzeugen	5.2	5.5	5.7	6.3
legkippen	1.3	1.4	1.5	1.6
slachtkuikens	0.4	0.4	0.4	0.5
eenden	0.02	0.02	0.02	0.02
kalkoenen	0.006	0.006	0.007	0.007
Totale hoeveelheid voor bemesting bruikbaar	51.2	55.9	60.5	70.7

In tabel 5.11 wordt een overzicht gegeven van het stikstofgehalte van de mest per diersoort; de gegevens zijn gebaseerd op CBS-cijfers.

Tabel 5.11. Stikstofgehaltenes van dierlijke mest

Diersoort	Totaal N-gehalte (gew. %)	Anorganisch N-gehalte (gew. %)
rundvee in de stal	0.44	0.22
rundvee in de wei	0.35/0.63 *	-
mestkalveren	0.30	0.24
mestvarkens	0.66	0.33
fokzeugen	0.71	0.36
opfokvarkens	0.70	0.35
legkippen	1.25	0.88
slachtkuikens	2.56	1.79
legeenden	1.63	1.14
slachteenden	1.63	1.14
kalkoenen	4.28	3.00

\* faeces/urine

Het verband tussen het stikstofgehalte en de emissiefactor hangt af van de wijze van mestproduktie en -gebruik. Dit is vermeld in tabel 5.12 voor de onderscheiden "emissieprocessen". De gegevens zijn ontleend aan Buijsman [11].

Tabel 5.12. Emissiefactoren bij ammoniakemissie uit dierlijke mest

Emissieproces	Emissiefactor ef
Mestproduktie in de wei	
- rundvee (faeces)	0.49 N <sub>tot</sub>
- rundvee (urine)	0.06 N <sub>tot</sub>
Mestproduktie en -opslag in de stal	0.09 N <sub>tot</sub>
Verspreiding van mest	
- bouwland	0.24 N <sub>anorg</sub>
- grasland	0.49 N <sub>anorg</sub>

In de berekeningen worden de stikstofgehalten en de emissiefactoren konstant in de tijd verondersteld.

De ammoniakemissie bij kunstmestgebruik in de landbouw wordt konstant verondersteld en wel op 10.600 ton/jaar.

De overheersende bron van procesemissies van ammoniak wordt gevormd door de chemische industrie, in het bijzonder de kunstmestindustrie. Volgens de Emissieregistratie Lucht bedroeg de uitwerp in 1980 ca. 7600 ton. Toekomstige emissies zijn berekend uitgaande van de economische groei in deze bedrijfstak (zie hoofdstuk 4).

In tabel 5.13 wordt een overzicht gegeven van de emissies die m.b.v. het voorgaande zijn berekend. De uitwerp in 1980 is enigszins lager dan in [2] is vermeld (131.000 ton); aangezien in [2] geen projecties zijn gegeven is een verdere vergelijking niet mogelijk.

Tabel 5.13. Projectie van de ammoniakemissies zonder bestrijdingsmaatregelen (in  $10^3$  ton/jaar).

Proces	1980	1985	1990	2000
<u>Landbouwemissies</u>				
o mestproduktie in de wei	32.7	36.3	40.0	47.9
o mestproduktie en -opslag				
in de stal van:				
- rundvee	12.6	14.0	15.4	18.4
- mestkalveren	0.3	0.4	0.4	0.4
- mestvarkens	5.3	5.7	6.0	6.5
- fokzeugen	3.0	3.3	3.4	3.8
- legkippen	1.4	1.5	1.6	1.7
- slachtkuikens	0.8	0.8	0.9	0.9
o verspreiding van mest op:				
- grasland	24.0	26.0	24.9	31.2
- bouwland	21.3	23.1	28.0	28.5
o kunstmestgebruik	10.6	10.6	10.6	10.6
<u>Procesemissies</u>				
o kunstmestindustrie	7.6	8.2	9.5	12.8
o overige chemische industrie				
<u>Overige emissies</u>	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>Totaal</b>	<b>120.1</b>	<b>130.4</b>	<b>141.2</b>	<b>163.2</b>

### 5.3.2. Bestrijdingsmaatregelen

Om emissies van ammoniak te beperken staan de volgende maatregelen ter beschikking.

De emissie ten gevolge van mestproduktie en mestopslag in de stal, die volgens de huidige schattingen ca. 20% van de totale emissie uit dierlijke mest uitmaakt, kan worden tegengegaan door ventilatielucht uit de stal te leiden door een grondfilter of luchtwasser. Grondfilters kunnen verschillende vullingen bevatten zoals compost, turf/heidemengsel, etc. In grondfilters en luchtwassers wordt ammoniak door bacteriën omgezet in nitraat, wat veelal zal leiden tot een nitraatemissie naar het oppervlaktewater. Momenteel wordt de toepassing van grondfilters nader onderzocht. Het rendement van wassing en filtratie van ventilatielucht uit de stal is voor ammoniakverwijdering op 95% geschat.

Een alternatief is de installatie van een mechanisch mesttransportsysteem met gesloten opslag van mest buiten de stal, al dan niet in combinatie met toepassing van ventilatiesystemen en ammoniakverwijdering uit ventilatielucht. Zo'n gesloten mestopslag gaat gepaard met een relatief hoog stikstofgehalte van de mest.

De emissie ten gevolge van het gebruik van dierlijke mest voor bemestingsdoeleinden kan worden verminderd door een aantal maatregelen te treffen in de wijze van bemesten zoals:

- uitrijden bij koel en vochtig weer;
- het gebruik van vaste in plaats van dunne mest;
- het vlak boven de grond verspreiden en direkt onderploegen van de mest;
- dunne mest injekteren in plaats van verspreiden.

De beide laatste maatregelen worden reeds op beperkte schaal toegepast. Bij mestinjeکتie is een rendement haalbaar van 90% voor emissiereductie van ammoniak. De reductie die door het direct onderploegen van de mest bewerkstelligd wordt is onbekend; verondersteld wordt een reductie van 70%.

In verschillende takken van de chemische industrie kan door absorptie en strippingtechnieken een emissiereductie van 95% bereikt worden; dit komt voor de gehele chemische industrie neer op een reductie van 50% in ammoniakemissies. Tenslotte doen zich bij de mestproduktie in de wei en bij het gebruik van kunstmest geen reële bestrijdingsmaatregelen voor.

In tabel 5.14 wordt een overzicht gegeven van de bestrijdingsmaatregelen, te bereiken emissiereducties en de kosten daarvan. De gegevens zijn grotendeels gebaseerd op informatie van het IMAG.

T.a.v. de kosten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd [5].

Voor de investeringskosten bij de installatie van grondfilters en luchtwassers is uitgegaan van een vast bedrag per m<sup>3</sup> te behandelen ventilatielucht, welke varieert met de diersoort. De variabele kosten voor deze bestrijdingsmethode bestaan voornamelijk uit extra energieverbruik van de ventilatoren.

Voor de investeringskosten bij de toepassing van een gesloten opslag van mest buiten de stal, is uitgegaan van een vast bedrag (naar grootte gedifferentieerd) voor de installatie van een pompkelder, silo, silo-afdekking, pompen, roerapparaat, etc.

Voor de installatie van een transportsysteem in de stal is uitgegaan van een vast bedrag per plaats. Als variabele kosten wordt alleen een vast percentage (1% van het bouwkundige deel, 5% van het mechanische deel) van de investeringskosten meegenomen. Van extra energiekosten is nauwelijks sprake. Voor de dimensionering is uitgegaan van een opslagcapaciteit van een half jaar, naar diersoort gedifferentieerd. Voor transportsystemen van mest voor mestvarkenbedrijven, fokzeugbedrijven en rundveebedrijven wordt een prijs aangehouden die geldt voor de installatie in een mestvarkensstal met dwarsopstelling.

De kosten van een eventueel te plaatsen grondfilter of luchtwasser in een gesloten opslagsysteem vallen in het niet bij de andere installatiekosten en zijn niet in beschouwing genomen.

De kosten van gesloten mestopslag, grondfilters en luchtwassers zijn gedifferentieerd voor 1990 en 2000 in verband met ontwikkelingen in de stalbouw en de bezettingsgraad.

Voor mest van mestkalveren, legkippen en slachtkuikens is geen bestrijding verondersteld omdat het gaat om relatief geringe ammoniakemissies (ongeveer 2% van het totaal). Weliswaar zijn hier eveneens bovengenoemde bestrijdingsmaatregelen mogelijk, maar in het licht van een landelijke beschouwing is de te bereiken emissiereductie slechts marginaal. Uiteraard is toepassing van deze maatregelen op regionaal niveau wel interessant.

Injectie van mest is zowel toepasbaar op bouwland als op grasland, terwijl verspreiding gevolgd door het direct onderploegen van de mest alleen van toepassing is op bouwland. Hierbij wordt het onderploegen niet als extra bewerking aangemerkt, wat extra kosten met zich mee brengt.

Verondersteld wordt dat injectie van mest in loondienst gebeurt, waarbij de investeringskosten neerkomen op een vast bedrag voor een injecteur en vaste meerkosten voor een extra zware trekker.

Om alle geproduceerde mest (1980) in Nederland kwijt te kunnen is een bemesting verondersteld van 60 m<sup>3</sup>/ha in de akkerbouw en van 20 m<sup>3</sup>/ha op grasland. De variabele kosten komen neer op extra arbeidskosten en brandstofkosten.

Uitgaande van een bepaalde bemestingsperiode, wordt het jaarlijkse aantal draaiuren per injecteur + trekker voor akkerbouwland op 150 uur verondersteld en voor grasland op 300 uur. Hiermee zijn vaste kapitaalslasten te berekenen. Voor de investeringskosten die gepaard gaan met het verspreiden van mest vlak boven de grond, wordt uitgegaan van een vaste meerprijs voor de mestverspreider. Meerkosten in de vorm van arbeid en/op brandstof zijn er nauwelijks, zodat variabele kosten niet in beschouwing worden genomen.

Tabel. 5.14 Emissiereductie en kosten van bestrijdingsmaatregelen NH<sub>3</sub>-emissies

Emissiebron	Bestrijdingsmaatregel	Emissiereductie (%)	1990		2000	
			kapitaalskosten (f/ton NH <sub>3</sub> verwijderd)	bedrijfskosten (f/ton NH <sub>3</sub> verwijderd)	kapitaalskosten (f/ton NH <sub>3</sub> verwijderd)	bedrijfskosten (f/ton NH <sub>3</sub> verwijderd)
Mestproductie in de stal van:						
- rundvee	gesloten mestopslag	95	46.000	8.700	33.000	6.100
	grondfilter	95	8.100	2.800	7.200	2.500
	luchtwater	95	8.100	5.000	7.100	4.400
- mestvarkens	gesloten mestopslag	95	56.000	10.000	55.000	10.000
	grondfilter	95	31.000	4.800	30.000	4.700
	luchtwater	95	32.000	15.500	32.000	8.900
- fokzeugen	gesloten mestopslag *	95	50.000	8.600	39.000	6.200
	grondfilter	95	23.000	5.900	20.000	5.100
	luchtwater	95	24.000	11.100	20.000	9.500
Verspreiding van mest op:						
- bouwland	vlak boven de grond verspreiden en onderploegen	70	700	-	700	-
	mestinjectie	90	4.900	3.300	4.900	3.300
- grasland	mestinjectie	90	1.500	1.700	1.500	1.700
Chemische industrie	absorptie + strippen	50	totaal: f. 1.400,-		totaal f. 1.400,-	

\* alleen toepasbaar bij dragende zeugen (tweederde van het totaal aantal zeugen).



## 6. BEREKENINGEN EN RESULTATEN

### 6.1. Berekeningsvarianten

Om te zoeken naar kostenoptimale oplossingen voor de bestrijding van  $\text{SO}_2^-$ ,  $\text{NO}_x^-$  en  $\text{NH}_3^-$  emissies zijn in eerste instantie verschillende pakketten van bestrijdingsmaatregelen voor de afzonderlijke stoffen (berekeningsvarianten) samengesteld. Daarbij is zowel gelet op samenhang in bestrijdingsmaatregelen als op de kosteneffectiviteit van de afzonderlijke maatregelen. Wat betreft de samenhang zijn steeds maatregelen beschouwd die op meerdere sectoren en/of processen toepasbaar zijn. Ten aanzien van de kosteneffectiviteit zijn op basis van de gegevens in het voorgaande hoofdstuk de bestrijdingskosten berekend in gulden per potentieel mol  $\text{H}^+$  uitworpreductie. In bijlage 2 wordt daarvan een overzicht gegeven. Op grond daarvan zijn de volgende berekeningsvarianten voor de afzonderlijke stoffen onderscheiden.

#### I. $\text{SO}_2^-$ -bestrijding

##### I.1. Ongewijzigd beleid (basisvariant)

Dit betreft een voortzetting van het huidige milieubeleid zonder aanvullende bestrijdingsmaatregelen en normstelling. Bestrijdingsmaatregelen die onderdeel vormen van het vigerende milieubeleid zijn in deze variant opgenomen. Dit betreft met name de maatregelen en uitworpnormen die zijn neergelegd in de "Tweede Circulaire inzake eisen met betrekking tot de uitworp van luchtverontreinigende stoffen door kolengestookte installaties" (Ministerie van V en M, september 1982). Het gaat daarbij om het volgende:

- Bij alle nieuwe en om te bouwen kolengestookte eenheden t.b.v. de openbare elektriciteitsvoorziening en de openbare warmte/kracht-koppeling dient in beginsel volledige rookgasontzwaveling met een ontwerpendement van 90% te worden toegepast; de maximale  $\text{SO}_2^-$ -uitworp bedraagt 230 ton/PJ.
- Bij alle nieuwe en om te bouwen kolengestookte industriële installaties dient de  $\text{SO}_2^-$ -uitworp beperkt te worden tot 600 ton/PJ tot 1990 en tot 230 ton/PJ na 1990.

## I.2. Volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding.

In deze variant zijn de technisch gezien toepasbare bestrijdingsmaatregelen ter vermindering van SO<sub>2</sub>-emissies opgenomen; het blijkt dat deze een kosteneffectiviteit hebben van minder dan f 0,20/mol H<sup>+</sup> uitworpreductie. Het gaat om de volgende maatregelen:

- Ontzwaveling van zware stookolie van 1.6 tot 0.5 gewichtsprocent zwavel, behalve in de raffinaderijsector.
- Ontzwaveling van lichte stookolie en dieselolie van 0.27 tot 0.15 gewichtsprocent zwavel.
- Rookgasontzwaveling bij kolencentrales, bestaande kolengestookte ketels in de industrie en stoomketels en fornuizen in de raffinaderijsector.
- Wervelbedverbranding bij kleine nieuwe kolengestookte ketels in de industrie (<50 Mw<sub>t</sub>).
- Tail gas units bij Clausfabrieken en maatregelen in de chemische industrie.

Deze maatregelen worden zowel in 1990 als 2000 toepasbaar geacht.

## II. NO<sub>x</sub>-bestrijding.

### II.1 Ongewijzigd beleid (basisvariant)

In de eerder genoemde "Tweede circulaire" worden de volgende maatregelen ter beperking van de NO<sub>x</sub>-uitworp voorgeschreven:

- Bij nieuwe poederkoolketels dienen lage-NO<sub>x</sub> branders te worden toegepast, zodanig dat de NO<sub>x</sub>-uitworp maximaal 270 ton/PJ bedraagt; bij beproeving mag de NO<sub>x</sub>-uitworp maximaal 190 ton/PJ zijn.
- Bij de overige kolengestookte eenheden mag de NO<sub>x</sub>-uitworp niet hoger zijn dan 270 ton/PJ.

In verband met de diversiteit in installaties wordt in de berekeningen een emissiefactor van 220 ton/PJ gehanteerd, als gemiddelde waarde voor diverse installaties.

## II.2 Verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding

In deze variant zijn de relatief goedkope bestrijdingsmaatregelen opgenomen, d.w.z. met een kosten-effectiviteit van minder dan ca. f 0,20/mol H<sup>+</sup> uitworpreductie. De grens van f 0,20/mol H<sup>+</sup> is gekozen omdat onder deze waarde volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding mogelijk is. Deze variant komt neer op de volgende maatregelen:

- Lage NO<sub>x</sub>-branders in combinatie met lage branderzône-belasting, zowel bij nieuwe als bestaande installaties in de openbare elektriciteitsvoorziening en de openbare warmte/kracht-koppeling, in de raffinaderijsector en bij industriële ketels.
- Katalytische reductie bij verbranding van petrocokes in de raffinaderijsector.
- Emissie-afstelling (variant Directie Lucht) bij personenauto's op benzine en LPG en verbrandingsmodificaties bij dieselmotoren met directe insputing.

Er wordt vanuit gegaan dat deze technieken in 1990 reeds toepasbaar zijn, met uitzondering van emissie-afstelling bij personenauto's.

## II.3 Volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding

Deze variant wordt gekenmerkt door toepassing van duurdere technieken die een groter effect op de emissie hebben. Het gaat dan om:

- Selectieve katalytische reductie in combinatie met lage-NO<sub>x</sub> branders bij alle sectoren.
- Selectieve katalytische reductie in combinatie met wervelbedverbranding voor 'nieuwe kleine kolengestookte ketels in de sectoren overige industrie en overige gebruikers.
- Katalytische reductie bij compressiewarmtepompen met gasmotor.
- Waterinjectie bij gasturbines (pieklasteenheden) en stoominjectie bij STEG-eenheden en industriële gasturbines.
- Lage-NO<sub>x</sub> CV-ketels bij de gezinshuishoudingen.
- Driewegkatalysator bij personenauto's op benzine en LPG.
- Selectieve katalytische reductie in de chemische industrie.

Verondersteld wordt dat deze technieken eerst in 2000 toepasbaar zijn.

Bestrijdingstechnieken uit variant II.2, waarvoor geen alternatieve verdergaande technieken bestaan, zijn eveneens in deze variant opgenomen.

### III. NH<sub>3</sub>-bestrijding.

#### III.1. Ongewijzigd beleid (basisvariant)

In het huidige milieubeleid zijn geen maatregelen ter vermindering van de ammoniakemissie voorzien.

#### III.2. Eenvoudige NH<sub>3</sub>-bestrijding

In deze variant zijn die maatregelen ter beperking van ammoniakemissie opgenomen, die technisch realiseerbaar zijn. Het gaat daarbij om :

- Grondfilters voor mestproduktie in de stal;
  - Vlak bovengronds verspreiden en direct onderploegen van mest op bouwland en injectie van mest op grasland;
  - Absorptie en stripping in de kunstmestindustrie en de chemische industrie.
- Gesloten mestopslag en luchtwassers als alternatief voor grondfilters zijn niet in beschouwing genomen uit kostenoverwegingen.
- De maatregelen worden zowel in 1990 als 2000 toepasbaar geacht.

In bijlage 3 is een overzicht gegeven van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>; voor NH<sub>3</sub> wordt verwezen naar tabel 5.14. In bijlage 3 is tevens de resulterende emissiefactor na toepassing van de bestrijdingstechniek opgenomen; voor zover niet anders vermeld geldt deze zowel voor 1990 als voor 2000.

●

## 6.2. Resultaten modelberekeningen

In deze paragraaf worden eerst de berekeningsresultaten gepresenteerd voor de verschillende varianten afzonderlijk (6.2.1.); in 6.2.2. zijn de varianten gecombineerd. Vervolgens worden de resultaten weergegeven voor de diverse bestrijdingstechnieken (6.2.3.). Op basis daarvan kunnen maatregelen naar kosteneffectiviteit worden gerangschikt, zodat optimale bestrijdingspakketten kunnen worden vastgesteld (6.2.4.).

### 6.2.1. Emissie-effecten en kosten van de varianten

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de emissie-effecten en de kosten voor de onderscheiden berekeningsvarianten. Voor verbrandingsemissies van  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$  zijn de berekeningen uitgevoerd met behulp van het SELPE-model; procesemissies van  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$  en  $\text{NH}_3$ -emissies zijn niet met het model berekend.

In figuur 6.1 t/m 6.4 is een overzicht gegeven van de (resterende) emissies voor de belangrijkste sectoren en de onderscheiden varianten en jaren. De emissies zijn zowel uitgedrukt in miljoenen kg van de betreffende stof als in miljarden molen potentieel zuur. Een overzicht van de bereikte emissiereductie en daarmee samenhangende kosten is weergegeven in figuur 6.5 t/m 6.7. De emissiereductie is steeds betrokken op de betreffende basisvariant. Kosten betreffen de totale jaarlijkse kosten (kapitaalskosten + bedrijfskosten), uitgedrukt in het prijspeil van 1980. In het volgende worden deze figuren nader toegelicht. Gedetailleerde gegevens zijn vermeld in bijlage 4.

#### $\text{SO}_2$ -basisvariant (variant I.1)

Bij ongewijzigde voortzetting van het huidige milieubeleid daalt de totale  $\text{SO}_2$ -uitworp van 484000 ton in 1980 via 413000 ton in 1990 tot 361000 ton in 2000. Bij inzet van 3000  $\text{MW}_e$  kernenergie na 1990 bedraagt de uitworp in 2000 350.000 ton. De in het huidige beleid vastgelegde bestrijdingsmaatregelen ("Tweede circulaire") leiden tot milieulasten van respectievelijk 71 miljoen gulden in 1990 en 262 miljoen gulden in 2000; bij 3000  $\text{MW}_e$ -kernenergie bedragen de kosten in 2000 150 miljoen gulden.

De belangrijkste emissievermindering doet zich voor bij de openbare elektriciteitsopwekking: ten opzichte van 1980 is de daling in 1990 ca. 40% en in 2000 ca. 65%. Dit is het gevolg van de afname en het uiteindelijk verdwijnen van stookolie

als brandstof, die vervangen wordt door steenkool waarbij 90% rookgasontzwaveling is voorgeschreven. De milieulasten in 1990 zijn volledig en in 2000 voor 90% aan deze bestrijdingstechniek toe te schrijven.

Bij de stads- en wijkverwarming veranderen de (overigens geringe) emissies nauwelijks.

Bij de industriële warmte/kracht-opwekking is sprake van een aanzienlijke toename van de uitworp, namelijk van 3000 ton in 1980 tot respectievelijk 56000 ton in 1990 en 43000 ton in 2000. Deze stijging wordt veroorzaakt door de sterke uitbreiding van het vermogen en het gebruik van stookolie en steenkool in deze sector. Bestrijding vindt plaats door rookgasontzwaveling toe te passen (in 2000); de kosten daarvan bedragen 12 miljoen gulden.

De ontwikkeling van de emissies in de raffinaderijsector wordt vooral bepaald door de verandering van de brandstofmix van het interne verbruik (meer raffinaderijgas en minder stookolie). Daardoor dalen de verbrandingsemissies van 106000 ton in 1980 tot 94000 ton in 1990 en 90000 ton in 2000. Het totale interne verbruik en de totale doorzet blijven vrijwel gelijk.

In de basisindustrie en vooral in de overige industrie dalen de emissies fors (ca. 50%) door de substitutie van stookolie door aardgas, die in 2000 bijna volledig is. In de basisindustrie is de koleninzet beperkt (ca. 15 PJ) en bijgevolg de daaruit resulterende emissie. Deze uitworp wordt in 2000 voor ca. 45% bestreden door toepassing van rookgasontzwaveling. De kosten daarvan komen neer op 8 miljoen gulden.

In de sectoren overige gebruikers en verkeer blijft de brandstofinzet vrijwel gewijzigd, waardoor het emissieniveau niet veel verandert. Doordat in de gezinshuishoudingen aardgas in snel tempo de overige brandstoffen (huisbrandolie) verdringt, daalt de emissie hier relatief veel; het totale effect is overigens gering vanwege het relatief kleine brandstofverbruik van deze sector.

Bij de procesemissies is sprake van een lichte stijging als gevolg van de veronderstelde autonome ontwikkeling in de chemische industrie.

#### Volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding (variant I.2)

Ten opzichte van de basisvariant daalt in 1990 de totale uitworp met ca. 55% van 413000 ton tot 181000 ton; in 2000 is deze daling eveneens ca. 55%, en wel van 36100 ton tot 156000 ton. De gelijke relatieve emissiereductie in beide jaren wordt veroorzaakt door het feit dat dezelfde bestrijdingstechnieken worden toegepast. De totale kosten van deze bestrijdingsmaatregelen bedragen in 1990 583 miljoen gulden en in 2000 653 miljoen gulden. Dit is inclusief de kosten van de

basisvariant; t.o.v. deze variant stijgen de kosten in 1990 met 512 miljoen gulden en in 2000 met 391 miljoen gulden. Indien na 1990 3000 MW<sub>e</sub>-kernenergie wordt ingezet, wordt in 2000 de emissie 145.000 ton bij totale milieulasten van 541 miljoen gulden.

Volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding heeft het grootste effect bij de openbare elektriciteitsvoorziening en bij de raffinaderijen: ten opzichte van de basisvariant is de reductie voor deze beide sectoren 70 à 80%.

Bij de openbare elektriciteitsvoorziening wordt de SO<sub>2</sub>-uitworp bestreden door gebruik van 0.5% in plaats van 1.5% zwavelhoudende stookolie en het toepassen van rookgasontzwaveling bij bestaande kolencentrales. Het daarmee in 1990 en 2000 te bereiken emissieniveau kan nauwelijks verder verlaagd worden zonder wijzigingen de vermogensopbouw en de brandstofinzet. De milieulasten in deze sector bedragen in 1990 202 miljoen gulden en in 2000 275 miljoen gulden.

Bij de openbare warmte/kracht-koppeling verdwijnen de emissies in 1990 door de inzet van aardgas.

Bij de industriële warmte/kracht-koppeling vindt bestrijding plaats door stookolie-ontzwaveling tot 0.5% (1990) en toepassing van rookgasontzwaveling. Daardoor wordt het emissieniveau t.o.v. de basisvariant met ca. 70% verlaagd. De kosten van de bestrijding bedragen respectievelijk 54 miljoen gulden in 1990 en 78 miljoen gulden in 2000. Bij de raffinaderijen worden de verbrandingsemissies bestreden door toepassing van rookgasontzwaveling bij alle bestaande olie en petrocokes verstokende ketels en fornuizen. De emissiereductie bedraagt in 1990 ca. 65% en in 2000 ca. 80%, tegen bestrijdingskosten van 208 miljoen gulden (1990) en 172 miljoen gulden (2000).

In de industrie wordt in 1990 stookolie met een 0.5% zwavel toegepast en na 1990 rookgasontzwaveling. Hierdoor nemen de emissies met ca. 60% af. De kosten bedragen 57 miljoen gulden.

Bij de sectoren overige gebruikers, gezinshuishoudingen en verkeer wordt de uitworp bestreden door gebruik van lichte stookolie met een zwavelgehalte van 0.15%. Dit resulteert in een emissiereductie van ca. 50% die voor deze drie sectoren tezamen neerkomt op ca. 29 miljoen gulden per jaar.

Procesemissies worden eerst na 1990 bestreden, hetgeen resulteert in een emissiereductie van ca. 50%. De kosten van deze bestrijding komen neer op 42 miljoen gulden in 2000.

Tenslotte zijn voor de zeescheepvaart geen bestrijdingsmaatregelen verondersteld, zodat het aangenomen emissieniveau van 26000 ton/jaar niet verandert.

NO<sub>x</sub>-basisvariant (variant II.1)

In tegenstelling tot SO<sub>2</sub> stijgt bij voortzetting van het huidige milieubeleid de totale NO<sub>x</sub>-uitworp, en wel van 516000 ton in 1980 via 543000 ton in 1990 tot 558000 ton in 2000. Als na 1990 3000 MW<sub>e</sub> kernenergie wordt ingezet wordt in 2000 een emissie van 511.000 ton bereikt. De stijging van de uitworp doet zich met name voor bij de stads- en wijkverwarming en de industriële warmte/kracht-opwekking, tengevolge van de forse uitbreiding van het vermogen in deze sectoren.

Gezien de geringe bestrijding die in de basisvariant wordt verondersteld, zijn de milieulasten laag: 2 miljoen gulden in 1990 en 6 miljoen gulden in 2000.

Bij de openbare elektriciteitsopwekking daalt in 1990 de NO<sub>x</sub>-uitworp door de verminderde stookolie-inzet. In 2000 is evenwel sprake van een stijging ten gevolge van een toenemend verbruik van elektriciteit die voor een belangrijk deel in kolencentrales wordt opgewekt. De bestrijdingskosten bedragen in 1990 1.5 miljoen gulden en in 2000 4 miljoen gulden, hetgeen ca. 80% van de totale bestrijdingskosten uitmaakt. Bij stads- en wijkverwarming stijgt de uitworp aanzienlijk: van 3000 ton in 1980 via 12000 ton in 1990 tot 25000 ton in 2000. In de basisvariant wordt geen bestrijding verondersteld.

Bij de industriële warmte/kracht-opwekking stijgt de emissie van 5000 ton in 1980 tot respectievelijk 22000 ton in 1990 en 36000 ton in 2000. Dit is deels het gevolg van stookoliegebruik (in 1990 ca. 56 PJ en in 2000 ca. 20 PJ) en deels het gevolg van koleninzet.

Bij de raffinaderijen veranderen de emissies nauwelijks omdat de totale doorzet vrijwel gelijk blijft.

De industrie dalen de emissies in 1990 door de verdringing van stookolie door aardgas. Bij de gezinshuishoudingen en bij de procesemissies verandert het emissieniveau niet veel. De emissie bij de overige gebruikers stijgt ten gevolge van de introductie van warmtepompen.

In de verkeerssector is in 1990 sprake van een geringe emissiestijging door een iets toenemend brandstofverbruik, maar na 1990 treedt een daling op door de veronderstelde autonome introductie van de zuiniger en emissiebeperkende arme-mengsel-motor.



Verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding (variant II.2)

Ten opzicht van de basisvariant daalt de totale NO<sub>x</sub>-uitworp in 1990 tot 501000 ton (ca. 8% reductie) en in 2000 tot 462000 ton (ca. 17% reductie). Bij kernenergie na 1990 wordt de uitworp in 2000 432000 ton. De emissiereductie in 1990 vindt voornamelijk plaats bij de openbare elektriciteitsvoorziening, de raffinaderijen en de basisindustrie, door toepassing van lage branderzône-belasting in combinatie met lage NO<sub>x</sub>-branders. De kosten van deze maatregelen bedragen ca. 62 miljoen gulden. De tweemaal zo grote emissiereductie in 2000 wordt grotendeels veroorzaakt door toepassing van verbrandingsmodificaties in de verkeerssector. In 2000 bedragen de totale milieulasten 224 miljoen gulden.

De openbare elektriciteitsvoorziening worden de emissies verlaagd met respectievelijk 25% in 1990 en 10% in 2000 door toepassing van LBZB+LNB; de kosten daarvan bedragen in 1990 18 miljoen gulden in 2000 9 miljoen gulden.

Bij de stads- en wijkverwarming, de overige gebruikers en de gezinshuishoudingen, alsmede wat betreft de procesemissies zijn geen bestrijdingsmaatregelen verondersteld, zodat de emissies hier dezelfde zijn als in de basisvariant.

Bij de industriële warmte/kracht-opwekking is sprake van een zeer geringe emissiedaling (2000 à 3000 ton). Bij de raffinaderijen kan het emissieniveau verlaagd worden met ca. 35% als LBZB+LNB wordt toegepast. De kosten daarvoor zijn in 1990 7 miljoen en in 2000 14 miljoen gulden.

Ongeveer dezelfde reductie wordt bereikt bij de basisindustrie, waarbij de milieulasten bijna 20 miljoen gulden per jaar bedragen. In de overige industrie is het effect van LBZB+LNB slechts van marginale betekenis.

In de verkeerssector heeft emissie-afstelling bij personenauto's op benzine en LPG en verbrandingsmodificaties bij dieselmotoren met directe inspuiting pas in 2000 effect. De emissies worden dan met ca. 25% verlaagd; de kosten van deze maatregelen bedragen 153 miljoen gulden.

De procesemissies veranderen niet t.o.v. de basisvariant omdat bestrijdingsmaatregelen niet zijn verondersteld.

Volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding (variant II.3)

De in deze variant opgenomen bestrijdingstechnieken, zoals selectieve katalytische reductie worden pas na 1990 toepasbaar geacht.

In 2000 dalen de totale emissies ten opzichte van de voorgaande variant van 462000 ton tot 250000 ton (45% reductie). De daling doet zich in alle sectoren voor, maar de grootste bijdrage wordt geleverd door de verkeerssector waar toepassing van de drieweg-katalysator is verondersteld. De totale milieulasten bedragen bijna 2.5 miljard gulden, waarvan ca. 70% toegerekend kan worden aan de verkeerssector.

Bij de openbare elektriciteitsvoorziening dalen de emissies met ca. 80% ten opzichte van variant II.2 door toepassing van SKR bij gas-en kolengestookte eenheden, waterinjectie bij gasturbines en stoominjectie bij STEG-eenheden. Deze maatregelen kosten samen 306 miljoen gulden.

Bij de stadsverwarming worden de emissies met ca. 90% verminderd door toepassing van SKR bij conventionele ketels en stoominjectie bij STEG-eenheden. Dit kost 21 miljoen gulden. De emissies bij wijkverwarming worden nagenoeg geheel veroorzaakt door warmtepompen; bij bestrijding à raison van 18 miljoen gulden resteert nog slechts 4000 ton.

Bij de industriële warmte/kracht-opwekking kunnen de emissies t.o.v. variant II.2 met ca. 80% worden teruggebracht door toepassing van SKR en van stoominjectie bij gasturbines. De kosten van deze maatregelen bedragen 74 miljoen gulden. Toepassing van SKR in de raffinaderijsector geeft een emissiereductie van ca. 75% t.o.v. variant II.2. Deze maatregel, zowel voor nieuwe als voor bestaande installaties, kost 55 miljoen.

In de basisindustrie leidt toepassing van SKR tot een resterende emissie van 5000 ton. Deze maatregel kost bijna 100 miljoen gulden. In de overige industrie wordt geen verdere emissiebeperking mogelijk geacht. Bij de overige gebruikers dalen de emissies t.o.v. variant II.2 met ca. 65% door bestrijding van de uitworp van warmtepompen. De kosten daarvan bedragen 53 miljoen gulden.

Bij de gezinshuishoudingen kunnen door introductie van lage NO<sub>x</sub>-CV-ketels (100% penetratie in 2000) de emissies gehalveerd worden; dit kost 50 miljoen.

In de verkeerssector wordt in deze variant in 2000 een volledige penetratie van de drieweg-katalysator voor personenauto's op benzine en LPG verondersteld. Ten opzicht van de basisvariant daalt daardoor de emissie met 35%; de extra emissieafname t.o.v. variant II.2 bedraagt 15%. De kosten van de drieweg-katalysator zijn hoog: 1755 miljoen gulden.

Tenslotte worden de procesemissies tot ongeveer de helft verlaagd door toepassing van SKR; dit kost 57 miljoen gulden.

### NH<sub>3</sub>-basisvariant (variant III.1)

Bij ongewijzigde voortzetting van het huidige milieubeleid worden aan de ammoniakuitwerp geen beperkingen opgelegd. Op basis van de in paragraaf 5 vermelde gegevens zijn projecties opgesteld (zie tabel 5.13). Ten gevolge van de veronderstelde ontwikkeling in de rundveehouderij, intensieve veehouderij en chemische industrie neemt de totale uitwerp toe van 120000 ton in 1980 tot 141000 ton in 1990 en 163000 ton in 2000. De grootste ammoniakemissie treedt op bij de mestproduktie in de wei en bij de verspreiding van mest op bouw- en grasland.

De emissie bij mestproduktie in de wei stijgt van 33000 ton in 1980 via 40000 ton in 1990 tot 48000 ton in 2000.

Bij de mestproduktie in de stal is er sprake van een toename van 23000 ton in 1980 tot 28000 ton in 1990 en 32000 ton in 2000. Deze uitwerp wordt voor ca. 60% veroorzaakt door rundvee.

Bij verspreiding van mest op bouwland is sprake van een geringe stijging van de uitwerp, vooral na 1990 (21000 ton in 1980; 28000 à 29000 ton in 1990 en 2000).

Bij verspreiding op grasland stijgt de emissie in 1990 nauwelijks (4% t.o.v. 1980); in 2000 is evenwel sprake van een forse toename (ca. 25% t.o.v. 1980).

De emissie bij kunstmestgebruik is constant verondersteld.

Tenslotte is bij de procesemissie sprake van een toename van 8000 ton in 1980 via 10000 ton in 1990 tot 13000 ton in 2000.

### Eenvoudige NH<sub>3</sub>-bestrijding (variant III.2)

De te bereiken emissiereductie en daarmee gepaard gaande kosten voor ammoniakbestrijding zijn buiten het SELPE-model berekend, uitgaande van de gegevens in tabel 5.13 en 5.14. De volgende betrekkingen zijn gebruikt:

$$RE_{ij} = OE_i * r_{ij} \quad (8)$$

$$K_{ij} = C_{ij} * (RE_{ij} - OE_i) \quad (9)$$

Hierin is:

$RE_{ij}$  = restemissie bij toepassing van bestrijdingsmaatregel j op emissieproces i  
(ton  $NH_3$ /jaar)

$OE_i$  = onbestreden emissie van proces i (ton  $NH_3$ /jaar)

$K_{ij}$  = kosten van bestrijdingsmaatregel j bij toepassing op proces i (gulden)

$r_{ij}$  = emissiereductie bij toepassing van bestrijdingsmaatregel j op proces i  
(%)

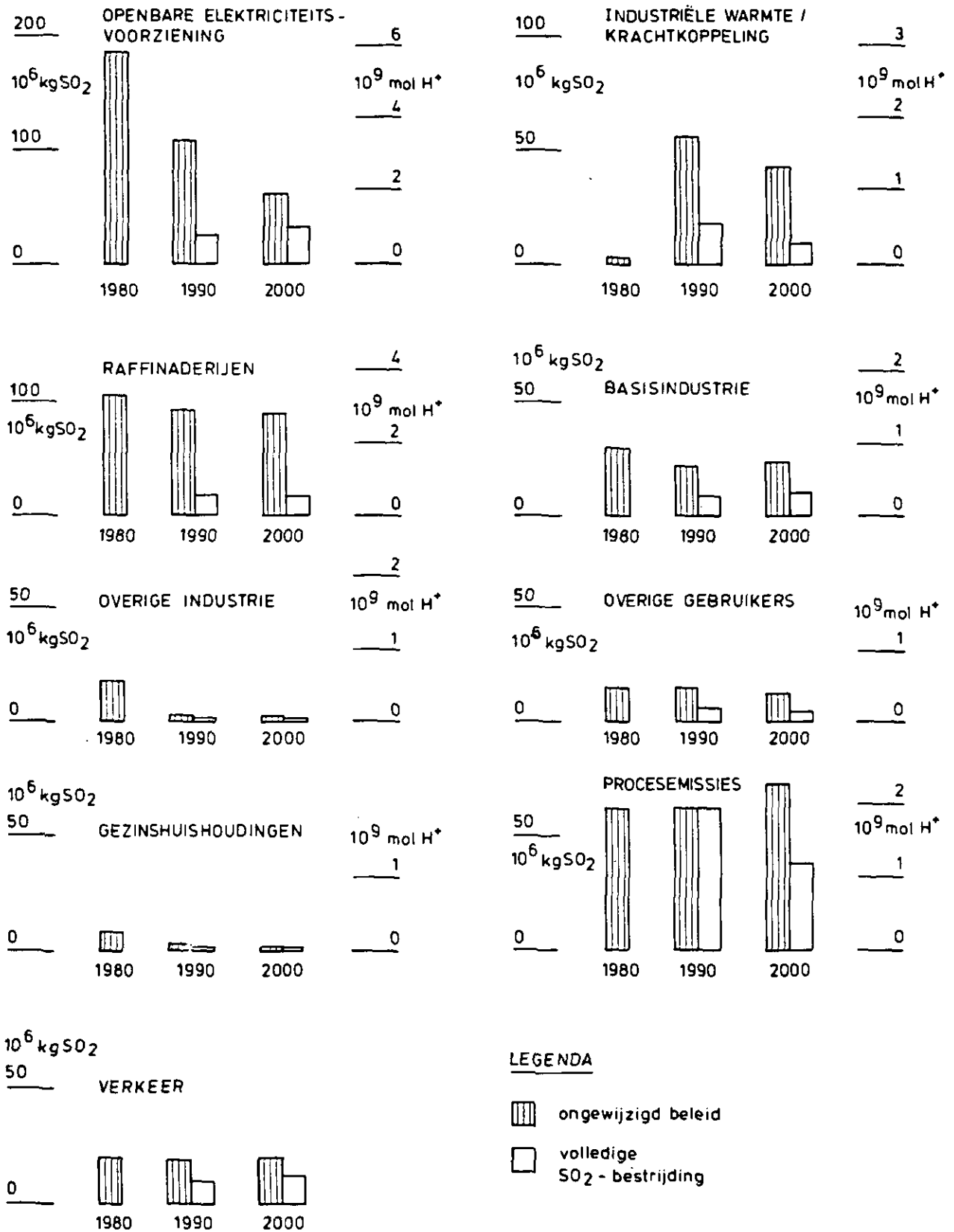
$C_{ij}$  = kostencoëfficiënt bestrijdingsmaatregel j bij toepassing op proces i  
(gulden/ton  $NH_3$ -reductie) = kosten-effectiviteit.

Door toepassing van de in paragraaf 6.1 opgesomde bestrijdingsmaatregelen wordt totale ammoniakemissie met ongeveer 50% teruggebracht. De kosten van deze maatregelen bedragen respectievelijk 549 miljoen gulden in 1990 en 588 miljoen gulden in 2000. De emissie vanuit de stal wordt bestreden door toepassing van grondfilters voor mest van rundvee, mestvarkens en fokzeugen. De bestrijdingskosten zijn in 1990 456 miljoen gulden en in 2000 475 miljoen gulden.

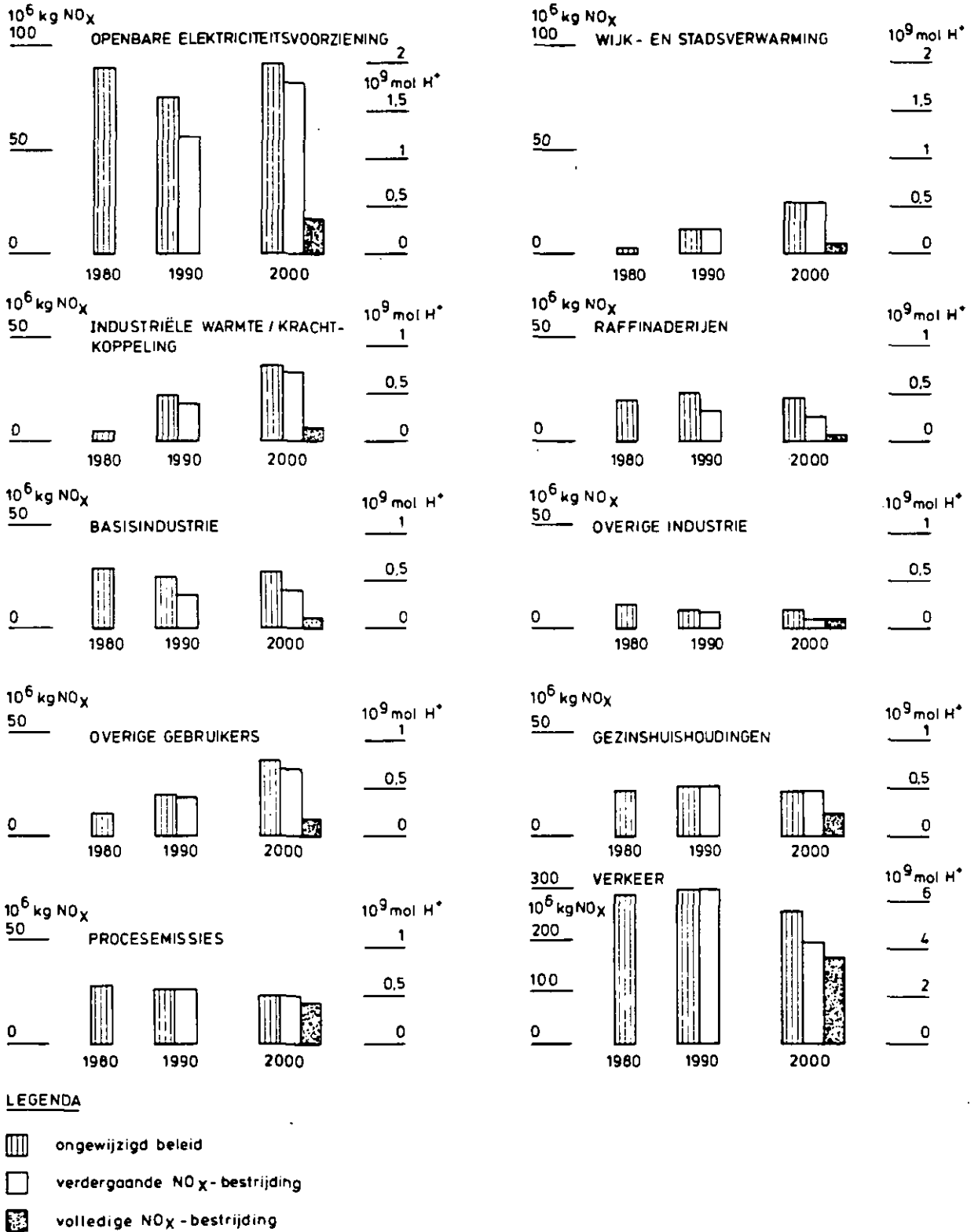
Bij verspreiding van mest op grasland wordt mestinjectie toegepast, waardoor de emissies met 90% gereduceerd worden. De kosten daarvan komen uit op 72 miljoen gulden in 1990 en 90 miljoen gulden in 2000. Bij bouwland wordt de mest vlak boven de grond verspreid en direct ondergeploegd. Daardoor neemt de uitworp met 70% af, wat 14 miljoen gulden kost.

Industriële ammoniakuitworp kan door toepassing van absorptie- en strippingtechnieken met 50% worden gereduceerd. Dit kost 7 à 9 miljoen gulden per jaar.

Tenslotte zijn ten aanzien van de mestproductie in de wei en het kunstmestgebruik en bestrijdingmaatregelen voorzien.

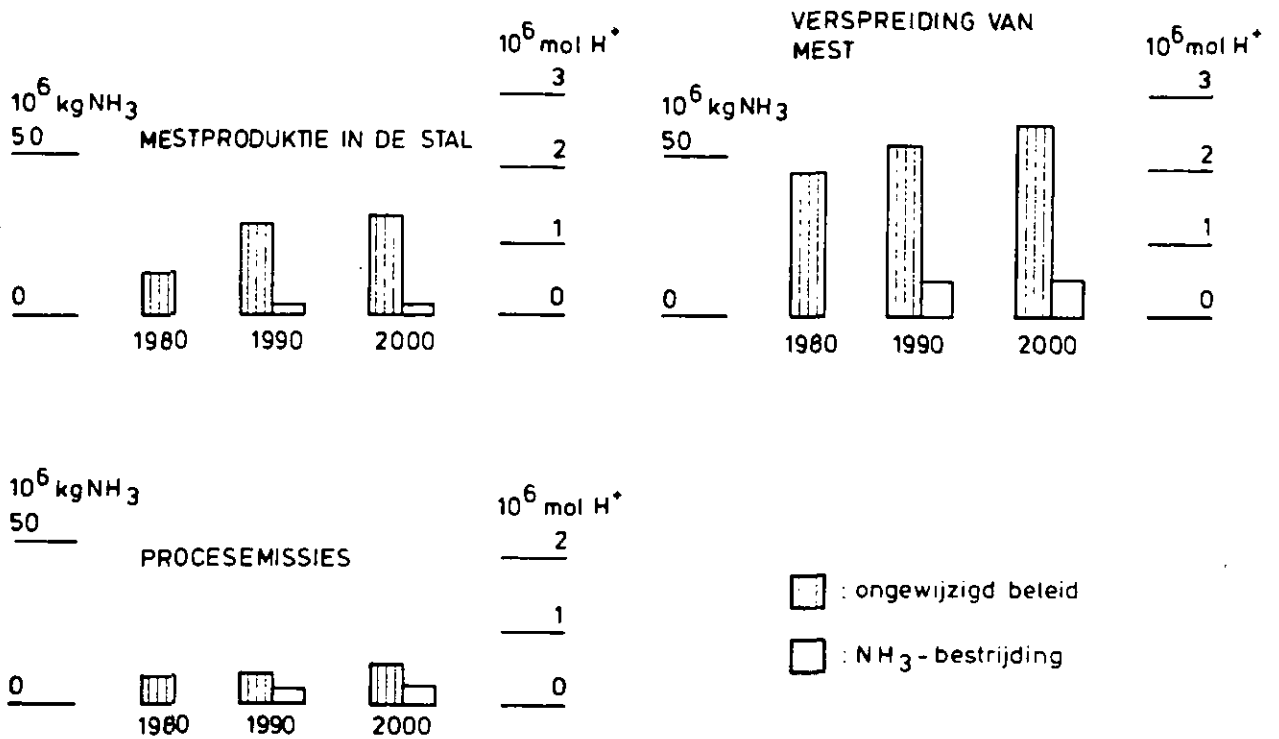


Figuur 6.1 Projectie van de SO<sub>2</sub>-emissies per sector  
Bron: ESC



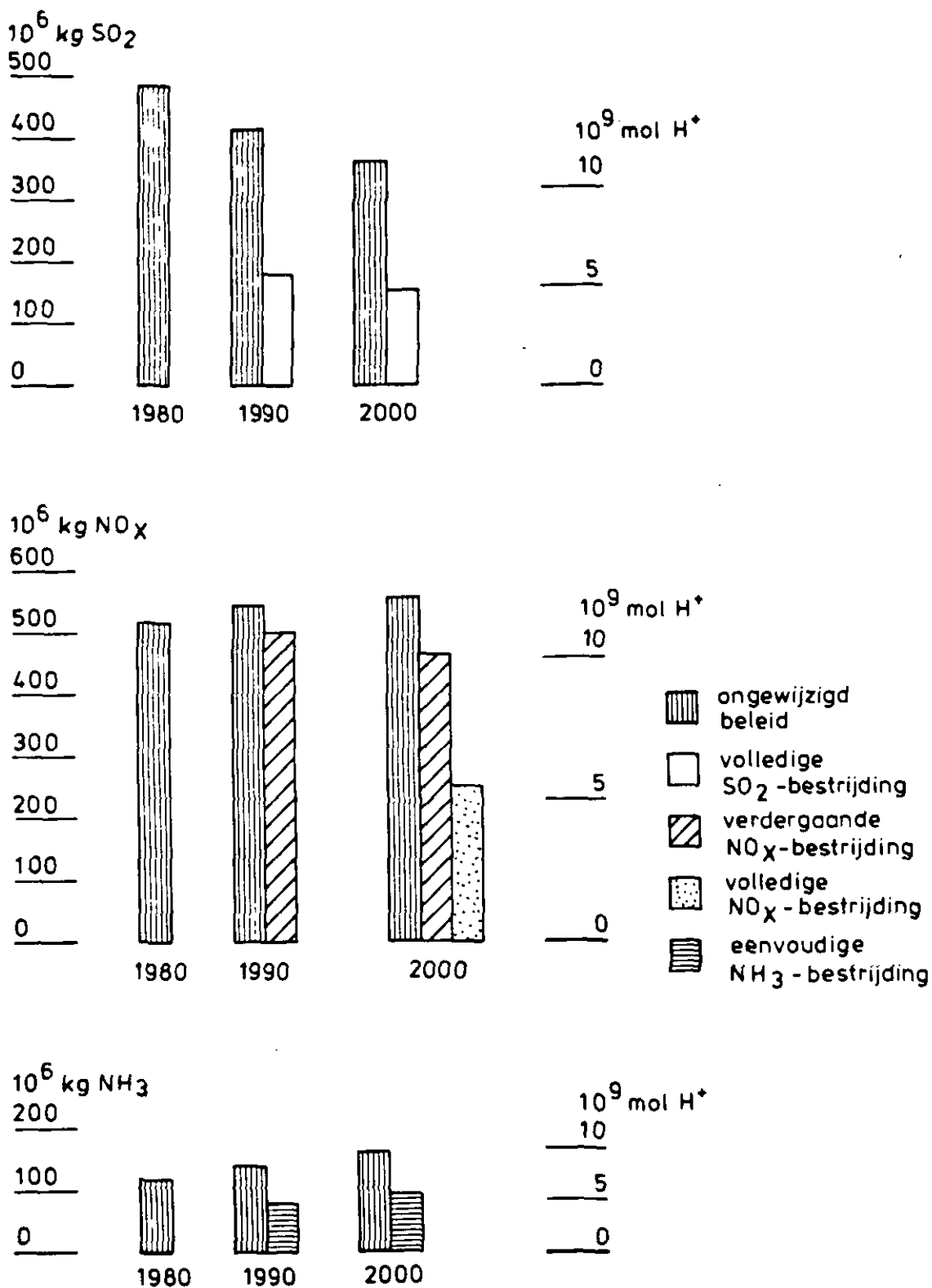
Figuur 6.2 Projectie van de NO<sub>x</sub> - emissies per sector

Bron: ESC



Figuur 6.3 Projectie van de  $\text{NH}_3$ - emissies per sector

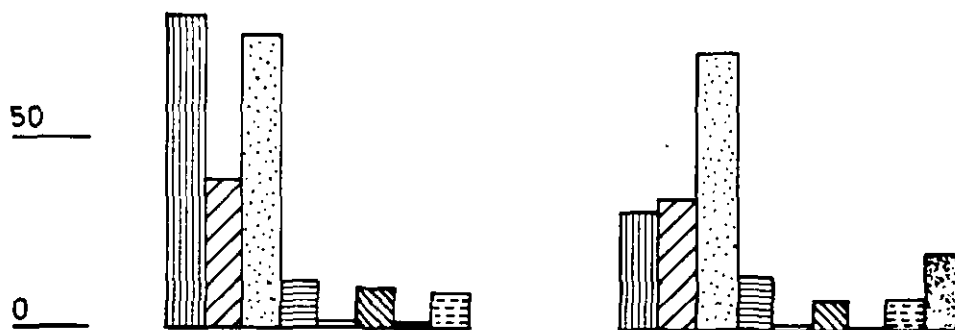
Bron: RIVM



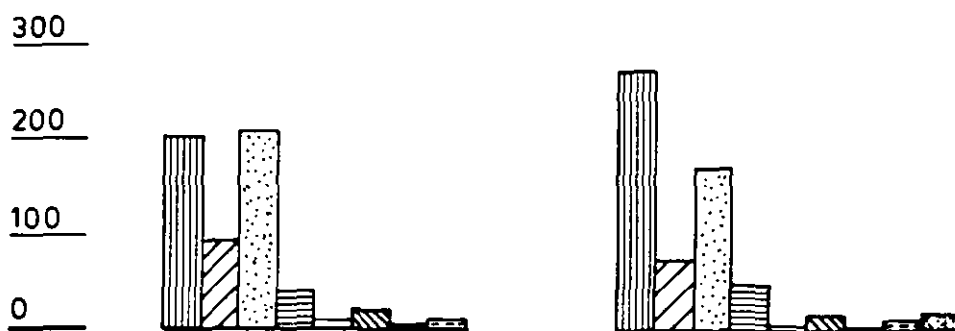
Figuur 6.4 Projectie van de totale emissie van SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub>









vermeden  
emissie ( $10^6$  kg SO<sub>2</sub> / jaar)  
100



kosten ( $10^6$  gulden / jaar)  
400



1990 VOLLEDIGE SO<sub>2</sub>-BESTRIJDING      2000 VOLLEDIGE SO<sub>2</sub>-BESTRIJDING

- |   |  |   |                     |
|---|--|---|---------------------|
|  | openbare elektriciteit -<br>voorziening    |  | overige gebruikers  |
|  | industriële warmte / kracht -<br>opwekking |  | gezinshuishoudingen |
|  | raffinaderijen                             |  | verkeer             |
|  | basisindustrie                             |  | procesemissies      |
|  | overige industrie                          |   |                     |

Figuur 6.5 Emissiereductie en kosten SO<sub>2</sub>-bestrijding per sector  
Bron: ESC

vermeden  
emissie ( $10^6$  kg NO<sub>x</sub>/ jaar)  
100

50

0

kosten ( $10^6$  gulden/ jaar)  
300

200












100

0

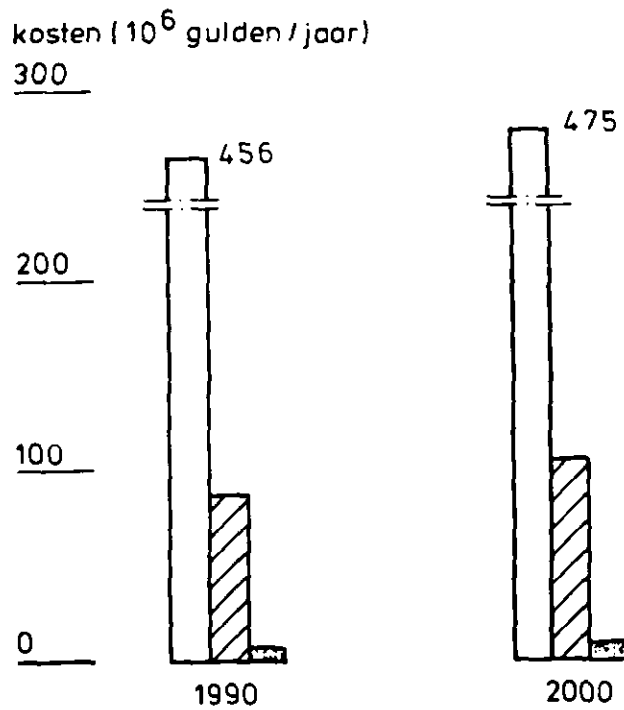
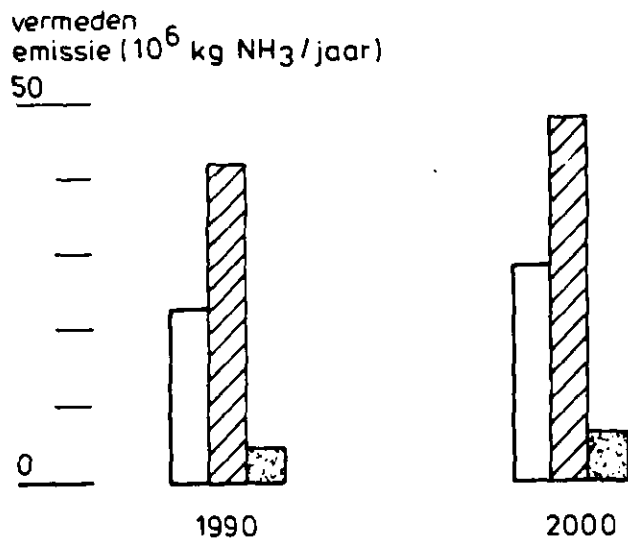
1990  
VERDERGAANDE  
NO<sub>x</sub> -BESTRIJDING

2000  
VERDERGAANDE  
NO<sub>x</sub> -BESTRIJDING

2000  
VOLLEDIGE  
NO<sub>x</sub> -BESTRIJDING

- |   |                                       |   |                     |
|---|---------------------------------------|---|---------------------|
|  | openbare elektriciteit-voorziening    |  | overige industrie   |
|  | openbare warmte / kracht-koppeling    |  | overige gebruikers  |
|  | wijkverwarming                        |  | gezinshuishoudingen |
|  | industriële warmte / kracht-opwekking |  | verkeer             |
|  | raffinaderijen                        |  | procesemissies      |
|  | basisindustrie                        |   |                     |

Figuur 6.6 Emissiereductie en kosten NO<sub>x</sub>-bestrijding per sector  
Bron: ESC



- productie van mest in de stal
- verspreiding van mest
- procesemissies

Figuur 6.7 Emissiereductie en kosten  $\text{NH}_3$ -bestrijding per sector  
Bron: RIVM

6.2.2. Combinatie van berekeningsvarianten

Uitgaande van de 7 berekeningsvarianten voor de verzurende stoffen afzonderlijk kunnen combinaties samengesteld worden waarbij sprake is van een gezamenlijke bestrijding van de uitworp. In onderstaande tabel 6.1 zijn deze combinaties, bestrijdingsalternatieven genaamd, vermeld.

Tabel 6.1. Overzicht van bestrijdingsalternatieven.

Berekeningsvariant	SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>			NH <sub>3</sub>	
	I.1. basis	I.2. voll.bestr.	II.1 basis	II.2 verderg.bestr.	II.3 vol.bestr.	III.1 basis	III.2 eenv.bestr.
1. Ongewijzigd beleid	x		x			x	
2. alleen SO <sub>2</sub> -bestrijding		x	x			x	
3. alleen verderg. NO <sub>x</sub> -bestr.	x			x		x	
4. alleen voll. NO <sub>x</sub> -bestr.	x				x	x	
5. alleen NH <sub>3</sub> -bestr.	x		x				x
6. voll. SO <sub>2</sub> + verderg. NO <sub>x</sub> -bestr.		x		x		x	
7. voll. SO <sub>2</sub> + voll. NO <sub>x</sub> -bestr.		x			x	x	
8. voll. SO <sub>2</sub> + NH <sub>3</sub> -bestr.		x	x				x
9. verderg. NO <sub>x</sub> + NH <sub>3</sub> -bestr.	x			x			x
10. voll. NO <sub>x</sub> + NH <sub>3</sub> -bestr.	x				x		x
11. voll. SO <sub>2</sub> + verderg. NO <sub>x</sub> + NH <sub>3</sub> -bestr.		x		x			x
12. voll. SO <sub>2</sub> + voll. NO <sub>x</sub> + NH <sub>3</sub> -bestr.		x	x		x		x

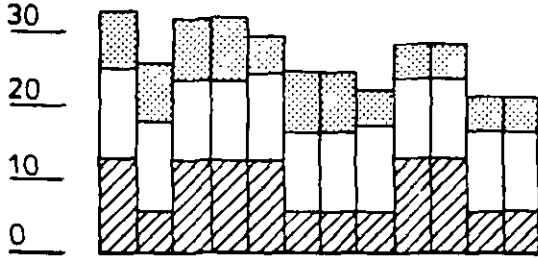
Met behulp van de gegevens in de voorgaande paragraaf nu voor elk alternatief resterende emissies, de bestreden emissies en de kosten bepaald worden.

In figuur 6.8 is daarvan een overzicht gegeven voor 1990 en 2000. Emissies zijn steeds uitgedrukt in miljarden molen potentieel zuur teneinde de stoffen onderling te kunnen vergelijken. De kosten zijn uitgedrukt in miljarden gulden per jaar (prijspeil 1980).

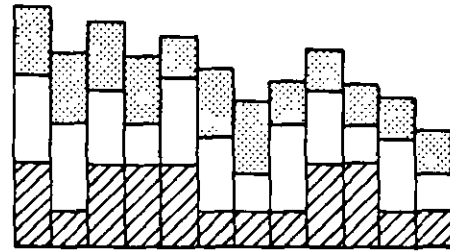
Uit deze figuren blijkt het volgende.

In 1990 kan, zelfs met de meest vergaande bestrijdingsmaatregelen (alternatief 12), de uitworp niet verder verlaagd worden dan ca.  $21 \cdot 10^9$  mol H<sup>+</sup>. Dit kost dan ca. 1.2 miljard gulden. In 2000 is een verdere verlaging mogelijk tot ca.  $15 \cdot 10^9$  mol H<sup>+</sup>; de bestrijdingsmaatregelen kosten in dat jaar 3.7 miljard gulden.

restemissie  
( $10^9$  mol  $H^+$ /jaar)

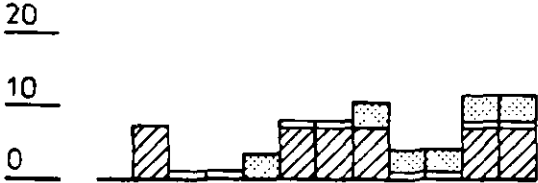


1990



2000

vermeden emissie  
( $10^9$  mol  $H^+$ /jaar)

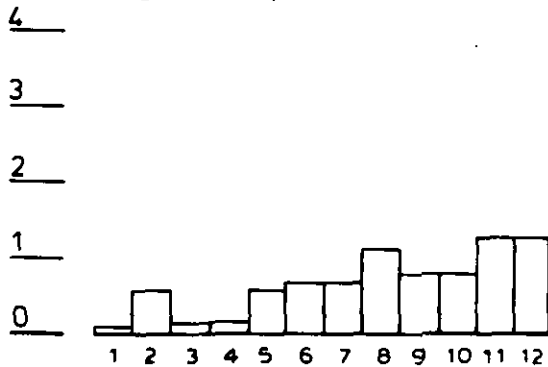


1990

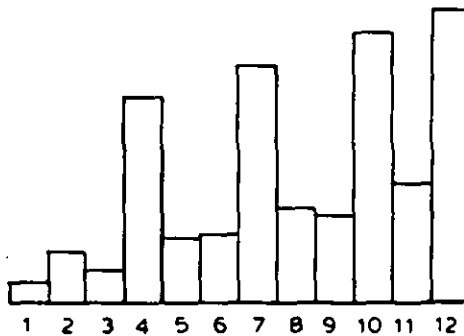


2000

kosten  
(miljarden guldens /jaar)



1990



2000



Figuur 6.8 Resterende emissie, emissiereductie en emissiebestrijdingskosten voor de 12 onderscheiden bestrijdingsalternatieven (nummering: zie tekst).

SO<sub>2</sub>-bestrijding heeft relatief het grootste effect op de uitworpsverlaging, namelijk ca. 50% van de totaal realiseerbare verlaging. De kosten bedragen 500 à 600 miljoen gulden per jaar. Het is dan ook zinvol om bij een bestrijdingsalternatief in elk geval volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding op te nemen.

Bestrijding van NO<sub>x</sub> of NH<sub>3</sub> afzonderlijk heeft slechts een gering effect op de emissies. In combinatie is alleen sprake van een behoorlijke reductie als volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding wordt toegepast; dit is echter een zeer duur alternatief (bijna 2.8 miljard gulden per jaar). Als dit alternatief uit kostenoverwegingen wordt uitgesloten is een combinatie van SO<sub>2</sub>- en NH<sub>3</sub>-bestrijding te verkiezen (alternatief 8). Toevoeging van verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding heeft slechts een gering extra effect op de emissies.

### 6.2.3. Emissie-effecten en kosten van afzonderlijke bestrijdingsmaatregelen

In paragraaf 6.2.1. is bij de presentatie van emissie-effecten en kosten van bestrijdingsmaatregelen het accent gelegd op de onderscheiden emissiebronnen (sectoren). In de onderhavige paragraaf wordt de invalshoek vanuit de maatregelen zelf gekozen. In tabel 6.2. t/m 6.4. zijn de emissiereductie en kosten van de bestrijdingsmaatregelen weergegeven, uitgesplitst per sector en waar relevant per installatietype. Tevens zijn de zogenaamde specifieke bestrijdingskosten (in gulden per ton uitworpreductie) vermeld. In het volgende worden deze tabellen nader toegelicht.

#### SO<sub>2</sub>-bestrijding

Door toepassing van rookgasontzwaveling kan de totale SO<sub>2</sub>-uitworp in 1990 met 153000 ton worden gereduceerd (ca. 65% van de totale reductie) en in 2000 met 132000 ton (ca. 65%). De totale kosten van rookgasontzwaveling bedragen in 1990 316 miljoen gulden en in 2000 259 miljoen gulden. Toepassing van deze bestrijdingsmaatregel is relatief goedkoop in de openbare elektriciteitsvoorziening en de industriële warmte/kracht-opwekking (f 850,- tot f 1.300,- per ton bestreden SO<sub>2</sub>) en relatief duur in de industrie en bij de overige gebruikers (meer dan f. 3.500,- per ton bestreden SO<sub>2</sub>). Dit kostenverschil kan goeddeels verklaard worden uit de verschillen in installatiegrootte.

Door ontzwaveling van zware stookolie kan de emissie in 1990 met 64000 ton worden teruggebracht (ca. 25% van de totale reductie) en in 2000 met 28000 ton. Dit kost

in 1990 177 miljoen gulden en in 2000 77 miljoen gulden. Voor stookolie-ontzwaveling is met een vaste prijs gerekend (ca. 2.800,- per ton bestreden SO<sub>2</sub>).

Ontzwaveling van lichte stookolie levert een emissiereductie op van ca. 15000 ton, wat bijna 20 miljoen gulden per jaar kost. Ook hier is met een vaste prijs gerekend (f 1.290,- per ton bestreden SO<sub>2</sub>).

In 2000 kunnen de procesemissies van raffinaderijen en de chemische industrie met 22000 ton verlaagd worden bij 31.5 miljoen gulden aan bestrijdingskosten. Deze bestrijdingsmaatregelen zijn relatief goedkoop (ca. f 1.000,- per ton bestreden SO<sub>2</sub>).

#### NO<sub>x</sub>-bestrijding

Door toepassing van lage NO<sub>x</sub>-branders kan de totale uitworp in 1990 met ca. 42000 ton worden verlaagd, wat vrijwel overeenkomt met de totale reductie. In 2000 bedraagt de uitworpreductie 60000 ton. De kosten bedragen in 1990 60 miljoen gulden en in 2000 65 miljoen. De maatregel is relatief goedkoop voor grote installaties (f. 200,- à f. 1.200,- per ton bestreden NO<sub>x</sub>), maar relatief duur voor kleine installaties (meer dan f. 4.000,- per ton).

De volgende maatregelen worden alleen na 1990 toepasbaar geacht.

Door combinatie van lage NO<sub>x</sub>-branders met selectieve katalytische reductie kan de emissie in 2000 gereduceerd worden met 77000 ton (25% van de totale reductie) en dat kost 277 miljoen gulden. Deze bestrijdingsmaatregel komt voor grote installaties uit op f 2.000,- à f 3.000,- per ton bestreden NO<sub>x</sub> en voor kleine installaties op f 4.000,- à f 5.000,- per ton.

Selectieve katalytische reductie op zich leidt tot een emissievermindering van 59000 ton (20% van het totaal), die grotendeels bij nieuwe kolencentrales wordt gerealiseerd en voor het overige bij de chemische industrie. De kosten bedragen 277 miljoen gulden. De kosten per ton hangen sterk af van het proces waarop de maatregel wordt toegepast.

Emissie van gasturbines en STEG-eenheden worden bestreden door water- en stoominjectie. Daarmee kan de uitworp met 30000 ton worden verminderd; dit kost 58 miljoen gulden. Water- en stoominjectie kost f 1.500,- à f 2.500,- per ton bestreden NO<sub>x</sub> ten gevolge van de stijging van het brandstofverbruik.

Katalytische reductie om de emissies van warmtepompen te verminderen kan de uitworp met 35000 ton terugbrengen tegen bestrijdingskosten van 58 miljoen gulden. Dit komt neer op bijna f 1.700,- per ton bestreden  $\text{NO}_x$ . Door verbrandingsmodificaties aan benzine-, LPG- en dieselmotoren wordt de reductie met 59000 ton verminderd. De kosten hiervan bedragen 153 miljoen gulden. Verbrandingsmodificatie aan dieselmotoren is relatief goedkoop (ca. f 600,- per ton bestreden  $\text{NO}_x$ ), maar emissie-afstelling van benzine- en LPG-motoren relatief duur (f 4.500,- tot f 5.000,- per ton). Tenslotte levert de driewegkatalysator in personenauto's op benzine en LPG een emissiereductie van 57000 ton op. Dit kost 1755 miljoen gulden. Per ton bestreden  $\text{NO}_x$  lopen de kosten uiteen van f 24.500,- (LPG-motoren) tot f 32.500,- (benzine-motoren).

### $\text{NH}_3$ -bestrijding

Door installatie van grondfilters kan de totale uitworp in 1990 met 22000 ton en in 2000 met 27000 ton worden verminderd. Dit kost in 1990 456 miljoen gulden en in 2000 475 miljoen gulden. Per bestreden ton  $\text{NH}_3$  variëren de kosten tussen f. 10.000,- en f. 25.000,-, afhankelijk van de diersoort.

Mestinjectie op grasland en bouwland leidt tot een emissiereductie van 48000 ton in 1990 en 54000 ton in 2000. De kosten van deze maatregel bedragen 278 miljoen gulden in 1990 en 301 miljoen gulden in 2000. Dit komt neer op ca. f 5.800,- per ton bestreden  $\text{NH}_3$ .

Op bouwland is het vlak bovengronds verspreiden en direct onderploegen van de mest goedkoper (f. 700,- per ton bestreden  $\text{NH}_3$ ). De emissiereductie is evenwel iets geringer.

Door toepassing van absorptie- en strippingtechnieken in de chemische industrie kan ca. 5000 ton worden bestreden, hetgeen 7 à 9 miljoen gulden kost, oftewel f. 1.400,- per ton.



Tabel 6.2. Kosten en emissie-effecten van SO<sub>2</sub>-bestrijdingsmaatregelen

Bron: ESC

. <u>Maatregel</u> sector/installatietype	1990			2000		
	kosten (10 <sup>6</sup> gul- den)	emissie- reductie (10 <sup>3</sup> ton)	specifieke kosten (gld/ton)	kosten (10 <sup>6</sup> gul- den)	emissie- reductie (10 <sup>3</sup> ton)	specifieke kosten (gld/ton)
. <u>Rookgasontzwaveling</u>						
Openbare elektr.opw./ kolencentrales	72.7	61.6	1180	35.3	30.6	1155
Industriële w.k.k./nieuwe koleneenheden	12.0	9.1	1310	39.3	22.3	1260
Raffinaderijen	221.2	77.0	2870	183.0	72.8	2515
Basisindustrie/kolenketels	16.6	4.2	3915	26.6	5.2	3540
Overige industrie	7.0	1.1	6625	4.6	0.8	5985
. <u>Ontzwaveling zware stookolie</u>						
Openbare elektr.opw./olie- centrales	58.5	21.1	2770	geen toepassing		
Industriële w.k.k./oliege- stookte eenheden	82.5	29.7	2780	31.5	11.3	2780
Basisindustrie/oliege- stookte ketels	22.5	8.1	2780	22.5	8.1	2780
Overige gebruikers	13.5	4.9	2780	12.0	4.3	2780
Procesemissies/roetfabrieken	geen bestrijding			10.6	3.9	2730
. <u>Ontzwaveling lichte stookolie</u>						
Alle sectoren	19.6	15.2	1290	18.1	14.0	1290
. <u>Claus tail units</u>						
Procesemissies/raffinade- rijen	geen bestrijding			16.8	20.0	840
. <u>Uitwassen H<sub>2</sub>S</u>						
Procesemissies/chemische industrie	geen bestrijding			14.7	11.7	1250

Tabel 6.3. Kosten en emissie-effecten van NO<sub>x</sub>-bestrijdingsmaatregelen

Bron: ESC

Maatregel sector/installatietype	1990			2000		
	kosten (10 <sup>6</sup> gul- den)	emissie- reductie (10 <sup>3</sup> ton)	specifieke kosten (gld/ton)	kosten (10 <sup>6</sup> gul- den)	emissie- reductie (10 <sup>3</sup> ton)	specifieke kosten (gld/ton)
<b>Lage NO<sub>x</sub>-branders</b>						
<u>Openbare el.opw./</u>						
bestaande kolencentrales	1.5	7.3	210	0.8	3.8	220
Openbare el.opw./ombouw kolencentrales	0.9	2.6	325	0.9	3.5	240
Openbare el.opw./olie- en gaseenheden*	14.4	8.1	1735	2.7	1.1	2415
Industriële w.k.k./nieuwe koleneenheden	3.5	4.0	1095	2.5	2.9	835
Raffinaderijen**	7.4	7.9	935	14.1	9.3	1515
Basisindustrie/bestaande kolenketels	0.4	0.4	1095	geen toepassing		
Basisindustrie/stook- olieketels	1.0	0.9	1135	1.0	0.9	1135
Basisindustrie/(aard)gas- ketels	17.3	7.5	2300	15.6	7.9	1970
Overige industrie	4.9	1.3	3875	13.4	3.2	2150
Overige gebruikers/aard- gasketels	6.1	1.2	4950	13.6	27.1	4950
Overige gebruikers/stook- olieketels	2.2	0.4	5405	geen toepassing		
<b>Lage NO<sub>x</sub>-branders+Sel.kat.red.</b>						
<u>Openbare el.opw./</u>						
bestaande aardgaseenheden				6.8	2.5	2730
Openbare el.opw./ombouw kolencentrales				25.9	8.7	2985
Openbare el.opw./bestaan- de kolencentrales				33.0	11.0	3010
Industriële w.k.k./ koleneenheden				18.9	10.0	1895
Industriële w.k.k./olie- en gaseenheden				33.3	6.1	5485
Raffinaderijen				55.2	18.5	2975
Basisindustrie/kolenketels				9.9	3.1	4030
Basisindustrie/stook- olieketels				9.6	2.1	4550
Basisindustrie/(aard)gas- ketels				75.0	14.6	5140
<b>Lage NO<sub>x</sub>-CV-ketels</b>						
<u>Gezinshuishoudingen</u>				49.7	11.0	4535

\* in 2000 uitsluitend aardgaseenheden

\*\* in 2000 inclusief SKR voor petrocokesverbranding

Tabel 6.3. Kosten en emissie-effecten van NOx-bestrijdingsmaatregelen  
(vervolg)

• <u>Maatregel</u> sector/installatietype	2000		
	kosten (10 <sup>6</sup> gul- den)	emissie- reductie (10 <sup>3</sup> ton)	specifieke kosten (gld/ton)
• <u>Selectieve katalytische reductie</u>			
Procesemissies/kunstmestind. oud	1.1	0.6	2005
Procesemissies/kunstmestind. nieuw	39.4	4.9	8030
Procesemissies/petrochem. ind.	16.8	7.4	2265
Openbare el.opw./nieuwe kolencentr.	219.9	45.9	4780
• <u>Water- en stoominjectie</u>			
Openb.el.opw./gasturbines+STEG	15.9	6.2	2565
Openb.w.k.k./STEG-eenheden	20.4	9.3	2185
Industr.w.k.k./gasturbines	21.3	14.7	1445
• <u>Katalytische reductie</u>			
Openb. w.k.k./warmtepompen	18.0	10.7	1685
Overige gebruikers/warmtepompen	40.3	23.9	1685
• <u>Verbrandingsmodificaties</u>			
Verkeer/benzinemotoren	104.4	21.1	4940
Verkeer/LPG-motoren	29.7	6.8	4365
Verkeer/dieselmotoren	19.2	31.4	610
• <u>Diewegkatalysator</u>			
Verkeer/benzinemotoren	1413.2	43.4	32540
Verkeer/LPG-motoren	341.9	14.0	24460

Tabel 6.4. Kosten en emissie-effecten van NH<sub>3</sub>-bestrijdingsmaatregelen

Bron: RIVM

• <u>Maatregel</u> sector	1990			2000		
	kosten (10 <sup>6</sup> gul- den)	emissie- reductie (10 <sup>3</sup> ton)	specifieke kosten (gld/ton)	kosten (10 <sup>6</sup> gul- den)	emissie- reductie (10 <sup>3</sup> ton)	specifieke kosten (gld/ton)
• <u>Gesloten mestopslag</u>						
rundvee	798.6	14.6	54.700	684.3	17.5	39.100
mestvarkens	376.2	5.7	66.000	403.0	6.2	65.000
fokzeugen	124.9	3.2	58.600	108.5	3.6	45.200
• <u>Grondfilters</u>						
rundvee	159.1	14.6	10.900	169.8	17.5	9.700
mestvarkens	204.1	5.7	35.800	215.1	6.2	34.700
fokzeugen	92.5	3.2	28.900	90.4	3.6	25.100
• <u>Luchtwater</u>						
rundvee	191.3	14.6	13.100	201.3	17.5	11.500
mestvarkens	270.8	5.7	47.500	253.6	6.2	40.900
fokzeugen	112.3	3.2	35.100	106.2	3.6	29.500
• <u>Mestinjectie</u>						
grasland	71.7	22.4	3.200	89.9	28.1	3.200
bouwland	206.7	25.2	8.200	210.7	25.7	8.200
• <u>Vlak bovengronds verspreiden en direct onderploegen</u>						
bouwland	13.7	19.6	700	14.0	20.0	700
• <u>Absorptie + stripping</u>						
chemische industrie	6.7	4.8	1.400	9.0	6.4	1.400

#### 6.2.4. Optimale bestrijdingsmaatregelen

Om te bepalen welke bestrijdingsmaatregelen optimaal zijn, d.w.z. bij een gewenste emissiereductie minimale kosten opleveren, dienen de maatregelen naar opklimmende specifieke kosten geordend te worden. In figuur 6.9 t/m 6.12 is dat grafisch weergegeven. De bestrijdingskosten zijn cumulatief weergegeven als functie van de cumulatieve emissiereductie t.o.v. de betreffende basisvariant; de cumulatief resterende emissie is tussen haakjes vermeld. De hellingen van de lijnsegmenten geven de specifieke kosten van de betreffende maatregel aan; de getrokken lijn geeft steeds combinaties van optimale maatregelen van goedkoop tot duur (de optimale lijn). Iedere andere combinatie is niet optimaal en zal derhalve in het gebied boven de getrokken lijn liggen. Voorts is in de figuren de emissiestreefwaarde aangeduid (verticale streeplijn) alsmede de ligging van de bestrijdingsvarianten (open rondje).

#### SO<sub>2</sub>-bestrijding (figuur 6.9 en 6.10)

De in 1990 na te streven emissie van 350.000 ton kan met minimale kosten bereikt worden door toepassing van rookgasontzwaveling bij bestaande kolencentrales en het gedeeltelijk ontzwellen van lichte stookolie tot 0.15 gewichtsprocent zwavel. Dit kost in dat jaar 150 miljoen gulden.

In 2000 is de na te streven emissie ca. 150.000 ton. Uit figuur 6.10 kan worden afgelezen dat dit net niet gehaald kan worden; de minimaal te realiseren emissie bedraagt 156.000 ton. Voorts blijkt uit de figuren dat rookgasontzwaveling bij de zwaarindustrie en de overige industrie, alsmede ontzwellen van zware stookolie zowel hoge specifieke kosten als een relatief geringe emissiereductie hebben. Deze maatregelen komen daarom alleen in aanmerking om de "laatste emissieresten" weg te werken.

#### NO<sub>x</sub>-bestrijding (figuur 6.11 en 6.12)

In 1990 kan slechts 42.000 ton NO<sub>x</sub> bestreden worden, en wel door in alle sectoren lage-NO<sub>x</sub> branders toe te passen. Gezien de relatief geringe emissiereductie en relatief geringe kosten (62 miljoen gulden) is hieraan weinig te optimaliseren en derhalve is optimalisatie achterwege gelaten.

In 2000 zijn twee optimale strategieën onderscheiden. In het eerste geval is gekozen voor lage-NO<sub>x</sub> branders in alle sectoren en emissie-afstelling van armemengselmotoren in personenauto's op LPG en benzine (figuur 6.11). In het tweede geval worden overal waar dat mogelijk is lage-NO<sub>x</sub> branders + selectieve katalytische reductie toegepast en tevens in plaats van emissie-afstelling bij personenauto's toepassing van de driewegkatalysator (figuur 6.12). Immers beide categorieën maatregelen sluiten elkaar uit. De overige maatregelen zijn in beide figuren dezelfde. De emissiestreefwaarde van 350.000 ton kan bij beide strategieën gerealiseerd worden; de kosten bedragen circa 550 miljoen gulden (de kosten van het ongewijzigd beleid zijn 6 miljoen gulden). In de figuren kan afgelezen worden welke bestrijdingsmaatregelen dan getroffen dienen te worden.

Voorts blijkt dat de gekozen bestrijdingsvariant "verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding" niet optimaal is. Door een pakket maatregelen volgens de optimale lijn te kiezen kunnen de bestrijdingskosten van 224 miljoen gulden (zie paragraaf 6.1.2) met ongeveer 100 miljoen gulden verlaagd worden. Volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding ligt wel op de optimale lijn, maar als eindpunt van de lijn in figuur 6.12, zeer duur dus.

Tenslotte blijkt uit vergelijking van beide figuren dat de liggingen van de getrokken lijn tot een emissiereductie van ca. 230.000 ton (restemissie ca. 330.000 ton) weinig van elkaar afwijken. Dit betekent dat bestrijdingspakketten met en zonder extra toegevoegde katalytische reductie tot op zekere hoogte uitwisselbaar zijn. Ter illustratie hiervan dient de volgende tabel 6.5, waarbij uitgegaan van een emissiereductie van 150.000 ton (kosten ca. 270 miljoen gulden).

Tabel 6.5 Vergelijking van twee pakketten bestrijdingsmaatregelen die beide dezelfde optimale emissiereductie en kosten opleveren.

Sector/installatietype	pakket 1	pakket 2
Openbare elektr. voorz./kolencentrales	LBN	LBN + SKR
Openbare elektr. voorz./aardgascentrales	LBN	LBN + SKR
Openbare elektr. voorz./ gasturbines + STEG	Waterinjectie	Waterinjectie
Openbare w.k.k./STEG-eenheden	Stoominjectie	Stoominjectie
Openbare w.k.k./warmtepompen	KR	KR
Industriële w.k.k./ketels	LNB	LNB + SKR (kolen)
Industriële w.k.k./gasturbines	stoominjectie	stoominjectie
Raffinaderijen	LNB	LNB + SKR
Overige industrie/ketels	LNB	LNB
Overige gebruikers/warmtepompen	KR	KR
Verkeer/dieselmotoren	verbrandingsmod.	verbrandingsmod.
Verkeer/personenauto's op LPG	emissie-afstelling	-
Procesemissies/petrochemische ind.	SKR	SKR

### NH<sub>3</sub>-bestrijding (figuur 6.13)

De emissiestreefwaarde van 60.000 ton voor het jaar 2000 wordt niet bereikt. De minimaal te realiseren emissie bedraagt ca. 80.000 ton per jaar hetgeen 588 miljoen gulden kost. In figuur 6.13 kan afgelezen worden welke maatregelen getroffen moeten worden om dit emissieniveau te bereiken. Voor 1990 blijkt het verloop van de optimale lijn vrijwel overeen te komen met die voor 2000.

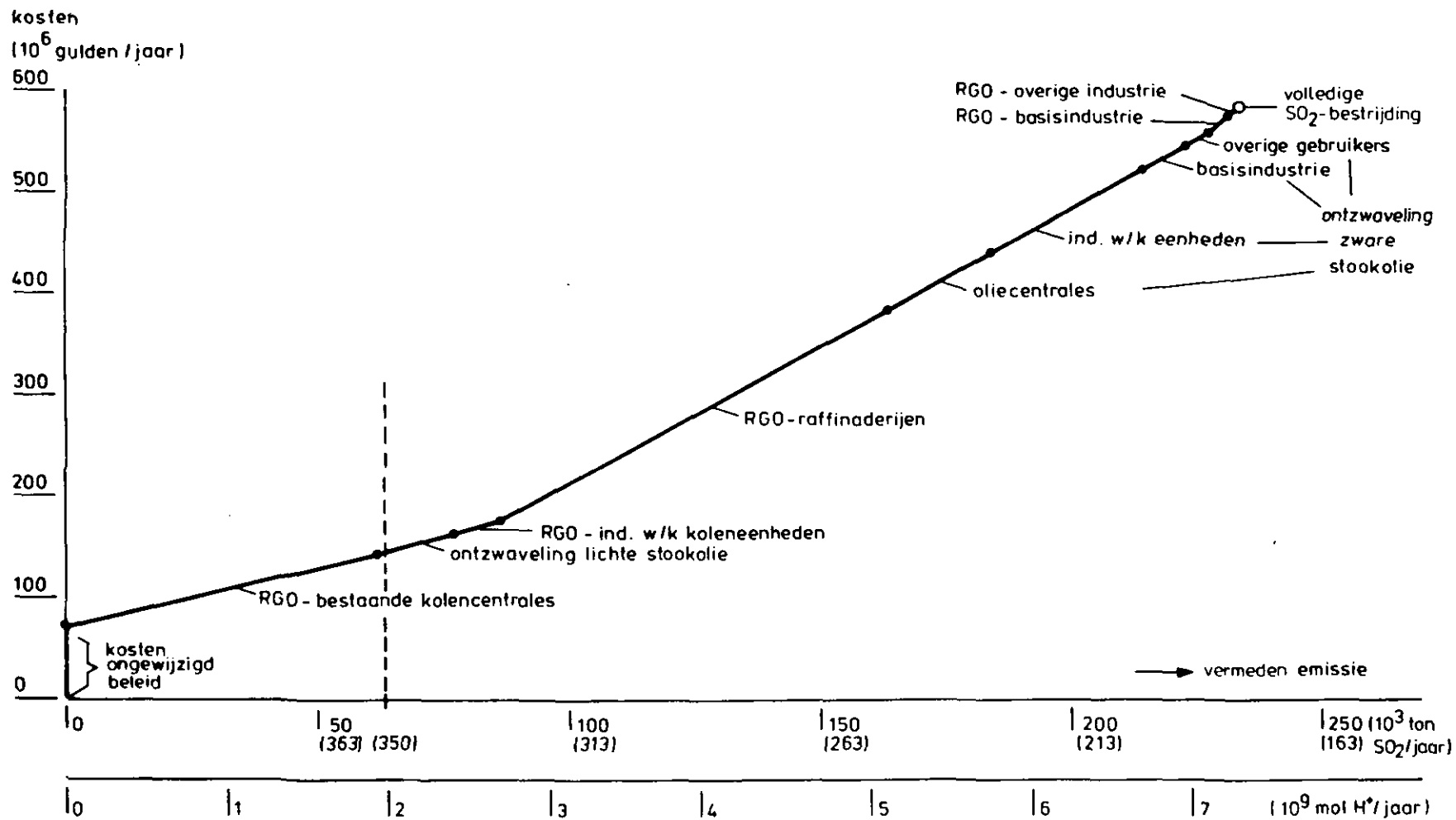
### Combinatie SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub>-bestrijding

In figuur 6.14 zijn de gegevens van de emissiereductie en kosten van bestrijdingsmaatregelen voor de drie verzurende stoffen gecombineerd voor het jaar 2000. Bij NO<sub>x</sub>-bestrijding is uitgegaan van de eerder genoemde strategie met lage NO<sub>x</sub>-branders en emissie-afstelling van arme-mengselmotoren in personenauto's op benzine en LPG.

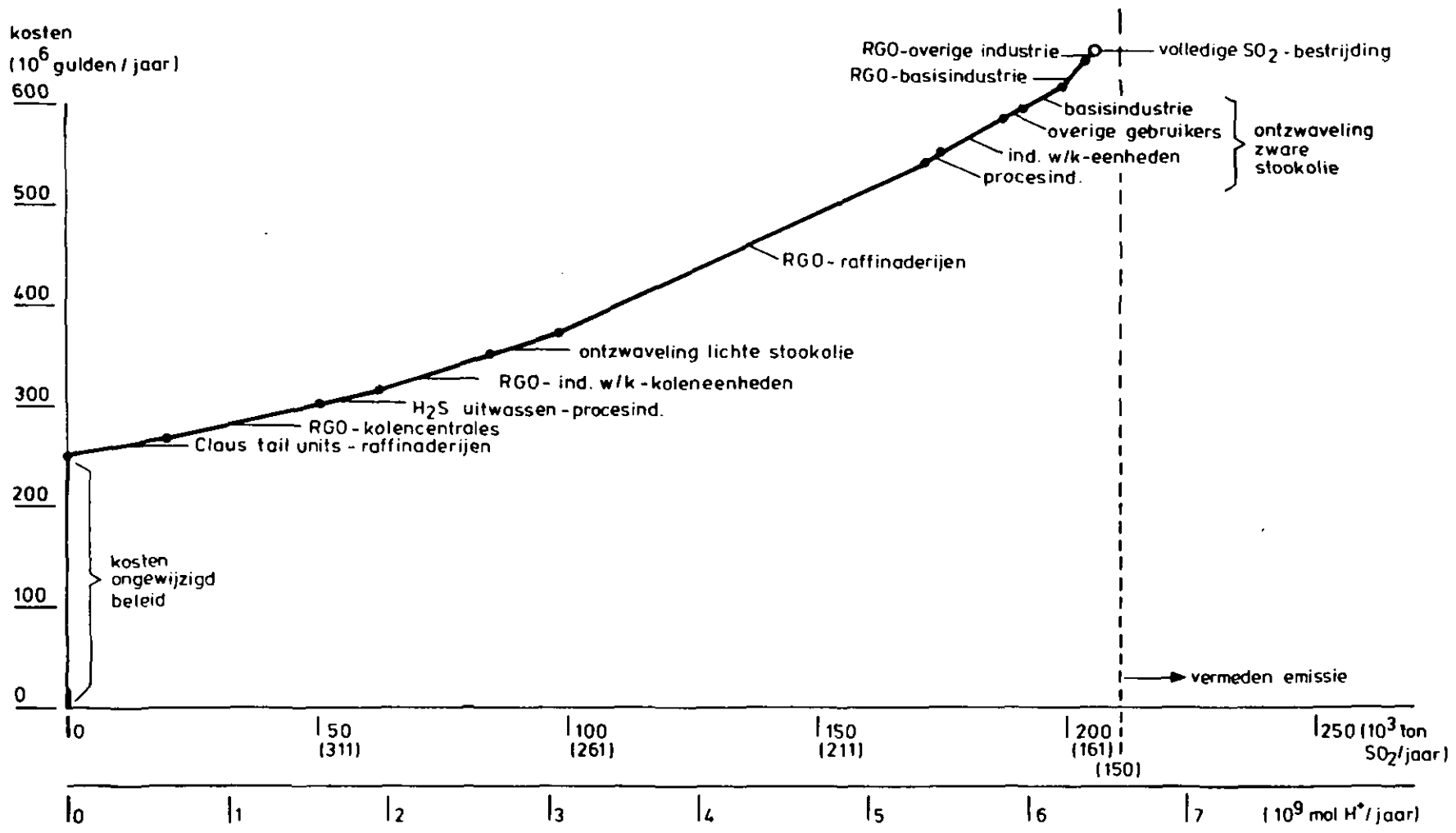
Uit de emissiestreefwaarden voor de afzonderlijke stoffen volgt een gezamenlijke streefwaarde van 15.8 miljard mol  $H^+$  (zie ook tabel 2.2). Ongewijzigde voortzetting van het huidige beleid zou leiden tot een totale uitworp van ca. 33 miljard mol  $H^+$ , zodat de na te streven reductie ca. 17 miljard mol  $H^+$  bedraagt. In figuur 6.14 is af te lezen dat deze waarde op bijna 1 miljard mol  $H^+$  na niet gehaald kan worden.

Over het algemeen blijkt  $SO_2$ -bestrijding kosten-effectiever te zijn dan  $NO_x$ - en  $NH_3$ -bestrijding.

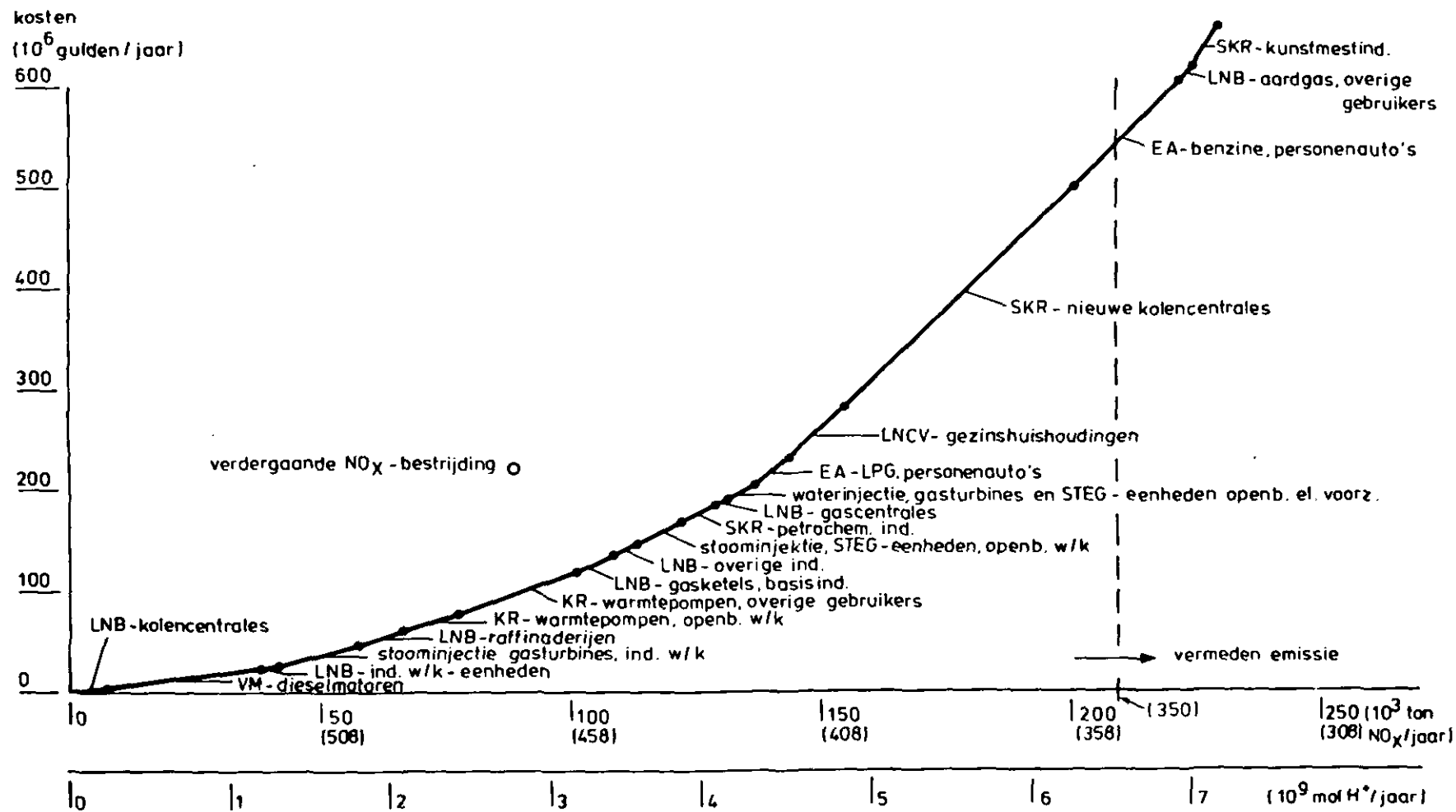




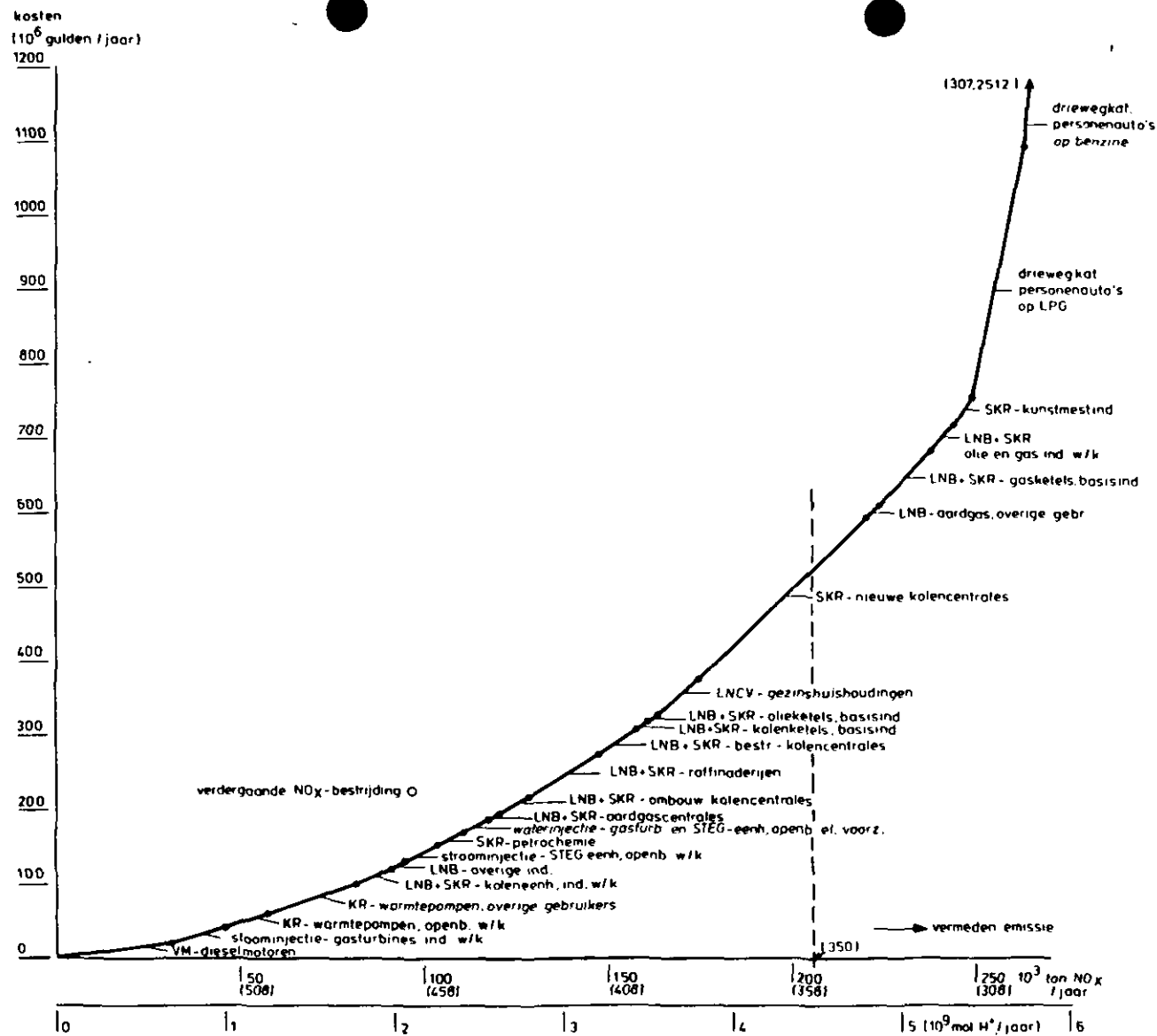
Figuur 6.9 Cumulatieve kosten als functie van de cumulatieve emissiereductie  $SO_2$ -bestrijding, 1990



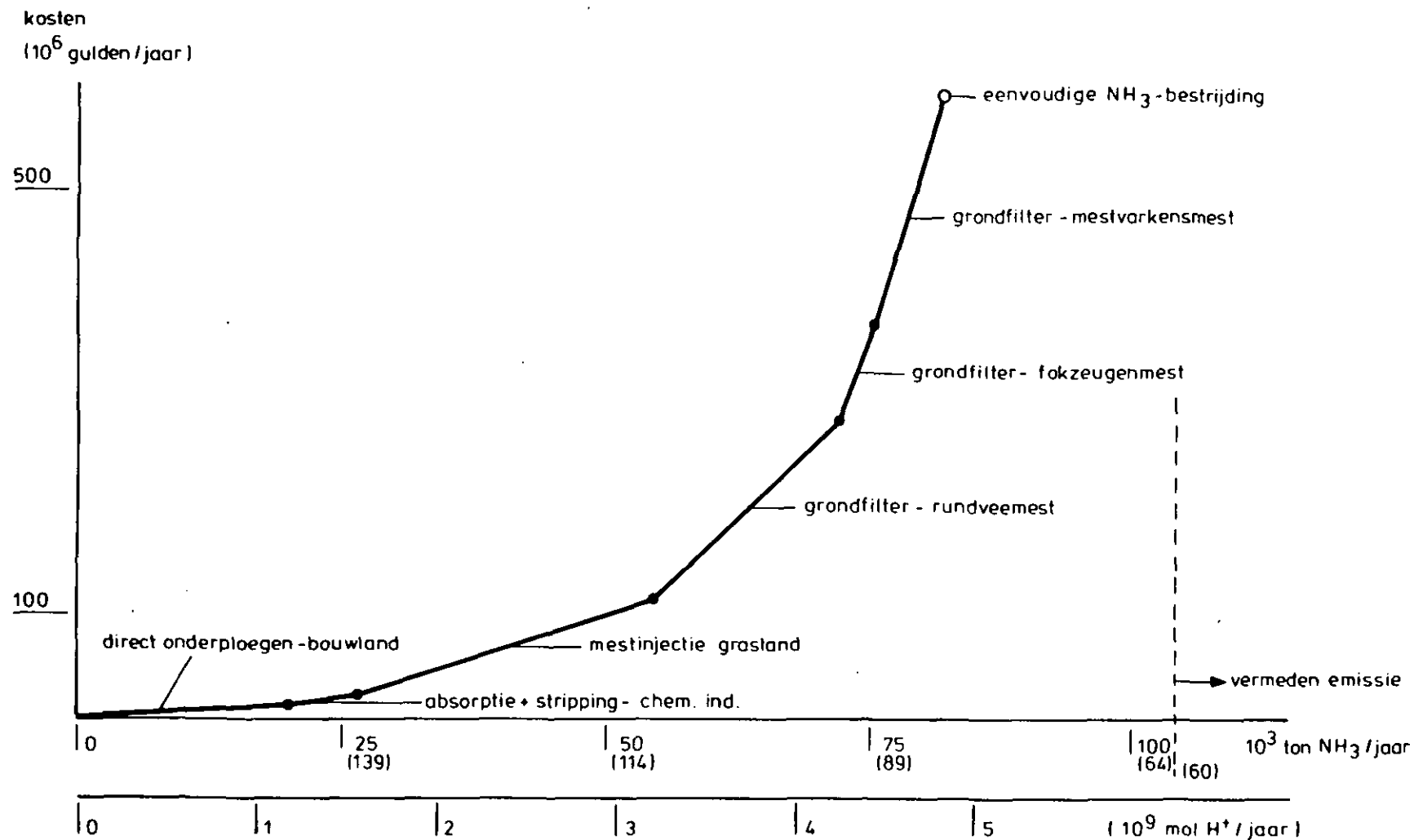
Figuur 6.10 Cumulatieve kosten als functie van de cumulatieve emissiereductie  $SO_2$ -bestrijding, 2000



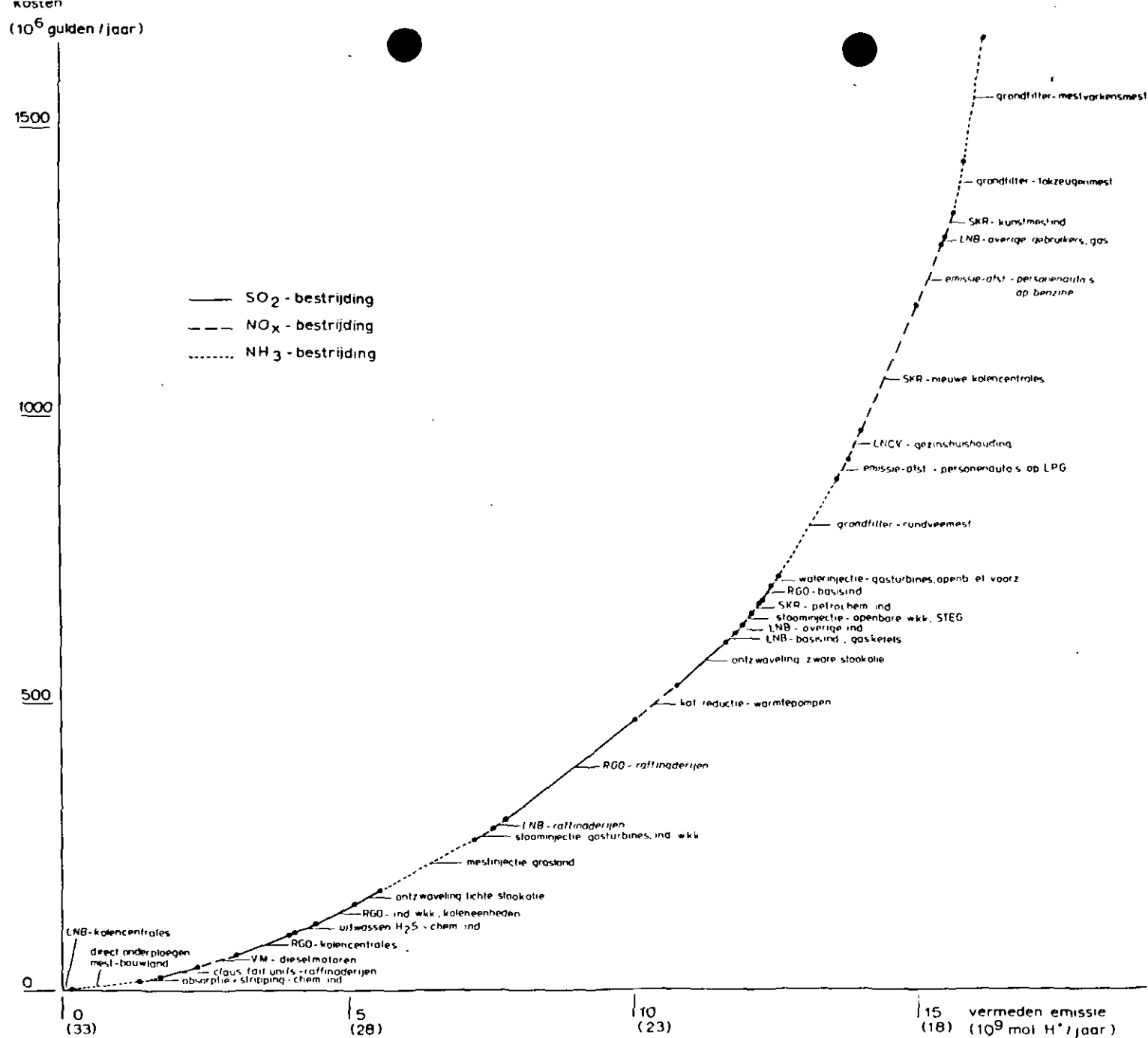
Figuur 6.11 Cumulatieve kosten als functie van de cumulatieve emissiereductie NO<sub>x</sub>-bestrijding, 2000, Strategie: lage NO<sub>x</sub>-branders en verbrandingsmodificaties verkeer.



Figuur 6.12 Cumulatieve kosten als functie van de cumulatieve emissiereductie NO<sub>x</sub>-bestrijding, 2000  
 Strategie: lage NO<sub>x</sub>-branders+selectieve katalytische reductie en driewegkatalysator verkeer



Figuur 6.13 Cumulatieve kosten als functie van de cumulatieve emissiereductie NH<sub>3</sub>-bestrijding, 2000



Figuur. 6.14 Kosten en emissiereductie bij simultane optimalisatie van SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- en NH<sub>3</sub>-bestrijding.

1. KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN

De hieronder weergegeven konklusies uit de studie moeten geïnterpreteerd worden in het licht van de beperkingen die in de onderzoeksopdracht zijn geformuleerd. Het gaat daarbij met name om de volgende aspecten:

- slechts één economisch-energetisch scenario is beschouwd;
- aan verspreiding en depositie van verzurende componenten is geen aandacht geschonken;
- uitsluitend de Nederlandse situatie is beschouwd;

Voorts zijn ten aanzien van enkele kostengegevens, in het bijzonder over ammoniakbestrijdingsmaatregelen, globale schattingen gehanteerd omdat gedetailleerdere gegevens niet beschikbaar waren.

De resultaten t.a.v. emissiereductie en kosten bij bestrijding van emissies van SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> zijn samengevat in tabel 7.1.

tabel 7.1. Samenvatting emissiereductie en kosten van bestrijdingsvarianten.

Bestrijdingsvariant	1980	1990		2000			
	emissie (10 <sup>3</sup> ton/jaar	(rest) emissie (10 <sup>3</sup> ton)	emissie- reductie* (10 <sup>3</sup> ton)	kosten** (10 <sup>6</sup> gld.)	(rest) emissie (10 <sup>3</sup> ton)	emissie- reductie* (10 <sup>3</sup> ton)	kosten** (10 <sup>6</sup> gld.)
SO <sub>2</sub> -ongewijzigd beleid	484	413	-	71	361	-	262
SO <sub>2</sub> -volledige bestrijding	-	181	232	583	156	205	653
NO <sub>x</sub> -ongewijzigd beleid	516	543	-	2	558	-	6
NO <sub>x</sub> -verdergaande bestrijding	-	501	42	62	462	96	224
NO <sub>x</sub> -volledige bestrijding	-	501	42	62	250	308	2497
NH <sub>3</sub> -ongewijzigd beleid	120	141	-	0	164	-	0
NH <sub>3</sub> -eenvoudige bestrijding	-	72	69	549	82	82	588

\* ten opzichte van de betreffende ongewijzigd beleid-variant.

\*\* prijspeil 1980

### SO<sub>2</sub>-bestrijding

Het in 1990 na te streven emissieniveau van ca. 350.000 ton SO<sub>2</sub> wordt bij volledige bestrijding ruimschoots gerealiseerd (restemissie 181.000 ton). Deze bestrijdingsmaatregelen kosten samen 583 miljoen gulden. Gemiddeld over alle maatregelen bedragen de specifieke kosten f. 2515,- per ton bestreden SO<sub>2</sub>, oftewel f. 0,08 per mol H<sup>+</sup> potentieel zuur. De minimale kosten om tot een emissie van 350.000 ton te komen bedragen 150 miljoen gulden. Het in 2000 te bereiken emissieniveau van 150.000 ton SO<sub>2</sub> wordt vrijwel gehaald bij volledige bestrijding. In dat jaar kosten de bestrijdingsmaatregelen samen 653 miljoen gulden. Gemiddeld over alle maatregelen komt dit neer op f. 3.185,- per ton bestreden SO<sub>2</sub>, of f. 10 per mol H<sup>+</sup> potentieel zuur. De relatief grootste emissiereductie treedt op bij de openbare elektriciteitsvoorziening, de industriële warmte/kracht-opwekking en de raffinaderijen. Deze reductie wordt bereikt door toepassing van rookgasontzwaveling en gebruik van ontzwavelde stookolie met 0.5 gewichtsprocent zwavel. Bij kleine installaties is het gebruik van laagzwavelige stookolie goedkoper dan rookgasontzwaveling.

### NO<sub>x</sub>-bestrijding

Het emissieniveau van 350.000 ton NO<sub>x</sub> waarnaar in 2000 wordt gestreefd, wordt bij verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding met 112.000 ton overschreden en bij volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding ruimschoots gehaald. Verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding kost in dat jaar 224 miljoen gulden; volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding 2497 miljoen gulden. Gemiddeld over alle bestrijdingsmaatregelen zijn de specifieke kosten voor verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding dan f. 2.335,- per ton bestreden NO<sub>x</sub> of f. 0,11 per mol H<sup>+</sup>. Voor volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding is dat f. 8.105 per ton of f. 0,37 per mol H<sup>+</sup>. De minimale kosten om een restemissie van 350.000 ton te bereiken bedragen 550 miljoen gulden. In 1990 heeft NO<sub>x</sub>-bestrijding slechts een gering effect. Bij verdergaande bestrijding wordt de totale uitworp ca. 8% minder dan in de basisvariant. Volledige bestrijding is in dat jaar nog niet toepasbaar. De relatief grootste emissiereductie doet zich voor bij de openbare elektriciteitsvoorziening en het verkeer. Bij de eerstgenoemde sector vindt deze reductie plaats door toepassing van selectieve katalytische reductie, al dan niet in combinatie met lage NO<sub>x</sub>-branders. In de verkeerssector kan gekozen worden tussen emissie-afstelling van de arme-mengselmotor en de driewegkatalysator. Voor



personenauto's op benzine en LPG bewerkstelligt de driewegkatalysator ten opzichte van de autonome ontwikkeling een ongeveer tweemaal zo grote emissiereductie als emissie-afstelling; de kosten zijn evenwel ruim dertienmaal zo groot.

#### NH<sub>3</sub>-bestrijding

Voor ammoniak is het in 2000 na te streven uitworpniveau circa 60.000 ton. Dit niveau kan met de beschouwde bestrijdingsmaatregelen niet gerealiseerd worden. In 1990 kan de emissie met ongeveer 50% verlaagd worden tot 72.000 ton. De kosten van de daarvoor noodzakelijke bestrijdingsmaatregelen bedragen dan 549 miljoen gulden, wat gemiddeld over alle maatregelen neerkomt op f. 7.950,- per ton vermeden NH<sub>3</sub> oftewel f. 0,14 per mol H<sup>+</sup>. In 2000 resteert nog een emissie van 82.000 ton. In dat jaar kosten de bestrijdingsmaatregelen in totaal 58 miljoen gulden, wat neerkomt op f. 7.170,- per ton vermeden NH<sub>3</sub> of f. 0,12 per mol H<sup>+</sup>. De relatief grootste emissiereductie wordt bewerkstelligd bij mestinjectie op grasland en direct onderploegen van mest op bouwland.

De emissiereductie en kosten van ammoniakbestrijdingsmaatregelen zijn minder betrouwbaar dan die van SO<sub>2</sub>-en NO<sub>x</sub>-bestrijding. Dit komt omdat onderzoek naar NH<sub>3</sub>-bestrijding nog volop gaande is, zodat met eerste voorlopige schattingen moest worden volstaan.

### Aanbevelingen

- Onderzoek naar mogelijkheden om de NO<sub>x</sub>-uitworp verder te verlagen is gewenst.
- De economische groei in de landbouw dient nader gedetailleerd te worden naar diersoort en gewastype om de ammoniakemissie exacter te kunnen voorspellen.
- Maatregelen om ammoniakemissies te beperken en de kosten daarvan dienen nader onderzocht te worden; de rol van mesttransport via mestbanken is daarbij wellicht van grote betekenis.
- Om regionale effecten van emissiebestrijding te bestuderen is het wenselijk emissiebronnen geografisch te verbijzonderen; met name voor ammoniak is dat wellicht van grote betekenis.
- Omdat bestrijdingsmaatregelen uiteindelijk in belangrijke mate afhangen van de effecten van verzuring voor mens en milieu verdient het aanbeveling de resultaten van het onderzoek in te passen in een meer omvattende systeemanalytische studie; daarbij dient de gehele keten van emissieveroorzakende activiteiten tot en met de effecten op bodem, water en vegetatie te worden beschouwd.

LITERATUUR

1. *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1984-1988.*  
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.  
1983
  
2. *Notitie inzake verzuring.*  
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer,  
Ministerie van Landbouw en Visserij  
1984
  
- F. van Oostvoorn, W.G. van Arkel, *Optimale strategieën voor de bestrijding van zure regen veroorzakende SO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-emissies gebaseerd op berekeningen met SELPE.*  
Energie Studie Centrum  
1984
  
4. *Optimisation of abatement of acidifying emissions.*  
Technica Consulting Scientist & Engineers  
1984
  
5. M.B.H.M. Laurier, *Emissies en bestrijdingsmaatregelen van ammoniak.*  
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne  
1984
  
- 6. *Technologische gegevens voor het NO<sub>x</sub>-beleid*  
Ministerie van VROM, Publikatiereeks Lucht nr. 8  
1983
  
7. R. Thomas et al, *Uitworp van stikstofoxiden in Nederland in het jaar 2000.*  
Ministerie van VROM, Publikatiereeks Lucht nr. 7  
1983
  
8. A.A. Olsthoorn, R. Thomas. *Kosten van bestrijding NO<sub>x</sub>-emissies.*  
Instituut voor Milieuvraagstukken der Vrije Universiteit.  
1983

9. W.G. van Arkel, F. van Oostvoorn, Ontwikkeling van een milieusector in het energiemodel SELPE, Modeldefinitie, enige proefberekeningen van emissies en een overzicht van bestrijdingstechnieken

Energie Studie Centrum

1984

10. P.G.M. Boonekamp, Beschrijving van SELPE, een model van de Nederlandse energievoorziening.

Energie Studie Centrum, rapport ESC-17

1982

11. E. Buijsman, Emissie van ammoniak in Nederland.

Instituut voor Meteorologie en Oceanografie der Rijksuniversiteit Utrecht, rapport V83-3 (concept).

1983

12. Advies over zwaveldioxide.

Ministerie van VROM, Publicatierreeks Lucht nr. 26.

1984

Bijlage 1. Emissiefactoren voor onbestreden emissies bij stationaire verbrandingsinstallaties, gebaseerd op de situatie in 1980.

Proces	Brandstof	Emissiefactor (ton/PJ)		Opmerking
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	
Sector I : Openbare electriciteitsvoorziening				
1. oliegestookte conventionele eenheden	o zware stookolie	770	180	
2. gasgestookte conventionele eenheden	o aardgas	0	140	
	o cokesovengas	250	15	
	o hoogovengas	0	15	
3. conventionele kolencentrales	o steenkool	680	270	
4. pieklasteenheden (gasturbines)	o aardgas	0	140	
	o lichte stookolie	125	250	
	o LPG	0	40	
5. vuilverbrandingseenheden	o vuil	160	150	
Sector II : Openbare warmte/kracht - koppeling (Stadsverwarming)				
1. conventionele olie/gasgestookte ketels	o aardgas	0	90	
	o zware stookolie	770	180	
2. STEG-eenheden	o aardgas	0	140	
3. poederkoolketels	o steenkool	680	220	nieuw

Sector III : Industriële warmte/kracht - opwekking

1. olie/gasgestookte w/k-eenheden (tegendruk-, condensatieturbine)	o aardgas	0	100	
	o lichte stookolie	125	60	
	o zware stookolie	770	120	
2. gasturbine + afgasketel	o aardgas	0	140	
	o lichte stookolie	125	250	
3. olie/gasgestookte ketel + tegen drukturbine	o aardgas	0	70	
	o zware stookolie	770	150	
4. poederkoolketel + tegendrukturbine	o steenkool	680	220	nieuw

Sector IV : Wijk- en stadsverwarming (warmtesector)

1. conventionele ketels	o aardgas	0	50	
	o lichte stookolie	125	45	
2. compressiewarmte- pomp + gasmotor	o aardgas	0	900	nieuw
3. vuilverbranding	o vuil	160	150	

Sector V : Gas en Kolen (kolenvergassing)

Emissiefactoren zijn gebaseerd op de totale doorzet

1. kolenvergassing Lurgi	o steenkool	130	60	nieuw
2. kolenvergassing SNG (Esso)	o steenkool	165	75	nieuw
3. kolenvergassing IGI-U (VEGIN)	o steenkool	0	7	nieuw
4. kolenvergassing SHELL	o steenkool	120	60	nieuw
5. methanolbereiding uit steenkool	o steenkool	165	75	nieuw

Sector VI : Raffinaderijen

1. stoomketels < 250 MW <sub>t</sub>	o zware stookolie	1250 *	170
	o raffinaderijgas	140	80
2. stoomketels > 250 MW <sub>t</sub>	o zware stookolie	1250 *	170
	o raffinaderijgas	140	80
3. Fornuizen < 250 MW <sub>t</sub>	o zware stookolie	1250 *	275
	o raffinaderijgas	140	185
	o petrocokes	550	300
4. Fornuizen > 250 MW <sub>t</sub>	o zware stookolie	1250 *	275
	o raffinaderijgas	140	185

Sector VII : Basisindustrie (chemie, basismetaal, bouwmaterialen)

o aardgas	0	100
o raffinaderijgas	180	200
o chem. afvalgas	30	70
o hoogovengas	0	15
o lichte stookolie	140	60
o zware stookolie	770	160
o steenkool	680	220

Sector VIII : Overige industrie

o aardgas	0	50
o LPG	0	40
o steenkool	680	220
o cokes	500	280
o zware stookolie	770	120
o lichte stookolie	125	45

Sector IX : Overige gebruikers

o aardgas	0	60
o LPG	0	40
o steenkool	680	220
o zware stookolie	770	120
o lichte stookolie	125	45
o biogas	0	60

\* waarden voor 1980; voor 1990 : 1500 ton/PJ; voor 2000 : 1800 ton/PJ.  
tengevolge van een diepere conversie in de toekomst.

Bijlage 2 Kosten-effectiviteit van bestrijdingsmaatregelen.

In de figuren 1 t/m 4 wordt een overzicht gegeven van de bestrijdingskosten in gulden per potentieel mol  $H^+$  uitworproductie voor de diverse onderscheiden sectoren. Deze informatie is gebruikt om tot een groepering van bestrijdingsmaatregelen in berekeningsalternatieven te komen. Er worden globaal gezien goedkope en dure maatregelen onderscheiden; voor  $SO_2$  en  $NO_x$  ligt de grens bij f. 0,20/mol  $H^+$  uitworproductie. Bij de figuren kan het volgende opgemerkt worden.

In het algemeen is de spreiding in kosteneffectiviteit voor  $NO_x$ - en  $NH_3$ -bestrijding groter dan die voor  $SO_2$ -bestrijding.

Verbrandingsemissies van  $SO_2$  kunnen worden bestreden door toepassing van rookgasontzwaveling en door stookolie-ontzwaveling. De kosteneffectiviteit van rookgasontzwaveling hangt af van de installatiegrootte, de benuttingsraad van de installatie en de brandstofsoort (zwavelgehalte). Voor stookolie-ontzwaveling is met een vast bedrag per eenheid olie gerekend, onafhankelijk van de karakteristieken van de installatie. Bij oliegestookte installaties is in het algemeen rookgasontzwaveling goedkoper dan stookolie-ontzwaveling; bij kleine installaties met lage benuttingsgraad (150  $MW_e$ -eenheden in de openbare elektriciteitsvoorziening en 250  $MW_t$ -eenheden in de openbare warmte/kracht-koppeling) is echter het omgekeerde geval. Toepassing van rookgasontzwaveling bij installaties met een nog resterende levensduur van minder dan ongeveer tien jaar is relatief duur. Bij raffinaderijen is uitgegaan van een regeneratief rookgasontzwavelingsproces. De eenheidskosten daarvan zijn hoger dan die van het gipsvormende proces, dat bij de andere sectoren is aangenomen. Toch zijn de kosten voor rookgasontzwaveling bij oliegestookte raffinaderij-installaties niet hoger dan bij andere industriële installaties. Dit wordt veroorzaakt door het hogere zwavelgehalte in de raffinaderij-sector en de grotere installaties (schaaleffekt).

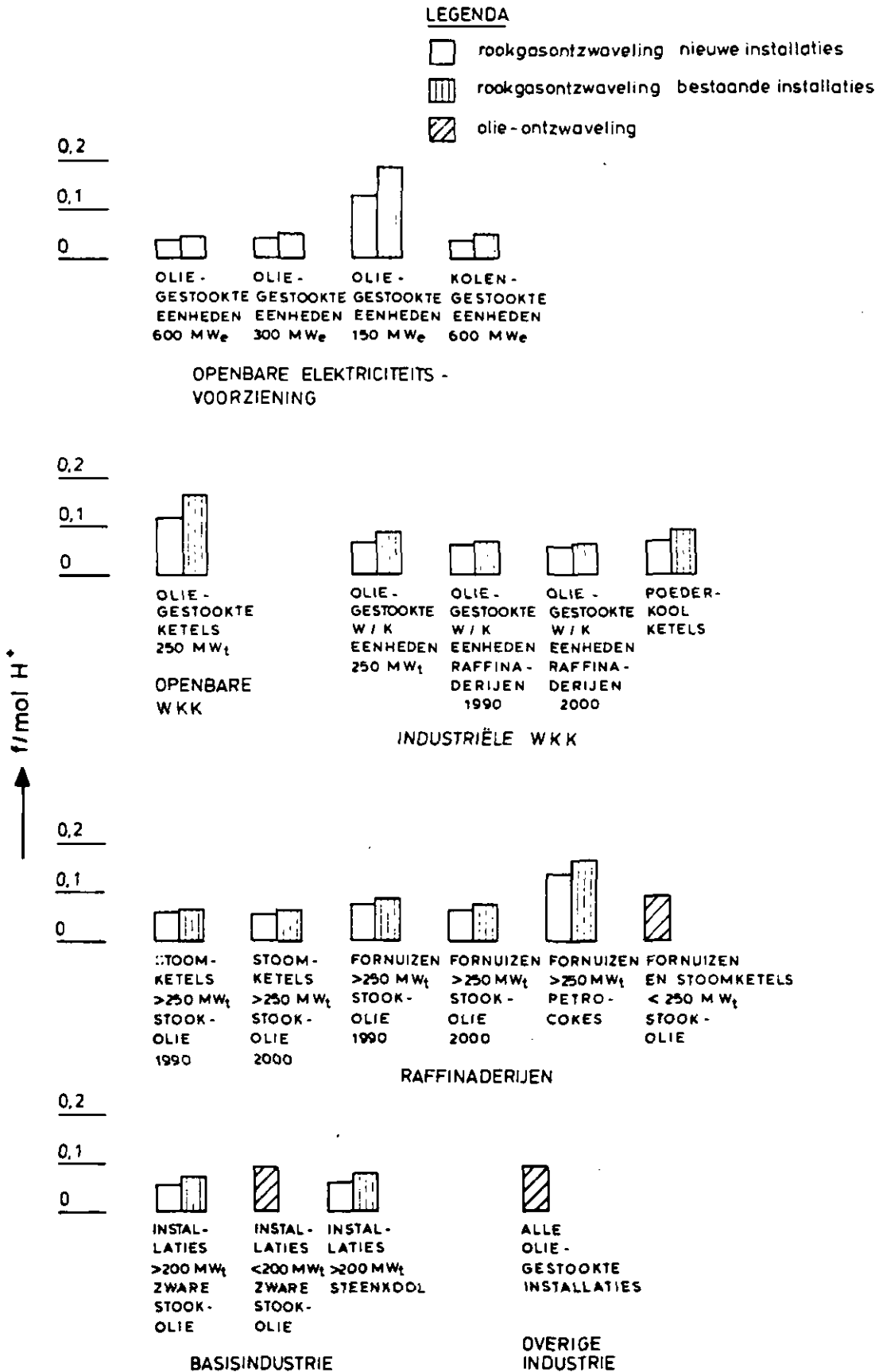
Verbrandingsemissies van  $NO_x$  bij stationaire bronnen kunnen vooral bestreden worden door toepassing van lage- $NO_x$  branders (LBZB + LNB) en van een extra selectieve katalytische reductie (LBZB + LNB + SKR). De eerste techniek is aanzienlijk goedkoper. De kosten voor lage- $NO_x$  branders zijn hoofdzakelijk kapitaalslasten, waardoor ze sterk afhangen van de installatiegrootte en de benuttingsgraad. Dit houdt tevens een groot kostenverschil in tussen bestaande en nieuwe installaties. Bij selectieve katalytische reductie hebben de variabele kosten de overhand, waardoor het schaaleffekt gering is evenals het verschil tussen bestaande en nieuwe installaties.



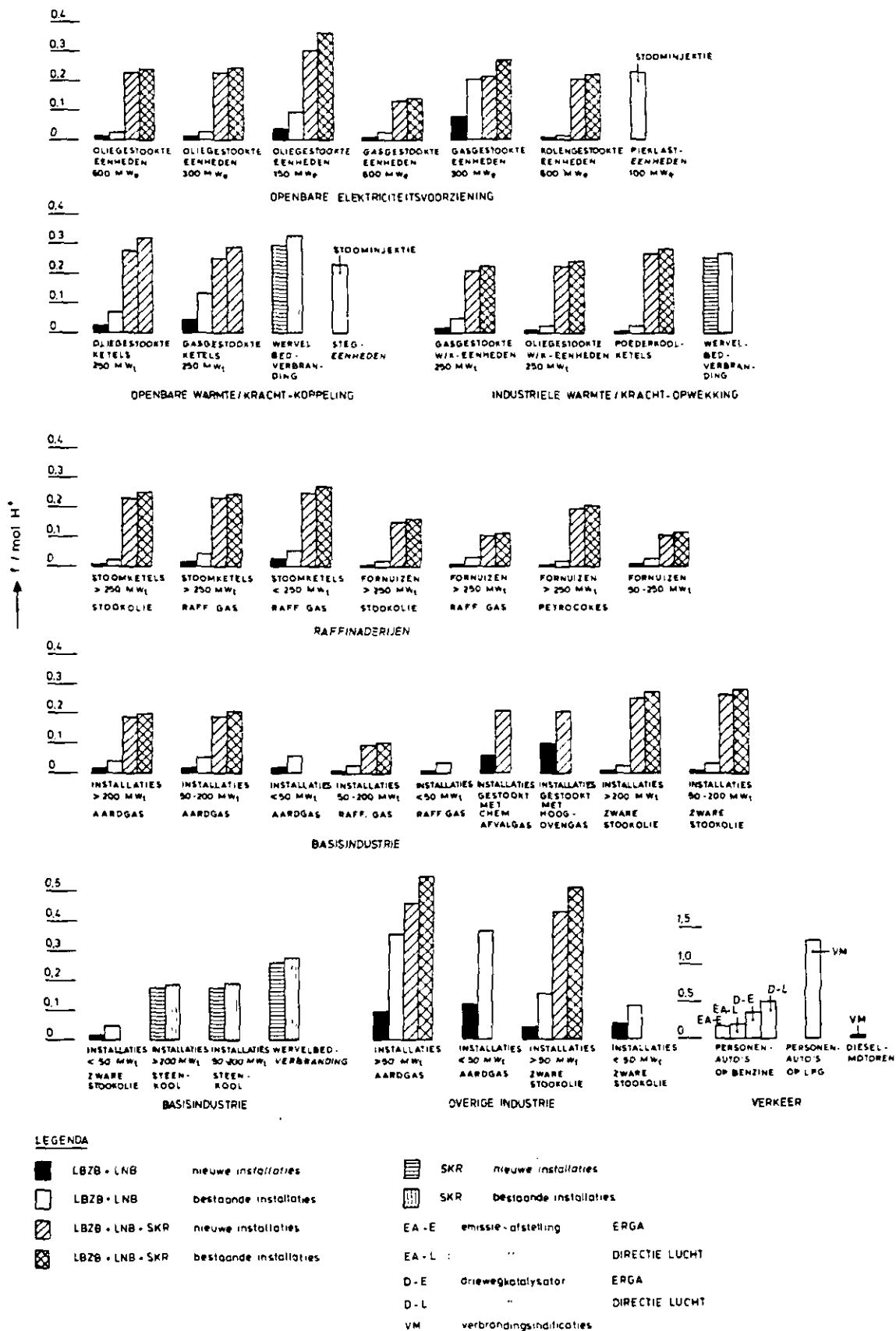
Voorts kan in de verkeerssector een aanzienlijk verschil in de bestrijdingskosten van emissies van personenauto's geconstateerd worden, afhankelijk van de gekozen bestrijdingstechniek. In het algemeen zijn deze bestrijdingsmaatregelen duurder dan die bij stationaire bronnen.

Ten aanzien van de bestrijding van procesemissies van  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$  zijn de kosten relatief laag.

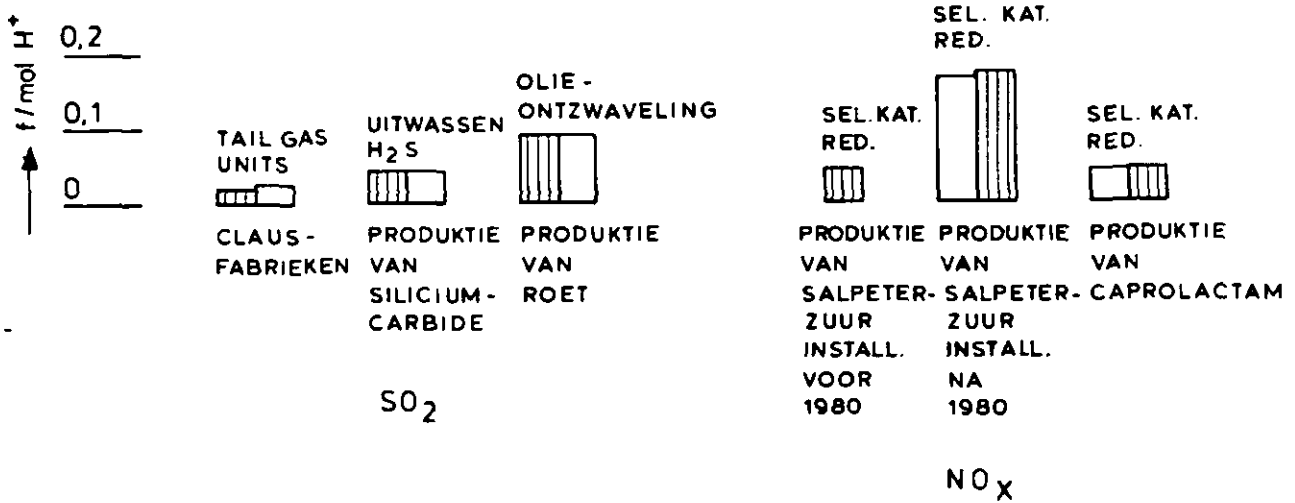
Om emissies van  $\text{NH}_3$  te bestrijden zijn alleen relatief goedkope maatregelen denkbaar bij de verspreiding van mest op bouw- en grasland en bij de chemische industrie. Bestrijding van emissies uit de stal is duur, waarbij in het algemeen gesloten mestopslag duurder is dan luchtwassers en deze weer duurder dan grondfilters.



Figuur 1. Kosten-effectiviteit van SO<sub>2</sub>-bestrijdingsmaatregelen bij verbrandingsemmissies



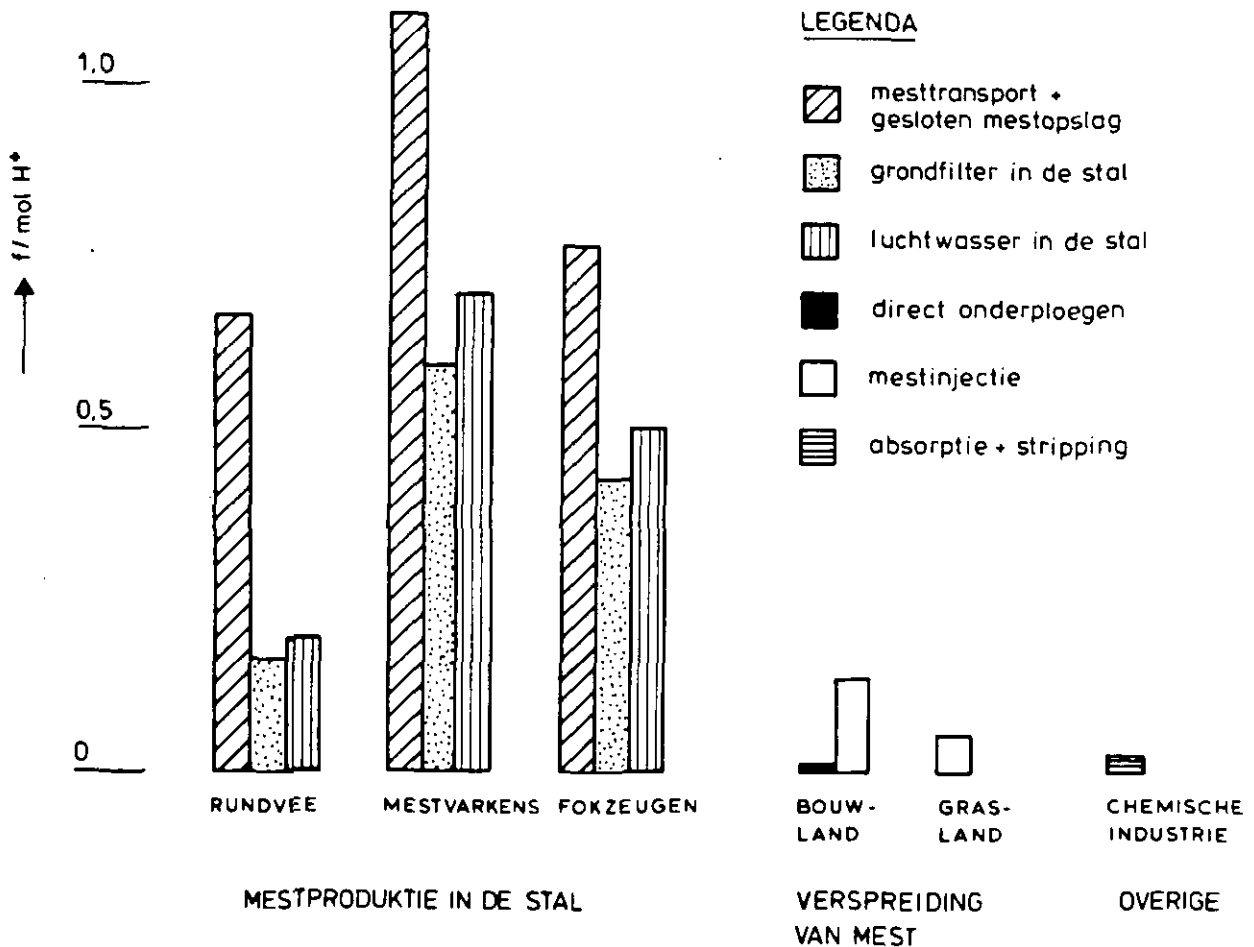
Figuur 2. Kosten-effectiviteit van NO<sub>x</sub>-bestrijdingsmaatregelen bij verbrandingsemissies



LEGENDA

- nieuwe installatie
- bestaande installatie

Figuur 3. Kosten-effectiviteit van bestrijdingsmaatregelen bij procesemissies van SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>.



Figuur 4. Kosten-effectiviteit van bestrijdingsmaatregelen bij NH<sub>3</sub>-emissies.

Bijlage 3. Overzicht van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>  
emissiefactor in ton/PJ

- RGO = rookgasontzwaveling  
 0+0.5 = olie-ontzwaveling tot 0.5 gew. % S  
 LNB = lage NO<sub>x</sub>-branders in combinatie met lage  
 branderzone-belasting  
 (S)KR = (selectieve) katalytische reductie  
 WBV = wervelbedverbranding  
 LNCV = lage NO<sub>x</sub> - CV-ketel  
 VM = verbrandingsmodificatie

Bestrijdingsvariant	1. SO <sub>2</sub> -bestrijding		2 NO <sub>x</sub> -bestrijding		
	1.1. ongewijzigd beleid	1.2. volledige SO <sub>2</sub> -bestrijding	2.1. ongewijzigd beleid	2.2. verdergaande NO <sub>x</sub> -bestrijding	2.3. volledige NO <sub>x</sub> -bestrijding
Sector/proces	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor
<b>1. Openbare elektr.voorziening</b>					
1. oliegestookte conv.eenheid		0+0.5 230		LNB 115	LNB+SKR 22
2. gasgestookte conv.eenheid - aardgas				LNB 85	LNB+SKR 17
3. bestaande kolencentrale					
- Gelderland Z-13	RGO 305*				
- Amer 81	RGO 305*				
- Buggenum 6		RGO 70	LNB 180	LNB 180	LNB+SKR 36
- Haasvlakte	RGO 70		LNB 180		
- Borssele	RGO 305*		LNB 180		
4. nieuwe kolencentrale	RGO 70	RGO 70	LNB 180	LNB 180	LNB+SKR 36
5. pieklasteenheid					
- aardgas					waterinj. 150
- lichte stookolie		0+0.15 70			
6. STEG-eenheid					stoominj. 30

\* 50% van de output wordt ontzwaveld

Bijlage 3. Overzicht van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> (vervolg)  
emissiefactor in ton/PJ

Bestrijdingsvariant	1. SO <sub>2</sub> -bestrijding		2 NO <sub>x</sub> -bestrijding		
	1.1. ongewijzigd beleid	1.2. volledige SO <sub>2</sub> -bestrijding	2.1. ongewijzigd beleid	2.2. verdergaande NO <sub>x</sub> -bestrijding	2.3. volledige NO <sub>x</sub> -bestrijding
Sector/proces	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor
<b>II. Openbare w.k.k. (stadsverwarming)</b>					
1. conventionele ketels op aardgas					
• 1990				LNB 55	LNB 55
• 2000				LNB 55	LNB+SKR 11
2. STEG-eenheden - aardgas					stoominj. 30
<b>III. Industriële w.k.k.</b>					
1. olie/gasgestookte w/k-eenheden - aardgas					
• 1990				LNB 55	LNB 55
• 2000				LNB 55	LNB+SKR 11
- lichte stookolie		0+0.15 70			
- zware stookolie					
• 1990		0+0.5 230		LNB 115	LNB 115
• 2000		0+0.5 230		LNB 115	LNB+SKR 22
2. gasturbine+afgasketel - aardgas					stoominj. 30
- lichte stookolie		0+0.15 70			
3. poederkoolketel + tegendrukturbine					
• 1990	600	RCO 70	LNB 220*	LNB 220*	LNB 220*
• 2000	RCO 230	RCO 70	LNB 220*	LNB 220*	LNB+SKR 45

\* minder dan 35% reductie bij onbestreden uitworp van 280 ton/PJ

Bijlage J. Overzicht van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> (vervolg)  
emissiefactor in ton/PJ

Bestrijdingsvariant	1. SO <sub>2</sub> -bestrijding		2 NO <sub>x</sub> -bestrijding		
	1.1. ongewijzigd beleid	1.2. volledige SO <sub>2</sub> -bestrijding	2.1. ongewijzigd beleid	2.2. verdergaande NO <sub>x</sub> -bestrijding	2.3. volledige NO <sub>x</sub> -bestrijding
Sector/proces	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor
<b>IV. <u>Wijk- en stadsverwarming</u></b>					
1. conventionele ketels					
- lichte stookolie		0+0.15    70			
2. compressiewarmtepomp + gasmotor				KR    120*	KR    120*
<b>VI. <u>Raffinaderijen</u></b>					
1. stoomketels					
- zware stookolie					
• 1990		RGO    150		LNB    107	LNB    107
• 2000		RGO    180		LNB    107	LNB+SKR    21
- raffinaderijgas					
• 1990				LNB    50	LNB    50
• 2000				LNB    50	LNB+SKR    10
2. fornuizen					
- zware stookolie					
• 1990		RGO    150		LNB    175	LNB    175
• 2000		RGO    180		LNB    175	LNB+SKR    35
- raffinaderijgas					
• 1990				LNB    112	LNB    112
• 2000				LNB    112	LNB+SKR    23
- petrocokes					
• 1990		RGO    55			
• 2000		RGO    55		SKR    60	SKR    60

\* gewogen gemiddelde

Bijlage 3. Overzicht van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> (vervolg)  
emissiefactor in ton/PJ

Bestrijdingsvariant	1. SO <sub>2</sub> -bestrijding		2. NO <sub>x</sub> -bestrijding		
	1.1. ongewijzigd beleid	1.2. volledige SO <sub>2</sub> -bestrijding	2.1. ongewijzigd beleid	2.2. verdergaande NO <sub>x</sub> -bestrijding	2.3. volledige NO <sub>x</sub> -bestrijding
Sector/proces	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor
<b>VII. Basisindustrie</b>					
ketels op:					
- aardgas					
• 1990				LNB 60	LNB 60
• 2000				LNB 60	LNB+SKR 12
- raffinaderijgas					
• 1990				LNB 120	LNB 120
• 2000				LNB 120	LNB+SKR 24
- chem. afvalgas					
• 1990				LNB 45	LNB 45
• 2000				LNB 45	LNB+SKR 8
- lichte stookolie		0*0.15 70			
- zware stookolie					
• 1990		0*0.5 230		LNB 100	LNB 100
• 2000		0*0.5 230		LNB 100	LNB+SKR 20
- steenkool					
• 1990	600	RG0 70	LNB 220	LNB 220	LNB 220
• 2000	RG0 230	RG0 70	LNB 220	LNB 220	LNB+SKR 45



Bijlage 3. Overzicht van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> (vervolg)  
emissiefactor in ton/PJ

Bestrijdingsvariant	1. SO <sub>2</sub> -bestrijding		2. NO <sub>x</sub> -bestrijding		
	1.1. ongewijzigd beleid	1.2. volledige SO <sub>2</sub> -bestrijding	2.1. ongewijzigd beleid	2.2. verdergaande NO <sub>x</sub> -bestrijding	2.3. volledige NO <sub>x</sub> -bestrijding
Sector/proces	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor
VIII. <u>Overige industrie</u>					
IX. <u>Overige gebruikers</u>					
ketels op:					
- aardgas					LNB 30
- lichte stookolie		0*0.15 70			
- zware stookolie		0*0.5 230	LNB 110		LNB 76
- steenkool					
• 1990	600	RGD 70	LNB 220	LNB 143*	LNB 143*
• 2000	RGD 230	RGD 70	LNB 220	LNB 143*	WRV+SKR 30
IX a. <u>Gezinshuishoudingen</u>					
- aardgas					LNCV 30
- licht stookolie (huisbrandolie)		0*0.15 70			

\* 35% reductie t.o.v. uitworp van 220 ton/PJ

Bijlage 3. Overzicht van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> (vervolg)  
 emissiefactor in ton/PJ

Bestrijdingsvariant	1. SO <sub>2</sub> -bestrijding		2. NO <sub>x</sub> -bestrijding		
	1.1. ongewijzigd beleid	1.2. volledige SO <sub>2</sub> -bestrijding	2.1. ongewijzigd beleid	2.2. verdergaande NO <sub>x</sub> -bestrijding	2.3. volledige NO <sub>x</sub> -bestrijding
Sector/proces	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor	techniek em.factor
<b>X. Verkeer</b>					
1. Personenauto's					
- benzine					
• 2000				VM 552*	3 WK 242*
- LPG					
• 2000				VM 396*	3 WK 174*
2. Vrachtauto's en bussen met directe insputting					
- dieselolie					
• 1990		0+0.15 70			
• 2000 (60% penetratie)		0+0.15 70		VM 662	VM 662
3. Overige voertuigen					
- dieselolie		0+0.15 70			

\* variant Directie Lucht

Bijlage 3. Overzicht van de berekeningsvarianten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> (vervolg)  
emissiefactor in ton/PJ

Bestrijdingsvariant	1. SO <sub>2</sub> -bestrijding		2. NO <sub>x</sub> -bestrijding		
	1.1. ongewijzigd beleid	1.2. volledige SO <sub>2</sub> -bestrijding	2.1. ongewijzigd beleid	2.2. verdergaande NO <sub>x</sub> -bestrijding	2.3. volledige NO <sub>x</sub> -bestrijding
<i>Sector/proces</i>	<i>techniek red.perc.</i>	<i>techniek red.perc.</i>	<i>techniek red.perc.</i>	<i>techniek red.perc.</i>	<i>techniek red.perc.</i>
<b>Procesemissies</b>					
1. Claus-fabrieken		tailgas units 80			
2. Chemische industrie		uitwassen H <sub>2</sub> S 90			
3. Produktie van roet		0+0.5 66			
4. Produktie van salpeterzuur					SKR 80
5. Chemische industrie					SKR 80

Bijlage 4. Emissies en kosten bestrijdingsmaatregelen voor SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub>.

In tabel 1 t/m 4 zijn de emissies en de kosten van bestrijdingsmaatregelen voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> vermeld, zoals berekend met SELPE. De gegevens zijn ontleend aan het ESC-deelrapport [3]. In tabel 5 en 6 zijn de emissies en kosten van bestrijdingsmaatregelen voor NH<sub>3</sub> vermeld; deze zijn ontleend aan het RIVM-deelrapport [4]. Voor toelichting wordt verwezen naar paragraaf 6.2.1.

Tabel 1. SO<sub>2</sub>-emissies ESC-scenario voor en na bestrijding (in miljoen kg/jaar).

Sector	1980	1990		2000	
		(1)	(2)	(1)	(2)
Raffinaderijen	106	94	17	90	17
Cokesfabrieken	3	3	3	4	4
Kolenvergassing	-	-	-	-	-
Openbare elektriciteitsopw.	189	109	27	63	32
Stadsverw.(openbare wkk)	3	-	-	-	-
Wijkverwarming	1	2	2	2	2
Industriële wkk (incl. wkk-raffinaderijen)	3	56	17	43	9
Basisindustrie (excl.wkk)	30	22	9	24	10
Overige industrie (excl.wkk)	18	2	1	2	1
Overige gebruikers	15	16	6	13	5
Gezinshuishoudingen	8	2	1	1	0.4
Transport (excl.zeescheepvaart)	20	19	10	20	12
Zeescheepvaart	26	26	26	26	26
Procesemissies (incl.raffinaderijen)	62	62	62	73	37
Totaal	484	413	181	361	156

(1) basisscenario

(2) volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding.

Tabel 2. NO<sub>x</sub>-emissies ESC-scenario voor en na bestrijding (in miljoen kg/jaar)

Sector	1980	1990		2000		
		(1)	(2)	(1)	(2)	(3)
Raffinaderijen	20	23	15	21	12	3
Cokesfabrieken	1	1	1	1	1	1
Kolenvergassing	-	-	-	-	-	-
Openbare elektriciteitsopw.	89	75	56	91	82	17
Stadsverw.(openbare wkk)	1	6	6	10	10	1
Wijkverwarming	2	6	6	15	15	4
Industriële wkk (incl. wkk-raffinaderijen)	5	22	19	36	33	5
Basisindustrie (excl.wkk)	29	25	16	27	18	5
Overige industrie (excl.wkk)	12	9	8	9	5	5
Overige gebruikers	11	20	19	36	33	9
Gezinshuishoudingen	22	24	24	22	22	11
Transport (excl.zeescheepvaart)	287	296	296	255	196	167
Zeescheepvaart	9	10	10	12	12	12
Procesemissies (incl.raffinaderijen)	28	26	26	23	23	10
Totaal	516	543	501	558	462	250

(1) basisscenario

(2) verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding

(3) volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding

Tabel 3. Kosten SO<sub>2</sub>-bestrijding ESC-scenario (in miljoenen gulden/jaar; prijspeil 1980)

Sector	1990		2000	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Openbare elektriciteitsopw.	70.8	202	239,7	275
Stadsverw.(openbare wkk)	-	-	-	-
Wijkverwarming	-	-	-	-
Industriële wkk	-	94.4	12.4	78.4
Basisindustrie	-	39.8	7.9	49.8
Raffinaderijen	-	207.9	-	171.6
Overige industrie	-	7.8	1.9	7.3
Transport	-	10.5	-	11.7
Overige gebruikers	-	19.0	-	16.3
Gezinshuishoudingen	-	1.0	-	0.5
Procesemissies (incl.raffinaderijen)	-	-	-	42.1
Totaal	70.8	583	262	653

(1) basisscenario

(2) volledige SO<sub>2</sub>-bestrijding

Tabel 4. Kosten NO<sub>x</sub>-bestrijding ESC-scenario (in miljoenen guldens/jaar; prijspeil 1980)

Sector	1990		2000		
	(1)	(2)	(1)	(2)	(3)
Openbare elektriciteitsopw.	14	18	4.2	8.6	305.7
Stadsverw.(openbare wkk)	-	0.2	-	0.1	20.8
Wijkverwarming	-	-	-	-	18.0
Industriële wkk	0.2	4.3	0.5	3.0	73.8
Basisisindustrie	0.1	19.0	0.9	17.6	95.6
Raffinaderijen	-	7.4	-	14.1	55.2
Overige industrie	-	4.9	-	13.4	13.4
Transport	-	-	-	153.1	1755
Overige gebruikers	-	8.3	-	13.6	52.8
Gezinshuishoudingen	-	-	-	-	49.7
Procesemissies (incl.raffinaderijen)	-	-	-	-	57.3
Totaal	1.7	62.1	5.7	224	2497

(1) basisscenario

(2) verdergaande NO<sub>x</sub>-bestrijding

(3) volledige NO<sub>x</sub>-bestrijding.



Tabel 5. NH<sub>3</sub>-emissies voor en na bestrijding (in miljoenen kg/jaar)

Bron: RIVM

Proces	1980	1990		2000	
		(1)	(2)	(1)	(2)
<b>Landbouwemissies</b>					
● mestproduktie in de wei	33	40	40	48	48
● mestproduktie in de stal van:					
- rundvee	13	15	1	18	1
- mestvarkens	5	6	0.3	7	0.4
- fokzeugen	3	3	0.2	4	0.2
- overige dieren	3	3	3	3	3
● verspreiding van mest op:					
- grasland	24	25	3	31	3
- bouwland	21	28	8	29	9
● kunstmestgebruik	11	11	11	11	11
<b>Procesemissies</b>	8	10	5	13	6.5
<b>Totaal</b>	121	141	72	164	82

(1) basisscenario

(2) NH<sub>3</sub>-bestrijding

Tabel 6. Kosten NH<sub>3</sub>-bestrijding (in miljoen gulden/jaar; prijspeil 1980)

Bron: RIVM

Proces	1990	2000
Landbouwemissies		
● mestproduktie in de wei	-	-
● mestproduktie en -opslag in de stal		
van:		
- rundvee	159	170
- mestvarkens	204	215
- fokzeugen	93	90
- overige dieren	-	-
● verspreiding van mest op:		
- grasland	72	90
- bouwland	14	14
● kunstmestgebruik	-	-
Procesemissies	7	9
Totaal	549	588