



Planbureau voor de Leefomgeving

MONETAIRE MILIEUSCHADE IN NEDERLAND

Een verkenning

Policy Brief

Eric Drissen en Herman Vollebergh

18 juni 2018

PBL

Monetaire milieuschade in Nederland. Een verkenning

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving
Den Haag, 2018
PBL-publicatienummer: 3206

Auteurs

Eric Drissen en Herman Vollebergh

Contact

Herman Vollebergh (herman.vollebergh@pbl.nl)

Supervisie

Frank Dietz

Met dank aan

Speciale dank gaat uit naar onze collega's van het PBL: Frank Dietz, Winand Smeets, Pieter Boot, Andries Hof, Hans van Grinsven, Arjan Ruijs en Gusta Renes.

Redactie figuren

Beeldredactie PBL

Eindredactie en productie

Uitgeverij PBL

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Drissen, E. & H. Vollebergh (2018), *Monetaire milieuschade in Nederland. Een verkenning*, Den Haag: PBL Planbureau voor de Leefomgeving.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyse op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is vóór alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

Inhoud

Samenvatting	4
1 Milieuschade in geld	6
2 Monetariseren van milieuschade	8
2.1 Waarderen van milieuschade	8
2.2 Emissies	9
2.3 Het bepalen van milieuprijzen	11
2.4 De milieuprijzen voor Nederland	12
2.5 Naar de monetaire milieuschade in Nederland	14
3 De monetaire milieuschade in Nederland	16
3.1 De monetaire milieuschade van verschillende stoffen	16
3.2 Monetaire schade verdeeld over doelgroepen	19
3.3 Milieuschade in Nederland en door Nederlanders	21
4 Gevoeligheids-analyse	24
4.1 Onzekerheden milieuprijzen	24
4.2 Milieuprijs voor broeikasgassen	26
4.3 Het bepalen van de emissie van broeikasgassen	27
4.4 Waardering schade door stikstofoxiden (NO _x)	28
4.5 Milieuschade uit natuur en bodem en als gevolg van landgebruik	29
4.6 Waardering biodiversiteit	30
4.7 Waardering andere milieuschade en dubbeltellingen	31
5 Monetarisering en beleid	33
Literatuur	35
Appendix A Overzicht van stoffen	37
Appendix B Milieuprijzen	40
C.1 Milieuschade door de landbouw	46
C.2 Milieuschade door de nijverheid	47
C.3 Milieuschade door de energiesector en overige nutsbedrijven	48
C.4 Milieuschade door verkeer en vervoer	49
C.5 Milieuschade door de dienstensector en consumenten	50

Samenvatting

Milieuschade door emissies van schadelijke stoffen naar bodem, water en lucht veroorzaakt een direct welvaartsverlies voor de huidige generatie. Het gaat dan om allerlei vormen van schade, zoals verlies aan biodiversiteit, verlies aan productiviteit in de landbouw en gezondheidsschade voor de mens. Ondanks het milieubeleid van de afgelopen vijftig jaar doen zich nog steeds enkele hardnekkige milieuproblemen voor. Denk aan de opwarming van de aarde als gevolg van de uitstoot van broeikasgassen en luchtverontreiniging.

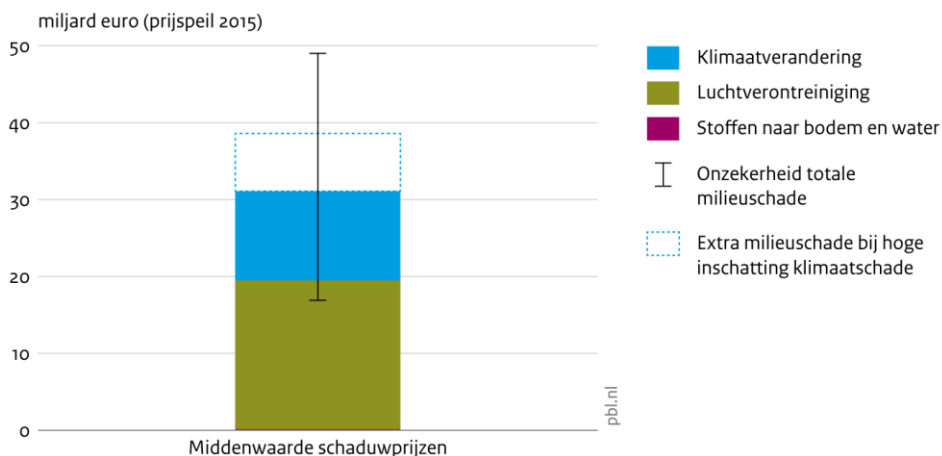
Om de waarde van de milieuschade in geld te kunnen uitdrukken dient idealiter van elke relevante emissie naar lucht, water of bodem de milieuschade te worden bepaald, evenals het in geld uitgedrukte welvaartsverlies dat door deze schade wordt veroorzaakt. In deze studie wordt hiertoe informatie over de fysieke emissies, zoals jaarlijks gerapporteerd in de Emissieregistratie (RIVM 2017), gecombineerd met informatie over de milieuprijzen uit het Handboek Milieuprijzen (CE Delft 2017a). Elke milieuprijs geeft de monetaire waarde van de schade die het gevolg is van de emissie van één extra kilogram van de betreffende stof.

Totale monetaire milieuschade in 2015 ruim 31 miljard

De totale monetaire milieuschade als gevolg van de emissie van schadelijke stoffen in Nederland bedroeg in 2015 ruim 31 miljard euro (zie figuur 1), zo volgt uit de berekeningen in deze studie. Als ook de milieuschade wordt meegenomen van Nederlandse consumenten en bedrijven in het buitenland en de schade veroorzaakt door buitenlanders in Nederland wordt weggelaten, dan stijgt de schade tot 37 miljard euro. In deze berekening wordt meegenomen dat Nederlandse consumenten en bedrijven veel meer in het buitenland reizen dan buitenlanders in Nederland. Alleen al de luchtvaart is goed voor 3,5 miljard extra schade, maar deze vindt niet in Nederland plaats. De berekening geeft in feite het directe jaarlijkse welvaartsverlies als gevolg van de milieuschade voor Nederland en kan direct worden vergeleken met andere maatstaven van welvaart, zoals de welstand op basis van het bruto binnenlands product (bbp). In 2015 bedroeg het bbp 683 miljard euro en de groei hiervan 20 miljard euro. Het bbp komt derhalve 4,5 procent lager uit als rekening wordt gehouden met de monetaire milieuschade.

Figuur 1

Monetaire milieuschade naar achterliggende oorzaak, 2015



Bron: Emissieregistratie en CE Delft 2017

Opvallend is dat bijna alle berekende schade voortkomt uit emissies naar de lucht. Zoals uit figuur 1 blijkt, gaat het daarbij vooral om broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen waarover Europese afspraken over emissiereductie zijn gemaakt (de zogenoemde NEC-stoffen). Samen zijn de broeikasgassen en de NEC-stoffen verantwoordelijk voor ruim 98 procent van de milieuschade. De emissies naar oppervlaktewater en bodem blijken volgens deze berekeningen samen verantwoordelijk voor slechts ongeveer 0,5 procent van de totale milieuschade. De milieuschade door de luchtverontreinigende NEC-stoffen blijkt met krap 19 miljard euro goed te zijn voor 61 procent van de totale schade. Deze is zelfs groter dan de milieuschade door broeikasgassen voor de referentieschatting. De milieuschade van broeikasgassen komt uit op ongeveer 11,5 miljard euro oftewel 37 procent van het totaal.

Uit de berekeningen blijkt verder dat de meeste milieuschade wordt veroorzaakt door verkeer en vervoer, ruim 12 miljard euro schade. Verder zijn de sectoren landbouw (6,5 miljard euro), industrie en raffinage (4,5 miljard euro) en de energiesector (ruim 4 miljard euro) verantwoordelijk voor een groot deel van de schade. Consumenten zijn ook nog goed voor een kleine 2 miljard euro, terwijl afvalverwijdering en de dienstensector slechts beperkt bijdragen aan de directe milieuschade.

Onzekerheden nopen tot brede bandbreedte

Bij dit soort berekeningen spelen diverse onzekerheden een rol. In deze studie wordt vooral de onzekerheid in de gebruikte milieuprijzen geanalyseerd. De figuur laat daarom een bandbreedte zien die is gebaseerd op de laagste en hoogste waarden van de gebruikte milieuprijzen. Alles bij elkaar genomen varieert de berekende milieuschade van 16,3 tot ruim 49 miljard euro.

Zo wordt bij broeikasgassen in de referentie gerekend met milieuprijzen die een schade toestaan van 2,5-3 graden temperatuurstijging in 2050. Als conform het in Parijs afgesproken tweegradendoel wordt gerekend met een hogere inschatting van de schade door broeikasgassen, dan komt daar nog zo'n 7,5 miljard euro bij. Dit schadebedrag zou nog hoger uitvallen als wordt gerekend met het streefcijfer van 1,5 graad. Ook over de schade die met name stikstofoxiden (NO_x) veroorzaken, bestaat forse onzekerheid. Deze onzekerheid hangt samen met het feit dat in deze berekening rekening is gehouden met een mogelijk extra schadelijkheidseffect van stikstofoxiden (los van fijnstof en ozon). Wanneer dit effect niet zou worden meegenomen, halveert de totale schade door NO_x bijna en gaat het om nog maar 6,4 miljard in plaats van 12,3 miljard euro. De totale monetaire milieuschade zou dan 25,2 miljard euro bedragen in plaats van 31,1 miljard euro.

Deze onzekerheden in alleen al de milieuprijzen laten zien dat het zeer onverstandig zou zijn om het luchtverontreinigingsbeleid vooral te richten op de reductie van NO_x . Hetzelfde zou gelden voor een conclusie dat het met de schade van stikstof, fosfor en biodiversiteitsverlies kennelijk wel meevalt. Ten aanzien van diverse interacties en terugkoppelingen is meer kennis omtrent de fysieke interacties onmisbaar, met name ook omtrent de complexiteit en onverwachte schokken in deze systemen. Tot slot dwingen de onzekerheden over de milieuprijzen op dit moment ertoe te werken met een ruime bandbreedte voor de monetaarisering van de milieuschade.

1 Milieuschade in geld

Beprijzing van milieuschade staat volop in de belangstelling. Onder meer wordt een adequate milieubeprijzing breed gezien als een belangrijke randvoorwaarde om te kunnen komen tot groene groei. Daarbij staat het internaliseren van de kosten van milieuschade in de prijzen van energie, grondstoffen of producten centraal. Zo wordt in het kader van het klimaatakkoord van Parijs bijvoorbeeld aangegeven dat CO₂-beprijzing noodzakelijk is om de doelstelling van 1,5-2 graden temperatuurstijging in deze eeuw te realiseren. Behalve de schade verbonden aan broeikasgassen, zoals CO₂, zijn er nog veel meer stoffen die milieuschade veroorzaken en waarvan beprijzing dus van belang is. Denk bijvoorbeeld aan emissies die luchtverontreiniging of bodemvervuiling veroorzaken. Inzicht in de waarde van de milieuschade is van belang omdat het om een direct welvaartsverlies voor de maatschappij gaat. Op dit moment bestaat echter geen goed inzicht in de precieze actuele hoogte van de monetaire milieuschade in Nederland.¹

Om de waarde van de milieuschade in geld uit te kunnen drukken is het allereerst van belang na te gaan welke stoffen de oorzaak zijn van wat voor type fysieke milieuschade, wat hiervan de precieze omvang is en waar deze in het economisch proces wordt veroorzaakt. Een belangrijke vervolgstap is dan vast te stellen hoe die schade zelf moet worden gewaardeerd. Daarbij gaat het niet alleen om een inschatting van de waardering van de fysieke schade, maar juist ook om de *monetaire waarde* daarvan. Idealiter dient dan van elke relevante emissie naar lucht, water of bodem de milieuschade te worden bepaald, evenals het in geld uitgedrukte welvaartsverlies dat door deze schade wordt veroorzaakt.

Het is welbekend dat deze (monetaire) schadebepaling van oudsher met veel onzekerheden is omgeven (CE Delft 2017a). Deze onzekerheden hebben zowel betrekking op het bepalen van de fysieke schade als gevolg van de emissies van schadelijke stoffen als op de monetaire waardering van deze schade. Niettemin is er in de loop der jaren veel vooruitgang op dit punt geboekt, zeker in het geval van de schade die emissies als gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen veroorzaken via klimaatverandering en luchtkwaliteit. Op basis van de inschatting van dit soort effecten zijn uiteindelijk kengetallen geproduceerd op basis waarvan die milieuschade in geld kan worden uitgedrukt. Niet alleen brengt deze berekening dus een direct maatschappelijk welvaartsverlies in kaart, ook kunnen dergelijke berekeningen worden gebruikt om al dan niet bestaande groene belastingen te analyseren op de keuze van de grondslagen en de hoogte van de tarieven (Vollebergh et al. 2014; 2017).

Deze rapportage laat zien wat volgens de huidige inzichten de monetaire milieuschade in Nederland is. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de inschatting van de feitelijke omvang van de *fysieke* emissie voor een heel groot aantal stoffen, zoals de Emissieregistratie die in Nederland heeft verzameld (RIVM 2017). Daarnaast worden de laatste inzichten ingezet over de inschatting van de *monetaire* schade, zoals deze onlangs voor Nederland beschikbaar zijn gekomen via het Handboek Milieuprijzen (CE Delft 2017a). Voorbij wordt gegaan aan inschattingen van de indirecte of ketenschade, dat wil zeggen schade als gevolg van activiteiten in andere sectoren, bijvoorbeeld vanwege toeleveringen aan de productie op de plaats van emissie in de keten. Ook beperken we ons in deze studie tot de milieuschade die het gevolg is van de emissie van schadelijke stoffen. Milieuschade veroorzaakt door bijvoorbeeld landgebruik, bodemverzakking of geluidhinder blijft hier buiten beschouwing.

In hoofdstuk 2 leggen we eerst uit hoe de monetaire milieuschade in deze studie is bepaald. Vervolgens beschrijven we in hoofdstuk 3 de huidige situatie in Nederland en hoe de

¹ In de studie naar een mogelijke belastingverschuiving naar grondstoffen (zie Vollebergh et al. 2017) zijn wel schattingen gepresenteerd in relatie tot berekeningen met het model Exiobase voor 2007. Zie paragraaf 2.5 voor een uitleg van de precieze verschillen met de onderhavige studie.

verdeling van die schade over de belangrijkste bronnen er uitziet. Ook geven we gedetailleerde inschattingen per deelsector (hoofdstuk 3). Tot slot presenteren we kort een gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 4) en enkele conclusies voor het beleid (hoofdstuk 5).

2 Monetarisieren van milieuschade

2.1 Waarderen van milieuschade²

Milieuschade is de schade die wordt toegebracht aan de fysieke leefomgeving van levende wezens. Een belangrijke oorzaak van milieuschade is het in het milieu brengen van milieuschadelijke stoffen, zoals emissies naar bodem, water en lucht. Het kan dan gaan om lozingen naar water, bodem of lucht met gevolgen voor de natuur, waardoor verlies aan biodiversiteit of waterkwaliteit optreedt of de gezondheid van de mens wordt aangetast, zoals een verlies aan gezonde levensjaren. Daarbij hangen de effecten vaak sterk af van de plaats van de emissie en de mate waarin deze lokaal effect sorteert. Zo is de emissie van luchtverontreinigende stoffen vlak bij dichtbevolkte gebieden veel schadelijker dan in dunbevolkte gebieden. Ook kunnen emissies in eerste aanleg lokaal zijn, maar vanwege de verspreiding in het milieu uiteindelijk ook effecten op heel andere plaatsen veroorzaken. Denk aan waterwegen, waardoor milieuschadelijke stoffen niet alleen lokaal voor overlast zorgen maar uiteindelijk zelfs tot diep in de oceaan verantwoordelijk zijn voor vervuiling. Hoewel ecologische systemen zoals waterwegen ook materialen verspreiden – bijvoorbeeld plastics tot diep in de oceanen –, beperken we ons in deze studie tot de milieuschade die wordt veroorzaakt door de emissie van stoffen. Andere schade die wordt toegebracht aan de fysieke leefomgeving, bijvoorbeeld door de verspreiding van materialen in het milieu, landgebruik, geluidhinder, straling, horizonvervuiling, aantasting van het landschap, bodemverzakking of schadelijke afvalresiduen, blijft buiten beschouwing.

In deze studie wordt de milieuschade van emissies omgerekend naar een direct welvaartsverlies voor de maatschappij in monetaire eenheden. Daarvoor moet wel de waarde van de milieuschade in geld worden uitgedrukt. In essentie gaat het dan om het vaststellen van de emissie van alle relevante milieuschadelijke stoffen \mathbf{Q} (met $\mathbf{Q} = (Q_1, \dots, Q_n)$) naar bodem, water en lucht. Hiervan wordt vervolgens – afhankelijk van de plaats in het economisch proces en het effect – het welvaartsverlies bepaald door deze effecten monetair te waarderen aan de hand van zogenoemde (schaduw)prijzen \mathbf{P} (met $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_n)$). Deze schaduw-prijzen geven het monetaire welvaartsverlies als gevolg van de door de emissies veroorzaakte milieuschade. Idealiter wordt zodoende in principe elk effect afzonderlijk gewaardeerd in geld – mede afhankelijk van de plaats in de keten van grondstof tot afval – en vervolgens opgeteld. Voor elk afzonderlijk effect geldt dan $W_i = Q_i * P_i$. En wanneer dit voor alle effecten is gedaan, kan de totale waarde van de milieuschade worden bepaald, oftewel $W_{\text{totaal}} = \sum W_i = \sum [Q_i * P_i]$.

In het vervolg van dit hoofdstuk gaan we kort in op beide dimensies van de waarderingssom. Allereerst leggen we in de volgende paragraaf uit hoe in deze studie de relevante emissies, oftewel 'hoeveelheden', zijn bepaald. Vervolgens bespreken we hoe de fysieke schade van effecten op gezondheid, ecosystemen en bouwwerken wordt gewaardeerd en hoe deze wordt teruggerekend tot de schade die een stof veroorzaakt en waardoor hieraan een prijs kan worden toegekend. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 2.3.

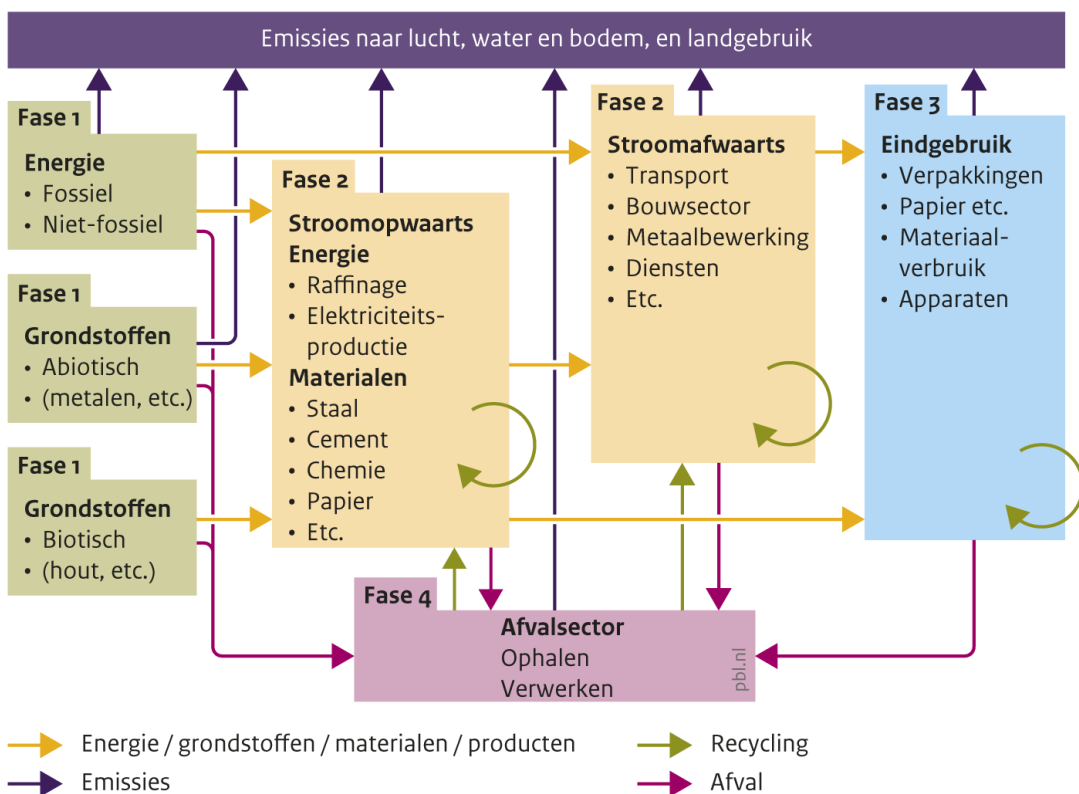
² Zie voor een uitgebreide toelichting van het gebruik van monetarisering van milieuschade ook Vollebergh et al. (2014: 77-80).

2.2 Emissies

Om vast te kunnen stellen wat de omvang van de milieuschade in Nederland is, dient als eerste stap goed na te worden gegaan hoeveel emissies naar bodem, water en lucht worden veroorzaakt en waar in het economisch proces het om welke emissies gaat. Emissies komen met name tot stand bij de verbranding van energie voor verwarming en kracht, maar ook bij processpecifieke omzettingen bij de productie van materialen en eindproducten. De milieuschade door de plasticketen is bijvoorbeeld heel anders dan die door de fabricage van auto's of de productie van elektriciteit. In de plasticketen wordt een grondstof ingezet – aardolie – waaruit verschillende soorten plastic worden gemaakt, zoals PVC en polyethyleen. De in dit proces gebruikte energie is relatief beperkt en de eindproducten zelf zijn redelijk homogeen. Een auto is als eindproduct verre van homogeen in het materiaalgebruik. Hier zijn juist vele ketens relevant, waarbij bij de verschillende materialen ook nog verschillende typen energie worden ingezet, zoals kolen bij de staalproductie en olie voor de plastics. Als gevolg hiervan verschilt de milieuschade sterk tussen deze ketens.

Figuur 2.1

Grondstoffen, materialen, afval en hergebruik in economisch proces



Bron: PBL

In essentie dient te worden vastgesteld waar welke emissies optreden in het economisch proces als gevolg waarvan uiteindelijk milieuschade optreedt (vergelijk ook Vollebergh et al. 2017:26-28; 46-49). In het economisch proces vinden allerhande omzettingen plaats. De gele pijlen geven deze omzettingen van energie en grondstoffen in materialen en halffabricaten naar, eventueel gecombineerd, eindproducten weer. Deze eindproducten komen vervolgens bij huishoudens en bedrijven terecht en vervolgens in de afvalfase. Bij al deze stappen in het economisch proces wordt energie verbruikt. Deze energie is vaak verantwoordelijk voor schade aan het milieu, maar ook het verbruik van grondstoffen leidt

tot schade. Schema 2.1 geeft weer hoe energie en grondstof als gevolg van het economisch proces leiden tot emissie en afval. In elke fase treden emissies op (de paarse pijlen) en komt afval vrij (de rode pijlen). En ook bij de afvalverwerking komen uiteindelijk emissies vrij die terecht komen in het milieu.

Om de fysieke omvang van de relevante emissie van milieuschadelijke stoffen naar bodem, water en lucht vast te stellen is in deze studie gebruik gemaakt van de Emissieregistratie (RIVM 2017). De Emissieregistratie geeft de emissie in Nederland en op het Nederlandse continentaal plat van honderden milieuschadelijke stoffen naar lucht, oppervlaktewater en bodem. Voor het bepalen van de emissies hanteert de Emissieregistratie een bottom-upmethode, dat wil zeggen een methode die uitgaat van het meten van emissies bij installaties van bedrijven en andere instellingen. Deze methode maakt het ook mogelijk om emissies op te tellen tot het totaal voor Nederland, en tot totalen voor 'doelgroepen'. Doelgroepen zijn de actoren waarop het beleid zich richt. De doelgroepen komen ongeveer overeen met de bedrijfssectoren, aangevuld met consumenten en een sector verkeer en vervoer. De emissies van de verschillende vervoersmiddelen worden namelijk niet toegekend aan de doelgroep die het vervoersmiddel gebruikt, en apart als doelgroep verkeer en vervoer gerapporteerd. In totaal onderscheidt de Emissieregistratie dertien doelgroepen, die overigens in zowel economische als milieuschadelijke omvang sterk van elkaar verschillen. Tot slot geeft de Emissieregistratie ook de emissies afkomstig van de natuur.

Specifiek van belang is de bepaling van de broeikasgassen. Voor de broeikasgassen geeft de Emissieregistratie naast de emissie die volgens hun eigen methodiek is bepaald, ook de emissies volgens de IPCC-methode. De Emissieregistratie geeft de feitelijke emissies die plaatsvinden in Nederland en op het Nederlandse continentaal plat. De belangrijkste verschillen zijn dat volgens de IPCC-methode de kortcyclische emissies, de emissies door de zeescheepvaart en de natuurlijke emissies niet hoeven worden gerapporteerd. Daarnaast zijn de emissies van het wegverkeer bij de IPCC-methode gebaseerd op de verkoop in Nederland van motorbrandstoffen, terwijl de Emissieregistratie die baseert op het aantal in Nederland verreden kilometers. Voor de luchtvaart hoeft van de IPCC alleen de emissie voor de binnenlandse luchtvaart te worden meegenomen, terwijl de Emissieregistratie alle emissies bij de start- en landingscyclus (LTO) meeneemt.³ Tot slot gebruikt de IPCC een top-downmethode bij de toekenning van emissies aan sectoren en worden de emissies door decentrale elektriciteitsopwekking aan de energiesector toegekend terwijl de Emissieregistratie deze aan de sector toekent die de elektriciteit opwekt.

In overleg met de Emissieregistratie is besloten om voor deze studie de emissie van broeikasgassen, met uitzondering van die voor verkeer, te bepalen aan de hand van de IPCC-methode. Voor verkeer geeft de aanpak van de Emissieregistratie, gebaseerd op het daadwerkelijk verreden aantal kilometers, een beter beeld van de in Nederland geëmitteerde stoffen dan de aanpak van IPCC, die geen rekening houdt met grenstanken. Bovendien neemt de Emissieregistratie ook de emissie van de zeescheepvaart mee. In hoofdstuk 4 vergelijken we de milieuschade op basis van de hier gepresenteerde broeikasgasemissies met die volgens de methode van de Emissieregistratie en van het IPCC.

Verder rapporteert de Emissieregistratie de emissies naar het oppervlaktewater niet direct. Deze zijn hier bepaald als het verschil tussen de emissies naar riolering en oppervlaktewater en naar alleen riolering. Daarnaast komt ook een deel van de emissie naar de riolering uiteindelijk in het oppervlaktewater terecht. Aan de hand van aandelen over de emissie naar de riolering die uiteindelijk in het oppervlaktewater terecht komt (PBL et al. 2017), is voor de belangrijkste stoffen, dat wil zeggen de stoffen met de hoogste milieuschade, de uiteindelijke

³ Hiervoor gebruikt de Emissieregistratie de methode van de US Environmental Protection Agency (EPA), die ook is overgenomen door de Internationale Burgerluchtvaartorganisatie (ICAO). Dat betekent dat de schade van het taxiën, starten, opstijgen tot 3.000 voet (ongeveer één kilometer) en het dalen vanaf ongeveer 3.000 voet wordt meegenomen (Klein et al. 2017).

emissie naar het oppervlaktewater vastgesteld. Voor de overige stoffen is, als bovengrens, gerekend met de totale emissie naar riolering en oppervlaktewater.

2.3 Het bepalen van milieuprijzen

Zoals hiervoor aangegeven, is het voor een monetaire waardering van de milieuschade nodig om niet alleen de fysieke omvang van de emissies te bepalen, maar ook de fysieke impact van die emissies vast te stellen, oftewel de (fysieke) milieuschade. Deze milieuschade is het gevolg van de emissie van schadelijke stoffen naar lucht, water en bodem. Daar zorgen deze emissies voor fysieke veranderingen, gewoonlijk in de vorm van een achteruitgang, in de kwaliteit van de lucht of het aantal soorten. Hierdoor ontstaan dan weer negatieve effecten op gezondheid, ecosystemen of bouwwerken. Gewoonlijk wordt de schade daarom vastgesteld op deze zogenoemde 'eindpunten'.

Om de milieuschade terug te vertalen naar de veroorzakende emissies worden de emissies eerst vertaald naar concentraties of deposities van stoffen binnen een bepaalde geografische eenheid. Met behulp van zogenoemde bron-receptormatrices wordt vervolgens bepaald hoe de concentraties of deposities van een stof binnen de onderscheiden geografische gebieden veranderen als de emissie van die stof verandert (CE Delft 2017a). Daarbij kan ook rekening worden gehouden met interacties tussen stoffen. Als de concentraties en deposities van de stoffen bekend zijn, wordt met concentratieresponsfuncties bepaald hoe deze zijn gerelateerd aan de milieuschade voor gezondheid, ecosystemen en gebouwen. Het is mogelijk daarbij rekening te houden met specifieke situaties, zoals verschillen in de gezondheidsschade als gevolg van een stof bij kinderen of bij ouderen. Ook kan rekening worden gehouden met de bevolkingsomvang en -samenstelling in een bepaald geografisch gebied. Voor ecosystemen en bouwwerken geldt, *mutatis mutandis*, hetzelfde.

Voor monetarisering van effecten die niet of beperkt op een markt verhandelbaar zijn, zoals gezondheid of gezondheidsschade, is het nodig de monetaire waarde van dit niet-verhandelbare effect te bepalen. Hiervoor bestaan verschillende waarderingsmethoden, in het bijzonder de schadekosten- en preventiekostenmethode (zie ook Vollebergh et al. 2014: 80-82). In de *schadekostenmethode* is de waardering van de schade afhankelijk van de wijze waarop individuen die schade waarderen. Daarbij worden de individuele waarden vervolgens geaggregeerd. Om te achterhalen hoe individuen de milieuschade waarderen, zijn verschillende methoden ontwikkeld, zoals hedonische prijzen of *contingent valuation* (Perman et al. 2011). Een klassiek voorbeeld is het bepalen van de monetaire schade van geluidsoverlast of een minder fraai uitzicht. Hiervoor worden bijvoorbeeld verschillen in huizenprijzen gebruikt tussen woningen met geluidsoverlast respectievelijk met een storend uitzicht en woningen zónder geluidsoverlast respectievelijk met een mooi uitzicht. Het prijsverschil op de huizenmarkt kan objectief worden gemeten en geeft dan informatie over wat mensen gemiddeld ten minste extra over hebben om in een woning met een mooi uitzicht of zonder geluidsoverlast te wonen, en daarmee over de schade die geluidsoverlast of horizonvervuiling veroorzaken. Met behulp van dit soort schaduwrijzen kan de (totale) waarde van milieuschade worden bepaald als het aantal gehinderden bekend is.

Volgens de *preventiekostenmethodiek* wordt uitgegaan van *gegeven* milieudoelen en wordt nagegaan welke kosten moeten worden gemaakt om die doelen te halen. Deze doelen zijn in feite de door de overheid *geopenbaarde voorkeuren*, vastgelegd in wetgeving of in beleid verankerde streefwaarden. Vervolgens kan gebruik worden gemaakt van een (bottom-up) kostencurve die een inschatting geeft van de ex ante marginale bestrijdingskosten bij verschillende niveaus van emissiereductie. De schaduwprijs voor emissies van een bepaalde stof is dan gelijk aan de kosten van de duurste techniek die nodig is om de emissies van deze stof zo ver terug te dringen dat het doel wordt gerealiseerd. In de preventiekostenmethode is de waardering van de schade afhankelijk van de (impliciete)

waardering door de overheid, die tot uitdrukking komt in de striktheid van de doelstellingen. Voor zover deze doelstelling is gekozen *door de overheid* en wordt aangenomen dat deze de individuele voorkeuren van de burgers weerspiegelt, geven de schadekosten- en preventiekostenmethodiek hetzelfde optimum.

Over de praktische bruikbaarheid van de methoden bestaat veel discussie, zeker wanneer deze worden gebruikt om de schade door klimaatverandering te bepalen. Niettemin is het in de beleidspraktijk inmiddels gemeengoed om dergelijke schaduwrijzen toe te passen, ook in het geval van klimaatverandering en luchtverontreiniging. Dat geldt ook voor Nederland, waar in de maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) milieuschade eveneens in geld wordt gewaardeerd (CE 2010a, b; Romijn en Renes, 2013; CE Delft 2017a). Deze studie sluit aan bij die beleidspraktijk. Voor de studie is gebruik gemaakt van de meest recente gegevens die zijn vastgesteld in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft 2017a). Deze prijzen zijn gebaseerd op diverse wetenschappelijke studies en studies voor de Europese Unie (NEEDS), waarbij bovendien rekening is gehouden met voorschriften en aanbevelingen die gelden voor het maken van MKBA's in Nederland. Dit neemt niet weg dat er nog steeds volop discussie mogelijk is over de schaduwrijzen. Daarom besteden we in hoofdstuk 4 uitgebreid aandacht aan een gevoeligheidsanalyse waarbij een aantal discussiepunten over beprijzing aan de orde komt.

2.4 De milieuprijzen voor Nederland

Het Handboek Milieuprijzen geeft de schaduwrijzen voor een kilogram geëmitteerde stof (CE Delft 2017a). De schaduwrijks van een stof geeft dus de waarde van de schade als gevolg van één extra kilogram emissie van die stof. Deze schaduwrijzen zijn, met uitzondering van de schaduwrijks voor de broeikasgassen, bepaald met behulp van de hiervoor besproken schadekostenmethodiek.

Om de schaduwrijzen voor *gezondheidsschade* van de milieuschadelijke stoffen te kunnen bepalen, wordt eerst de fysieke milieuschade gewaardeerd. De monetaire waarde van gezondheidsschade hangt daarbij af van de waarde van een verloren levensjaar (*Value of a Life Year*, VOLY). Dat geldt zowel voor acuut overlijden en voortijdig overlijden als voor ziekte. Voor de waardering van een verloren levensjaar sluit het Handboek Milieuprijzen aan bij de Werkwijzer MKBA Sociaal Domein (Koopmans et al. 2016). In die werkwijzer wordt de waarde voor een voor kwaliteit gecorrigeerd levensjaar (*Quality-adjusted Life Year*, QALY) gesteld op 50.000 tot 100.000 euro. Omdat een VOLY niet gelijk is aan een QALY, wordt in het Handboek Milieuprijzen een VOLY afgeleid van de waarde van de QALY uit de Werkwijzer MKBA Sociaal Domein (zie hiervoor CE Delft 2017a: 66-67; 70-71 en appendix C). De waarde van een VOLY is dan 50.000 euro tot 110.000 euro. Als middenwaarde wordt 70.000 euro genomen. Een meta-analyse van de OESO komt op een soortgelijke waardering van een verloren levensjaar (OESO 2012). Naast de schade door overlijden en ziekte is er ook nog gezondheidsschade doordat er door ziekte arbeidsuren verloren gaan. Hiervoor wordt een waarde van 175 euro per verloren dag gebruikt. Dit bedrag is bepaald door de totale beloning van arbeid in Nederland (loon en sociale lasten) te delen door het gewerkte aantal dagen, waarbij het bedrag inclusief btw is.

Voor de *waardering van ecosystemen* wordt gebruik gemaakt van de waardering van het verlies aan biodiversiteit. Het gebruik van biodiversiteit als proxy voor de intrinsieke en extrinsieke waarde van ecosystemen kan volgens het Handboek Milieuprijzen worden gerechtvaardigd vanwege de essentiële rol die biodiversiteit heeft voor de kwaliteit van ecosysteemfuncties (CE Delft 2017a: 72-73). De waarde die het Handboek Milieuprijzen gebruikt, is gebaseerd op een meta-analyse van diverse studies die biodiversiteitsverlies

waarderen (Kuik et al. 2008).⁴ Biodiversiteit wordt daarin gewaardeerd met behulp van de potentieel verloren fractie (PDF) per vierkante meter per jaar. De waarde van een PDF per vierkante meter per jaar is bepaald met behulp van een meta-analyse van 24 studies, waarin 42 waarderungen van biodiversiteitsverlies zijn meegenomen. In deze studies wordt de overgang van het ene type landgebruik naar een ander type landgebruik gewaardeerd. Omdat van beide typen landgebruik bekend is wat daarin de (gestandaardiseerde) biodiversiteit is, kan worden bepaald met hoeveel verlies (of winst) aan biodiversiteit de overgang naar een ander type landgebruik gepaard gaat. Vervolgens kan ook worden bepaald met welk bedrag dat verlies aan biodiversiteit wordt gewaardeerd. Uit deze meta-analyse volgt een gemiddelde waarde van, omgerekend naar euro's uit 2015, 0,64 euro per vierkante meter per jaar. Ook de milieuschade aan landbouwgewassen komt in het Handboek Milieuprijzen bij de schade aan biodiversiteit aan de orde. Deze wordt gewaardeerd tegen de marktprijzen van de landbouwgewassen.

Tot slot is er nog de milieuschade aan *bouwwerken*. Hiervoor zijn schaduwrijzen bepaald voor de corrosie van metalen, steensoorten en verf door verzuring, voor de aantasting van cultureel erfgoed door corrosie van de kalkhoudende steensoorten en door verzuring, voor de schade aan gebouwen door fijnstof (met name door roet; er is verondersteld dat secundair fijnstof géén schade aan gebouwen veroorzaakt) en voor de schade aan rubber door ozon (CE Delft 2017a: 82). Voor de eerste drie typen schade is de waardering van de milieuschade gebaseerd op onderhouds- of herstelkosten.

Met behulp van de waarderungen van de schade aan gezondheid, ecosystemen en bouwwerken en de informatie over de schadelijke effecten die een stof veroorzaakt, kan vervolgens voor elke stof een schaduwrijz worden vastgesteld voor de emissie van één kilogram stof. In het Handboek Milieuprijzen is dat gedaan voor een groot aantal stoffen, waarbij er aparte schaduwrijzen zijn berekend voor de emissie naar lucht, water en bodem. Bovendien is voor elke stof een lage en een hoge waarde van de schaduwrijz bepaald voor gebruik in MKBA's en een middenwaarde voor andere doeleinden dan MKBA's. Deze middenwaarden van de schaduwrijzen gebruiken we in deze studie. De lage en hoge waarde zijn voor de onzekerheidsanalyse gebruikt (zie hoofdstuk 4).

De schaduwrijz van een stof geeft de schade die wordt veroorzaakt bij een *gemiddelde* concentratie van die stof in de lucht of bij een gemiddelde depositie van de stof in het oppervlaktewater of op de bodem. Lokaal kan de concentratie of depositie, en daarmee de schade, hoger of lager zijn. Dit is met name relevant als de emissie bijvoorbeeld plaatsvindt in een dichtbevolkt of juist dunbevolkt gebied. Met dergelijke lokale effecten is bij het bepalen van de schaduwrijzen in dit rapport geen rekening gehouden. Een uitzondering is hierbij gemaakt voor het fijnere fijnstof (PM_{2,5}). Daarvoor is een aparte, hogere, prijs gegeven voor de emissie door het wegverkeer, omdat deze gewoonlijk in dichter bevolkte gebieden en ook op kortere afstand van de bewoners plaatsvindt dan schoorsteenemissies van het fijnere fijnstof.

Tot slot verdienen nog de gebruikte schaduwrijzen voor broeikasgassen een afzonderlijke vermelding (zie ook appendix C). Deze volgen namelijk de hiervoor besproken preventiekostenmethodiek. Dit is conform het advies van de Werkgroep Discontovoet (Ministerie van Financiën 2015). Naar aanleiding van het advies van deze werkgroep is besloten om voor de klimaat effecten gebruik te maken van CO₂-prijzen die in de tijd oplopen volgens een vooraf door het CPB en PBL vastgesteld beleidspad (Ministerie van Financiën 2015: 7). Dat pad is uitgewerkt in de studie Welvaart en Leefomgeving (WLO) van 2015 (CPB & PBL 2015).

⁴ De studie van Kuik et al. (2008) was onderdeel van het langjarige Europese onderzoeksproject NEEDS. Dat project had tot doel om alle kosten en baten van energiebeleid en toekomstige energiesystemen te evalueren. Daarvoor werd de bestaande methodologie om externaliteiten te bepalen en te waarderen verbeterd en uitgebreid. In NEEDS wordt de schaduwrijz voor biodiversiteit die hier is besproken, ook gebruikt.

In deze notitie wordt de middenwaarde van de schaduwrijzen voor de broeikasgassen voor 2015 gebruikt. Deze is gelijk aan de ('efficiënte') prijs voor 2015 in het WLO-scenario Hoog. Voor de gevoeligheidsanalyse wordt naast efficiënte prijzen voor Laag en Hoog ook gebruik gemaakt van een efficiënt CO₂-prijspad voor een tweegradenscenario. De milieuprijzen hiervan liggen beduidend hoger dan het prijspad voor Hoog (zie verder toelichting in de appendix B en paragraaf 4.2). Omdat de Nederlandse overheid zich uitdrukkelijk heeft gecommitteerd aan het akkoord van Parijs, is ervoor gekozen om in de figuren in deze notitie standaard het milieuprijspad van het tweegradenscenario uit de WLO mee te nemen.

Bij de hoogte van de milieuprijs voor broeikasgassen moet dus worden bedacht dat deze in deze studie is gebaseerd op de preventiekosten.⁵ Daarom neemt de milieuprijs van die kosten toe naarmate het klimaatdoel stringenter wordt, en dit ondanks de daarmee gepaard gaande afname van de fysieke schade. De hogere schaduwprijs is dus niet het gevolg van een hogere fysieke milieuschade (waardoor een extra kilo emissie meer schade veroorzaakt en de schaduwprijs toeneemt), maar van een hogere waardering van de schade en de daaraan gekoppelde beleidsintensivering. Hierdoor krijgt dezelfde fysieke schade een hogere prijs.

2.5 Naar de monetaire milieuschade in Nederland

Om uiteindelijk de monetaire milieuschade in Nederland te kunnen berekenen is het noodzakelijk dat voor elke door de Emissieregistratie geïnventariseerde stof ook een milieuprijs in het Handboek Milieuprijzen beschikbaar is. Uiteindelijk zijn van het handboek alle stoffen meegenomen die in de bijlage daarvan zijn weergegeven en waarvan tevens in de Emissieregistratie een emissie-omvang is gegeven (zie ook appendix A).

Naast de schaduwrijzen in de bijlage van het handboek, zijn er ook schaduwrijzen beschikbaar via de website van CE Delft. Ook daarvan is in deze studie gebruik gemaakt, waardoor nog meer stoffen konden worden toegevoegd. Dit geldt bijvoorbeeld voor alle stoffen die in de Emissieregistratie worden weergegeven als zeer zorgwekkende stoffen. Dezelfde procedure is gevolgd voor stoffen die in het Europese Pollutant Release Transfer Register (PRTR) staan en voor de stoffen die volgens de Kaderrichtlijn Water 2015 tot de probleemstoffen behoren. Tot slot is voor alle zware metalen en polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) nagegaan of er een prijs beschikbaar is en zijn de chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's) en gehalogeneerde koolwaterstoffen (HCFK's) toegevoegd.

In totaal bleek het zo mogelijk om de milieuschade te bepalen van 59 milieuschadelijke stoffen met een emissie naar de lucht, van 74 milieuschadelijke stoffen met een emissie naar de riolering en het oppervlaktewater en van 38 milieuschadelijke stoffen met een emissie naar de bodem. De totale lijst van stoffen is weergegeven in appendix A. Behalve de meer bekende lijst van broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen gaat het onder andere ook om diverse chloorverbindingen, zware metalen, polycyclische aromatische koolwaterstoffen, gewasbeschermingsmiddelen en dioxines. De resultaten van de berekeningen worden in het volgende hoofdstuk weergegeven en besproken.

Hoewel een groot aantal stoffen is meegenomen om de monetaire milieuschade in Nederland te bepalen, geldt dat niet voor alle milieuschadelijke stoffen. Van de ontbrekende stoffen zijn ons echter geen stoffen bekend waarvan in de literatuur een substantiële milieuschade is gerapporteerd. Zoals eerder aangegeven, wordt ook de schade aan de leefomgeving die andere oorzaken heeft dan de emissie van milieuschadelijke stoffen, niet meegenomen. In

⁵ Hierbij moet overigens worden geconstateerd dat de variatie in milieuprijzen gebaseerd op schadekosten niet veel afwijkt van wat in deze studie op basis van preventiekosten wordt berekend (zie Vollebergh et al. 2014: 82ff).

hoofdstuk 4 wordt voor een aantal andere oorzaken een indicatieve inschatting gemaakt van de monetaire milieuschade.

Tot slot is het goed om de belangrijkste verschillen aan te geven tussen deze studie en die naar de mogelijkheden om de belasting te verschuiven naar grondstoffen (zie Vollebergh et al. 2017). In de laatste studie zijn ook schattingen gepresenteerd waarbij de monetaire milieuschade in Nederland een waarde heeft van 38 miljard euro in 2007. Het ging daarbij om schadeberekeningen op basis van het Multiregionale Input-Outputmodel Exiobase, die waren bedoeld om de verwerking van grondstoffen en materialen en de daaraan gekoppelde emissies van Nederland te vergelijken met die van met andere landen.⁶ Toen is al geconstateerd dat het noodzakelijk is om de representativiteit en de kwaliteit van deze data nader te onderzoeken (zie Vollebergh et al. 2017: 93-94). De huidige studie kan worden beschouwd als een vervolganalyse van de daar gepresenteerde directe emissies in Nederland.

In beide studies is overigens uitgegaan van dezelfde milieuprijzen. Dat impliceert dat alle verschillen zijn terug te voeren op fysieke verschillen in de emissies. De volgende verschillen zorgen met name voor het andere beeld in de onderhavige studie. Ten eerste betreft Vollebergh et al. (2017) een berekening van de schade door de productie van grondstoffen en materialen in Nederland. Daarom is bijvoorbeeld de schade door landbouw en consumptie in die studie niet meegenomen en in de onderhavige wel. Ten tweede zijn in Vollebergh et al. (2017) fysieke data voor 2007 gebruikt en in de huidige studie data voor 2015. Inderdaad zijn bepaalde emissies in de tussenliggende periode fors afgenomen vanwege onder meer het gevoerde beleid. Ten derde is al in Vollebergh et al. (2017) geconstateerd dat er forse verschillen zijn met de data van de Emissieregistratie in 2007. Zo vielen forse onder- en overschattingen op bij de overige broeikasgassen, methaan, ammoniak en grove fractie fijnstof.⁷ Zoals al aangegeven in het rapport uit 2017, dienen deze berekeningen met de nodige voorzichtigheid te worden gehanteerd. De aldaar genoemde bedragen kunnen niet zomaar worden vergeleken met de in deze studie berekende waarden.

⁶ Voor het doel van de studie over het afpalen van een mogelijk zinvol in te voeren grondstofbelasting was het voldoende om een indicatie te hebben van de aard van de schade gerelateerd aan het grondstof- en materiaalverbruik in Nederland en welk type milieuschade zich voordoet bij welke producten in de verschillende fasen van het productieproces.

⁷ Een uitgebreide verschillenanalyse is op aanvraag beschikbaar.

3 De monetaire milieuschade in Nederland

Dit hoofdstuk gaat over de stand van zaken in 2015 met betrekking tot de monetaire milieuschade in Nederland. Zoals in het vorige hoofdstuk aangegeven, combineren we in deze studie de cijfers van de Emissieregistratie over de geëmitteerde omvang van deze stoffen zoals bepaald door de Emissieregistratie (RIVM 2017) met de milieuprijzen zoals CE Delft (CE Delft 2017) die voor Nederland heeft berekend.

3.1 De monetaire milieuschade van verschillende stoffen

De totale monetaire milieuschade als gevolg van de emissie van schadelijke stoffen in Nederland bedraagt ruim 31 miljard euro (zie tabel 3.1 en figuur 3.1). Daarbij valt op dat bijna alle berekende schade voortkomt uit emissies naar de lucht. Het gaat dan vooral om de emissie van broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen waarvoor Europese afspraken zijn gemaakt om deze terug te dringen (de zogenoemde NEC-stoffen). Samen zijn de broeikasgassen en de NEC-stoffen verantwoordelijk voor ruim 98 procent van de milieuschade. De emissies naar oppervlaktewater en bodem zijn samen verantwoordelijk voor slechts ongeveer 0,5 procent van de totale milieuschade.⁸

Verder blijkt de milieuschade door de luchtverontreinigende NEC-stoffen met krap 19 miljard euro goed voor 61 procent van de totale schade. Deze is daarmee zelfs groter dan de milieuschade door broeikasgassen. De milieuschade door broeikasgassen bedraagt ongeveer 11,5 miljard euro, oftewel 37 procent van het totaal als wordt uitgegaan van een milieuprijs van 57 euro per ton CO₂: een prijs die hoort bij het prijspad van WLO Hoog. De andere stoffen die naar de lucht worden uitgestoten, dragen slechts ruim 0,3 miljard euro bij.

Uiteindelijk draait het om drie stoffen, te weten koolstofdioxide (CO₂), stikstofoxide (NO_x) en methaan (NH₃). Met name de schade van NO_x is opvallend: deze veroorzaakt alleen al ruim 12,25 miljard euro schade. Dat is meer dan de 9,75 miljard euro milieuschade door CO₂ bij een prijspad van WLO Hoog. Deze hoge schade komt mede doordat in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft 2017a) een additioneel gezondheidseffect aan NO_x wordt toegerekend, en is zeker in Nederland omstreden (Gezondheidsraad 2018). Daarom komen we hierop nog apart terug in de gevoeligheidsanalyse (paragraaf 4.6). Ammoniak (NH₃) tot slot zorgt voor bijna 4 miljard euro schade. Samen zorgen deze drie stoffen voor bijna 84 procent van de milieuschade. Van de overige stoffen veroorzaakt alleen nog de emissie van methaan (CH₄), SO₂ en het fijnere fijnstof (PM_{2,5}) meer dan 1 miljard euro schade, terwijl lachgas (N₂O) en NMVOS een schade van tussen de 100 miljoen en 1 miljard euro voor hun rekening nemen. Al de overige stoffen zijn verantwoordelijk voor nog geen 0,75 miljard euro schade, hetgeen ongeveer 2,25 procent van de totale monetaire milieuschade is.

⁸ Dit betekent niet dat er geen fysieke milieuschade naar bodem of water plaats heeft maar slechts dat de in geld uitgedrukte waarde van emissies die rechtstreeks naar bodem en oppervlaktewater plaatsvinden, op dit moment blijkbaar als (zeer) beperkt wordt aangemerkt.

Tabel 3.1 Emissie, milieuprijs (middenwaarden) en monetaire milieuschade van de meest relevante stoffen

		Emissie (in kton)	Prijs (in euro per ton)	Schade (in mln euro)		
Emissies naar lucht					30.920	99%
Klimaat (broeikasgassen)						
Koolstofdioxide	CO ₂	171.913	57	9.730		
Methaan	CH ₄	737	1.750	1.290		
Distikstofoxide	N ₂ O	29	15.000	428		
Fluorkoolwaterstoffen ¹	HFK's	2.311	57	131		
Overige broeikasgassen	PFK's, SF ₆			17		
<i>Subtotaal</i>					11.597	37%
Luchtverontreiniging NEC-stoffen						
Zwaveloxiden	SO ₂	44	24.900	1.083		
Stikstofoxiden	NO _x	355	34.700	12.324		
Ammoniak	NH ₃	128	30.500	3.901		
NMVOS		144	2.100	303		
Grovere fijnstof	PM _{2,5-10}	14	4.930	68		
Fijnere fijnstof	PM _{2,5}	17	79.500	1.314		
<i>Subtotaal</i>					18.993	61%
Luchtverontreiniging overige stoffen						
Chloorfluorkoolstoffen	CFK's	0,1	435595	33		
Hydrochloorfluorkoolstoffen	HCFK's	0,7	93135	65		
Kwik	Hg	0,0007	34.500.000	25		
Lood	Pb	0,0088	5.910.000	52		
Overige zware metalen (8) ²				13		
Koolstofmonoxide	CO	614	96	59		
Fluoriden, anorganisch	HF	0,5	57.000	26		
Formaldehyde	CH ₂ O	1	26.300	32		
Overige stoffen lucht (32) ²				26		
<i>Subtotaal</i>					330	1%
Emissies naar water					86	0%
Stikstof	N	23	3.110	71		
Fosfor	P	3	1.900	6		
Zware metalen (14) ²				6		
Overige stoffen water (58) ²				3		
Emissies naar bodem					75	0%
Stikstof	N	278	227	63		
Fosfor	P	7	101	1		
Zware metalen (11) ²				10		
Overige stoffen bodem (25) ²				1		
Totaal					31.086	100%

Bron: eigen berekeningen PBL op basis van Emissieregistratie (RIVM 2017) en CE Delft (2017)

¹ Omvang emissie en schaduwprijs uitgedrukt in CO₂-equivalenten.

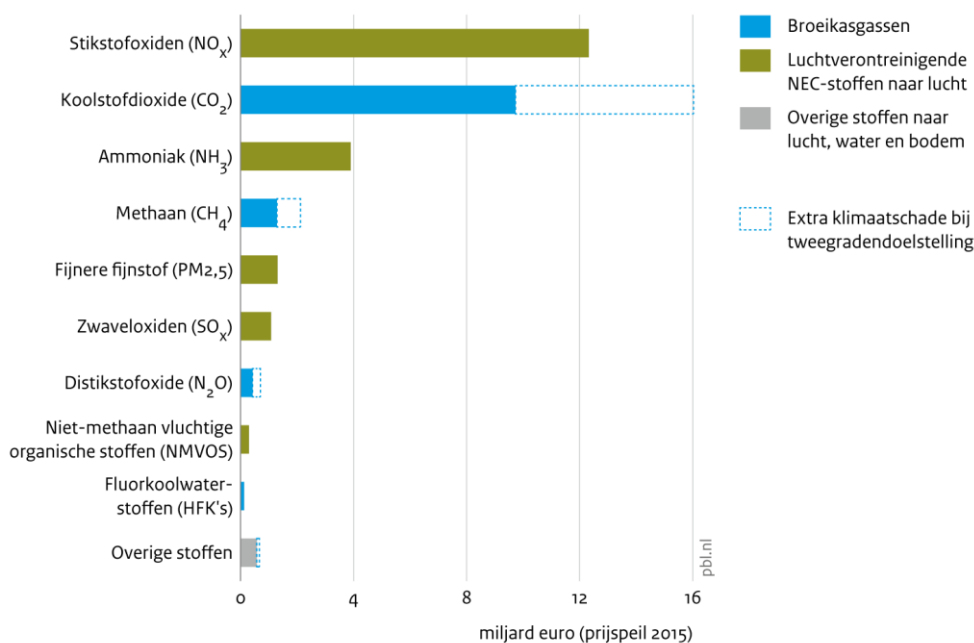
² Het aantal stoffen staat tussen haakjes.

³ Dit is de gemiddelde prijs. Voor wegverkeer geldt een schaduwprijs van 149.350 euro per ton en voor overige bronnen van 66.369 euro per ton.

Bij broeikasgassen geeft de figuur tevens het effect op de monetaire schade weer van een milieuprijs volgens de preventiekostenbenadering die past bij de Tweegradendoelstelling. De milieuschade wordt voor dat scenario veel hoger ingeschat dan bij de middenwaarde zoals berekend in WLO Hoog en komt neer op een prijs van Euro 93 in 2015.⁹ In dat geval veroorzaakt CO₂ wel de meeste schade in Euro's, in totaal zo'n 16 miljard. Voor Nederland als geheel bedraagt de monetaire milieuschade in dat geval 38½ miljard euro en is het aandeel van broeikasgassen in dat geval zo'n 50%.

Figuur 3.1

Monetaire milieuschade per veroorzakende stof, 2015



Er is ook sprake van forse onzekerheid over de schade die met name stikstofoxiden (NO_x) veroorzaken. Conform de referentieberekening gebaseerd op de milieuprijs van CE Delft (CE Delft 2017a) is NO_x het meest schadelijke gas in het kader van de luchtverontreiniging. Dit hangt samen met het feit dat in deze berekening rekening is gehouden met een mogelijk extra schadelijkheidseffect van NO_x (los van fijnstof en ozon). Wanneer dit effect niet zou worden meegenomen, halveert de totale schade door NO_x en gaat het om nog maar 6,4 miljard in plaats van 12,3 miljard euro. De totale milieuschade zou dan 25,2 miljard euro bedragen in plaats van 31,1 miljard euro. Hierop komen we terug in paragraaf 4.4.

Opvallend is verder dat met name de omvang van veel uiterst vervuilende stoffen met zeer hoge milieuprijzen, zoals kwik en lood maar ook dioxine en andere polychloorverbindingen, uiteindelijk maar een heel beperkte bijdrage leveren aan de totale monetaire milieuschade. Dat komt met name doordat zij een beperkte omvang hebben en nauwelijks meetellen in het totaal van de monetaire schade. Voor een belangrijk deel is dit terug te voeren op het

⁹ Ter vergelijking: de schaduwprijs in het bekende Stern-rapport van 2007 bedroeg 120 euro per ton (zie Stern 2006; en Vollebergh et al. 2014: 83).

milieubeleid van de afgelopen decennia, dat via allerlei milieuwetgeving heeft gezorgd voor een veel geringere belasting door directe lozingen van met name zeer vervuilende stoffen zoals asbest en dioxines. Er is in de loop der jaren ook voor veel van dit soort risicostoffen apart beleid gevoerd – het prioritair stoffenbeleid – om het volume ervan terug te dringen (vergelijk PBL 2014).

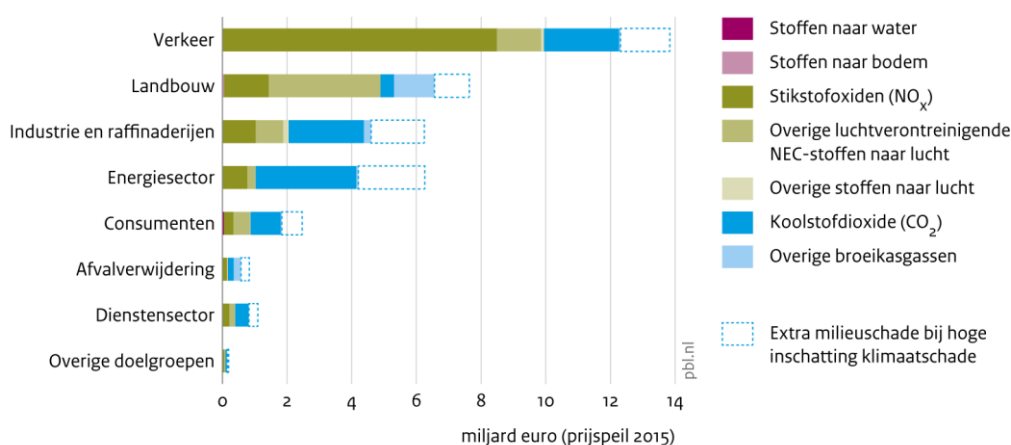
Zoals al opgemerkt, is het verder opvallend dat de monetaire milieuschade van emissies naar water en bodem zo laag zijn. Het gaat daarbij vooral om schade aan de biodiversiteit. De lage monetaire milieuschade door emissies naar water en bodem kan dan een gevolg zijn van een lage fysieke schade of van een lage monetaire waardering van deze fysieke schade. Op de monetaire waardering van de fysieke schade aan biodiversiteit gaan we in hoofdstuk 4 nader in. Overigens gaat het hier alleen om de monetaire milieuschade die het gevolg is van stoffen die rechtstreeks naar water of bodem worden geëmitteerd. Milieuschade als gevolg van depositie naar water of bodem van stoffen die worden geëmitteerd naar de lucht, zoals het geval is bij verzuring, vallen onder de schade door de emissies van stoffen naar de lucht. De schade die milieuschadelijke stoffen veroorzaken aan de biodiversiteit en aan bouwwerken, is gering in vergelijking met de gezondheidsschade die deze stoffen veroorzaken. Dat het belang van gezondheidsschade van met name luchtverontreinigende stoffen zo groot is, stemt overeen met andere studies naar de monetaire milieuschade van emissies naar de lucht.¹⁰

3.2 Monetaire schade verdeeld over doelgroepen

De Emissieregistratie biedt de mogelijkheid om de totale milieuschade te verbijzonderen naar de zogenoemde doelgroepen. Hierdoor is beter inzichtelijk te maken welke sectoren verantwoordelijk zijn voor welke schade. Figuur 3.2 geeft de verdeling van de schade over de verschillende doelgroepen weer. Daarbij zijn acht doelgroepen onderscheiden, respectievelijk verkeer en vervoer, landbouw, industrie, energiesector, diensten, consumenten, afvalverwijdering en overig.

Figuur 3.2

Monetaire milieuschade per doelgroep en veroorzakende stof, 2015



Bron: Emissieregistratie en CE Delft 2017

Merk op dat de emissies hierbij worden toegekend aan de doelgroep die de emissies veroorzaakt, oftewel de 'eindverbruiker'. Dit is tegelijkertijd de plaats waar de emissies

¹⁰ Zie bijvoorbeeld Muller et al. (2011) voor een vooraanstaande studie over de Verenigde Staten.

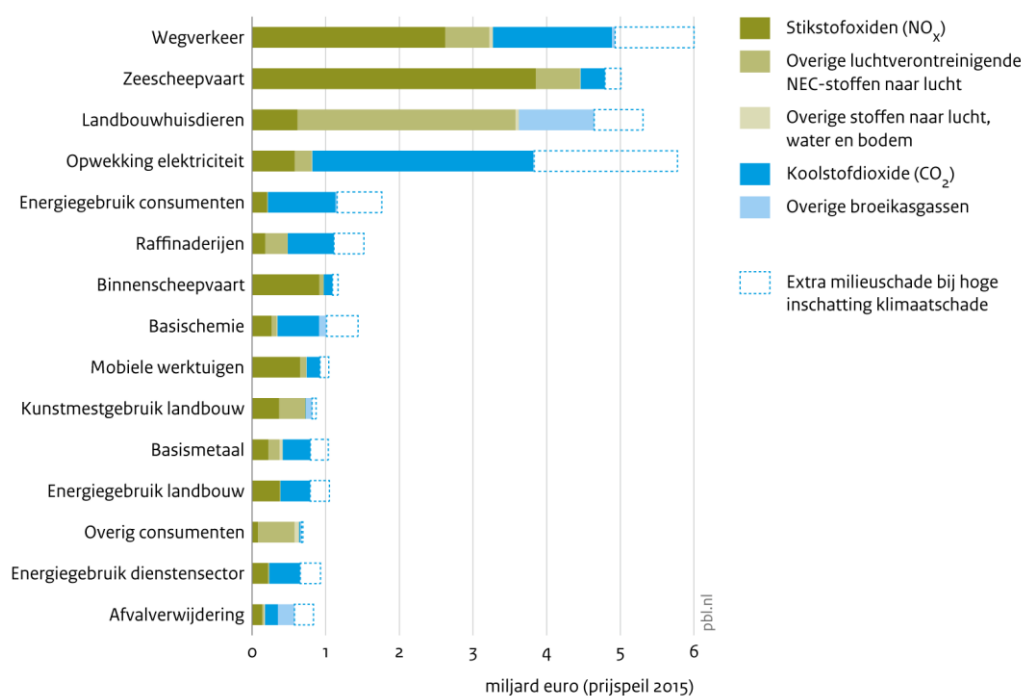
worden veroorzaakt. Zo wordt de milieuschade van aardgas toegekend aan bijvoorbeeld consumenten, die het gas verbruiken voor verwarming en koken, aan diensten, die het gas verbruiken voor verwarming, en de energiesector, die het verbruikt voor de opwekking van elektriciteit. De milieuschade door elektriciteit wordt niet toegekend aan de eindverbruikers, maar aan de energiesector die verantwoordelijk is voor de productie ervan. Ook de milieuschade door het gebruik van vervoersmiddelen wordt niet toegekend aan de eindverbruikers, maar aan de aparte doelgroep verkeer en vervoer.

Uit figuur 3.2 blijkt duidelijk dat de meeste milieuschade wordt veroorzaakt door verkeer en vervoer en dat het beeld niet verandert als rekening wordt gehouden met de extra schade wanneer de klimaatschade vanwege de tweegradendoelstelling hoog wordt ingeschat. De doelgroep verkeer en vervoer zorgt voor ruim 12,25 miljard euro schade bij het prijspad van WLO Hoog. Ruim twee derde van de schade bij verkeer is het gevolg van de uitstoot van NO_x. Bij deze doelgroep heeft de hoge milieuprijs voor NO_x dus het meeste effect. Daarna komt de sector landbouw, die ruim 6,5 miljard euro schade veroorzaakt, waarvan ruim de helft afkomstig is van ammoniak en ongeveer 40 procent van methaan en lachgas. De industrie en de raffinaderijen samen zijn verantwoordelijk voor ongeveer 4,5 miljard euro en de energiesector voor ongeveer 4,25 miljard euro. Consumenten zorgen voor een schade van zo'n 1,75 miljard euro. Afvalverwijdering en de dienstensector dragen slechts beperkt bij aan de directe milieuschade. Bij afvalverwijdering past wel de kanttekening dat de milieuschade van het restafval van de afvalverbrandingsinstallatie (AVI's) (zoals bodemas) niet in de waardering is meegenomen (zie paragraaf 4.7).

Bij de energiesector wordt de milieuschade vooral veroorzaakt door CO₂, net als bij de industrie en de raffinaderijen. Opvallend is het veel grotere aandeel van de luchtverontreinigende emissies in de verkeers- en vervoerssector en de landbouw. Bij verkeer komt dit vooral door de emissie van NO_x en in mindere mate door het fijnere fijnstof (PM_{2,5}). Bij landbouw is het vooral ammoniak die bijdraagt aan de totale milieuschade.

Figuur 3.3

Activiteiten met grootste monetaire milieuschade per veroorzakende stof, 2015



Bron: Emisierregistratie en CE Delft 2017

Binnen de doelgroepen vinden er heel diverse activiteiten plaats die voor de milieuschade zorgen. Figuur 3.3 geeft vijftien subdoelgroepen weer waarvan de milieuschade meer dan een half miljard euro is (zie appendix C voor een uitgebreide weergave van alle subdoelgroepen). Vier subdoelgroepen springen er qua omvang van de milieuschade uit: het wegverkeer, de zeescheepvaart en de landbouwhuisdieren. Al deze subdoelgroepen veroorzaken een milieuschade van 4,5 à 5 miljard euro. De opwekking van elektriciteit zorgt voor ongeveer 3,75 miljard euro milieuschade. De andere activiteiten hebben een schade van minder dan 1,25 miljard euro en bestaan voor een groot deel uit activiteiten binnen de basisindustrie (basischemie, raffinaderijen, basismetalen), energieverbruik (voornamelijk aardgas door consumenten, landbouw en dienstensector) en verkeer (binnenvaart, mobiele werktuigen). Afvalverwijdering, het gebruik van kunstmest in de landbouw en overige activiteiten (anders dan energieverbruik) door consumenten complementeren de meest vervuilende activiteiten.

3.3 Milieuschade in Nederland en door Nederlanders

De Emissieregistratie geeft de milieuschade die plaatsvindt in Nederland en op het Nederlandse continentaal plat. Maar naast de milieuschade in Nederland kan ook de milieuschade worden bepaald die Nederlandse ingezetenen veroorzaken. In dat geval wordt rekening gehouden met emissies die Nederlanders hier en elders veroorzaken, bijvoorbeeld via reizen. De emissies door Nederlandse ingezetenen worden bepaald in de Milieurekeningen van het CBS. Ingezetenen zijn volgens het CBS personen en bedrijven die behoren tot de Nederlandse economie. Deze emissies zijn gelijk aan de emissies in Nederland plus de emissies door Nederlandse ingezetenen in het buitenland minus de emissies door buitenlanders in Nederland. De emissies van Nederlanders in het buitenland en buitenlanders in Nederland zijn vooral emissies door verkeer. In de Milieurekeningen zijn niet alle emissies weergegeven die hiervoor zijn geanalyseerd. Wel meegenomen zijn de belangrijkste broeikasgassen, de luchtverontreinigende NEC-stoffen en koolmonoxide. Deze stoffen zorgen echter voor meer dan 98 procent van de hiervoor berekende monetaire milieuschade in Nederland.

Met behulp van de emissies door Nederlandse ingezetenen is het mogelijk om voor negen stoffen en hun schaduwrijzen de milieuschade te berekenen. De schade voor Nederland is in dat geval 30,5 miljard euro en verschilt dus slechts marginaal van de schade inclusief alle andere stoffen. De schade door Nederlandse ingezetenen bedraagt voor deze stoffen ongeveer 36,25 miljard euro en is daarmee wel bijna 6 miljard euro hoger dan de schade in Nederland (tabel 4.7). Als ook rekening wordt gehouden met de schade van de andere stoffen, die niet in de Milieurekeningen zijn opgenomen, dan is de milieuschade veroorzaakt door Nederlandse ingezetenen bijna 37 miljard euro. Met name CO₂ en NO_x zijn verantwoordelijk voor zo'n 95 procent van deze extra schade.

Meer dan de helft van het verschil tussen de milieuschade in Nederland en de milieuschade veroorzaakt door Nederlandse ingezetenen wordt verklaard door de luchtvaart. Van de luchtvaart worden door de Emissieregistratie immers alleen de emissies bij de start- en landingscyclus (LTO) meegenomen (zie paragraaf 2.2), terwijl in de Milieurekeningen alle emissies van de Nederlandse ingezetenen die gebruik maken van de luchtvaart worden meegenomen.

Tabel 4.7 Milieuschade in Nederland en door Nederlandse ingezetenen in 2015 (in mln euro)

	In Nederland	Door Nederlandse ingezetenen ¹⁾
<i>Klimaat (broeikasgassen)</i>		
Koolstofdioxide ²⁾	9.730	10.766
Methaan	1.290	1.331
Distikstofoxide	428	428
<i>Luchtverontreiniging NEC-stoffen</i>		
Zwaveloxiden	1.083	1.198
Stikstofoxiden	12.324	16.965
Ammoniak	3.901	3.919
NMVOS	303	308
Fijnstof	1.382	1.275
<i>Luchtverontreiniging overige stoffen</i>		
Koolstofmonoxide	59	62
Totaal (referentie)	30.500	36.252
<i>Klimaat (extra twee graden)</i>		
Totaal (twee graden)	37.906	44.353

Bron: Eigen berekeningen op basis van Emissieregistratie, CE Delft en CBS Milieurekeningen

- 1) Milieuschade door Nederlandse ingezetenen gebaseerd op de emissies volgens de Milieurekeningen op CBS Statline.
- 2) Voor CO₂ is daarbij gecorrigeerd voor de kortcyclische emissies.

De milieuschade berekend volgens de Milieurekeningen bedraagt 3,5 miljard euro, terwijl de milieuschade door de luchtvaart in Nederland (door Nederlandse én buitenlandse luchtvaartbedrijven) nog geen 0,2 miljard euro bedraagt (tabel 4.8). Dit verklaart bijna 58 procent van de toename van de milieuschade. Dan blijft nog een verschil over van 2,3 miljard euro, waarvan 1,0 miljard euro het gevolg is van vervoer over water, zoals de zeescheepvaart, en de rest grotendeels valt toe te schrijven aan vervoer over land (Nederlandse transportbedrijven en vakantie).

Tabel 4.8 Milieuschade luchtvaart in Nederland en door Nederlandse ingezetenen in 2015 (in mln euro)

	In Nederland	Door Nederlandse ingezetenen
<i>Klimaat (broeikasgassen)</i>		
Koolstofdioxide	43	744
Methaan	0	0
Distikstofoxide	0	6
<i>Luchtverontreiniging NEC-stoffen</i>		
Stikstofoxiden	118	2.814
Zwaveloxiden	6	65
Ammoniak	0	0
NMVOS	1	3
Fijnstof	2	10
<i>Luchtverontreiniging overige stoffen</i>		
Koolstofmonoxide	0	1
Totaal	170	3.644
<i>Klimaat (extra twee graden)</i>		
Totaal	198	4.129

Bron: zie tabel 4.7

4 Gevoeligheidsanalyse

Met name de gebruikte milieuprijzen kennen de nodige onzekerheden, maar ook zijn er verschillen in de bepaling van de fysieke emissie in Nederland. Hierdoor kunnen soms grote verschillen in de uiteindelijke berekening van de monetaire milieuschade voor Nederland ontstaan. Dit hoofdstuk presenteert daarom een gevoeligheidsanalyse voor de verschillende factoren die hierbij een rol spelen.

4.1 Onzekerheden milieuprijzen

Zoals al aangegeven in hoofdstuk 2, kent de waardering van de milieuschade veel onzekerheden. Deze hebben betrekking op zowel de waardering van de schade die wordt veroorzaakt voor de gezondheid, de biodiversiteit, bouwwerken en de leefomgevingskwaliteit als de schade die een stof op deze eindpunten veroorzaakt. Voor de berekeningen in het vorige hoofdstuk zijn de centrale waarden van de milieuprijzen uit het Handboek Milieuprijzen gebruikt (CE Delft 2017a). Deze geven de best mogelijke schatting van de milieuschade weer.

Naast deze centrale waarden geeft het handboek ook onder- en bovenwaarden van de milieuprijzen, zoals voorgeschreven voor de maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) van het overheidsbeleid. Deze onder- en bovenwaarde geven een bandbreedte van de onzekerheid over de monetaire schadeberekeningen. Het is dus eenvoudig mogelijk om op basis van de gebruikte schaduwrijzen voor de onder- en bovengrens een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. De hiervoor gebruikte prijzen zijn weergegeven in appendix B.

De broeikasgassen vormen hierop een uitzondering; zie hoofdstuk 2. Zoals aangegeven is in onze basisberekening voor deze stoffen gebruik gemaakt van de bovenwaarde van de schaduwprijs in het handboek, die is gelijkgesteld aan de centrale waarde. Het gaat hier om een prijs van 57 euro per ton CO₂ in het WLO-scenario Hoog. Daarnaast is al een beeld gegeven van het effect van een prijs van 93 euro per ton CO₂, een prijs die overeenstemt met de keuze van de Nederlandse overheid om het klimaatakkoord van Parijs te ondertekenen. Dat klimaatakkoord is gericht op de doelstelling dat de temperatuur in de komende eeuw maximaal twee graden mag toenemen (zie hiervoor Aalbers et al. 2016; CE Delft 2017a: 40, 108). Deze berekening fungeert hier als bovengrens voor de broeikasgassen.

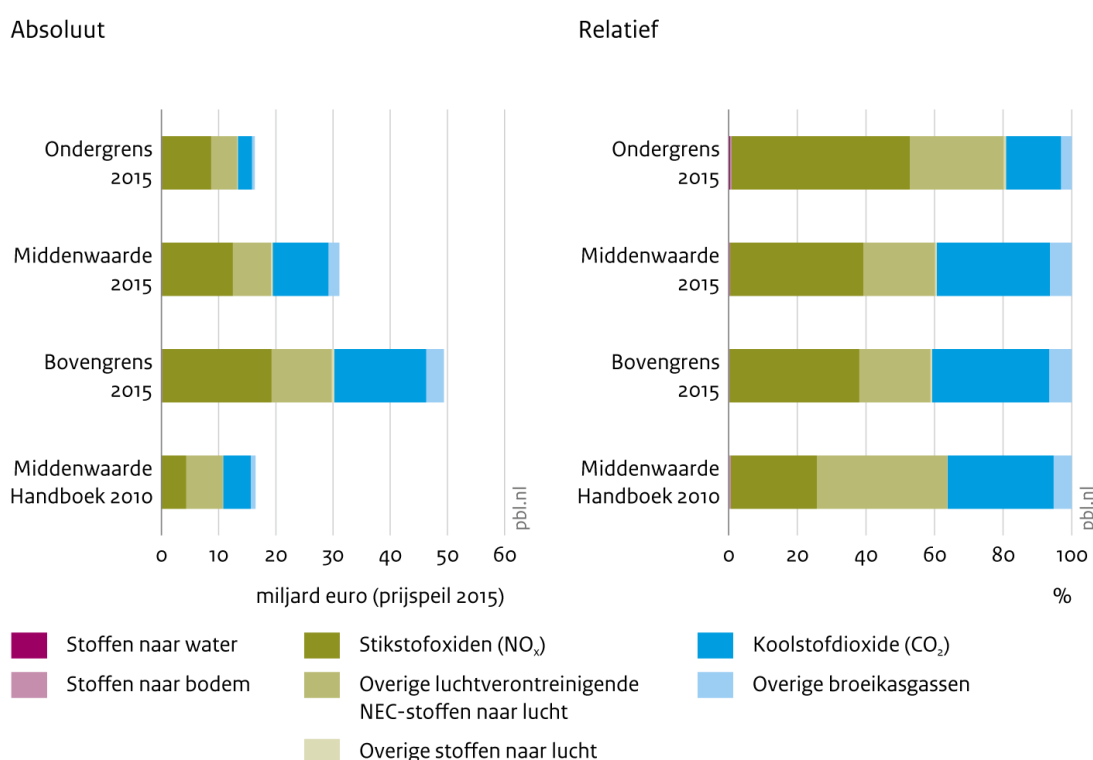
Een tweede vergelijking is die met de milieuprijzen volgens het oude Handboek Schaduwrijzen (CE 2010a). Deze prijzen lagen ten grondslag aan de berekeningen van de milieuschade van energieverbruik in Vollebergh et al. (2014; 2017). Van belang is namelijk dat de inschatting van de milieuprijzen in 2017 vaak (veel) hoger is dan in 2010. Voor CO₂ werd toen nog gerekend met een referentiewaarde op basis van schadekosten van 27 euro per ton (zie Vollebergh et al. 2014: 81-19). In de gevoeligheidsanalyse werd toen overigens ook gerekend met een prijs van 85 euro per ton.

Figuur 4.1 laat zien welk effect de gevoeligheidsanalyse van de milieuprijzen heeft op de totale monetaire milieuschade in Nederland. De bandbreedte die hierdoor ontstaat, is erg groot. De bovengrens van de totale schade bedraagt maar liefst ruim 49 miljard euro, terwijl

de ondergrens ruim 16 miljard euro is. De ondergrens van de huidige berekening ligt daarmee dicht bij de totale milieuschade van de gemiddelde waarden van de milieuprijzen uit het oude handboek. Voor de schade door broeikasgassen is de ondergrens 3 miljard euro bij een lage inschatting van de schade, de bovengrens bij een hoge inschatting is 19 miljard euro. Voor de NEC-stoffen is het effect minder groot. Voor de ondergrens is de schade zo'n 13 miljard in plaats van 19 miljard euro bij de referentieprijzen. Bij de bovengrens neemt de schade toe tot ruim 29,5 miljard euro. Hetzelfde geldt voor de overige schade door de emissie van stoffen naar lucht, water en bodem. De ondergrens is hier 0,34 miljard euro, de middenwaarde 0,49 miljard euro en de bovengrens 0,69 miljard euro. Niettemin maakt deze gevoeligheidsanalyse goed duidelijk hoe gevoelig dit soort berekeningen is voor de inschatting van de milieuprijzen.

Figuur 4.1

Monetaire milieuschade door aanpassing schaduwrijzen per veroorzakende stof



Bron: Emisierregistratie en CE Delft 2010 en 2017

Verder blijkt uit figuur 4.1 dat de samenstelling van de milieuschade naar stoffen bij het oude handboek heel anders was dan met name de ondergrens van de nieuwe prijzen. Het aandeel NO_x in de totale milieuschade was in het oude handboek dan ook veel kleiner. Hierdoor was het aandeel van CO₂, de andere broeikasgassen en de andere NEC-stoffen juist veel groter. Overigens is ook het aandeel NO_x bij de schaduwrijzen van het oude handboek veel kleiner in vergelijking met de middenwaarde, maar daar komt dat vooral ten goede aan de overige NEC-stoffen. Dit effect valt te verklaren doordat van alle broeikasgassen en NEC-stoffen de schaduwrijzen van NO_x in het nieuwe handboek het sterkst is gestegen ten opzichte van die in het oude handboek. Zoals eerder aangegeven, komen we hierop terug (zie paragraaf 4.4). De prijsstijging van de overige NEC-stoffen is juist gering in vergelijking met de prijsstijging van andere stoffen. Van ammoniak en NMVOS is de schaduwrijzen bij de middenwaarde in het nieuwe handboek zelfs lager dan die schaduwrijzen in het oude handboek.

4.2 Milieuprijs voor broeikasgassen

Aparte aandacht verdient de hoogte van de milieuprijs voor broeikasgassen. Zoals in hoofdstuk 2 aangegeven, zijn deze bepaald met behulp van de preventiekostenmethodiek. Daarbij wordt de schaduwprijs bepaald door de duurste maatregel die moet worden genomen om aan een bepaald doel te voldoen. In het Handboek Milieuprijzen (CE Delft 2017a; zie ook appendix C) is voor het middenpad uitgegaan van de doelstelling dat de temperatuurstijging in de komende eeuw maximaal 2,5 tot 3 graden bedraagt. Bij de afspraken tijdens de klimaatconferentie eind 2015 in Parijs is daarentegen afgesproken om wereldwijd te streven naar een maximale temperatuurstijging die duidelijk onder de twee graden ligt. De milieuprijs ligt in dat geval op 93 euro per ton: naarmate de doelstelling strikter is, en men dus bezorgder is over de schade, zijn minder emissies mogelijk en nemen de kosten om aan een dergelijk stringenter scenario te voldoen (fors) toe.

Bij de verschillende temperatuurscenario's horen bij de preventiekostenmethode daarom verschillende milieuprijzen. Omdat er in het handboek voor is gekozen de schaduwprijs voor broeikasgassen te baseren op 'efficiënte prijzen', die met behulp van een preventiekostenmethode tot stand zijn gekomen, neemt de schaduwprijs van klimaat toe als het klimaatdoel stringenter wordt en de fysieke schade in principe afneemt. De hogere schaduwprijs is niet het gevolg van een hogere fysieke milieuschade (waardoor een extra kilo emissie meer schade veroorzaakt en de schaduwprijs toeneemt), maar van een hogere waardering van de schade, waardoor dezelfde fysieke schade een hogere prijs krijgt.

In tabel 4.3 is de monetaire milieuschade voor Nederland weergegeven voor diverse combinaties van doelen voor de broeikasgassen en de milieuschade van andere stoffen. Wanneer zowel de onder- als bovenwaarde van alle milieuprijzen wordt gehanteerd, ontstaan precies dezelfde waarden voor de totale monetaire milieuschade (zie figuur 4.1). Bij de ondergrenzen bedraagt de totale monetaire schade in Nederland dan ruim 16 miljard euro en bij de bovenwaarden ruim 49 miljard euro.

Tabel 4.3 Monetaire milieuschade bij verschillende milieuprijzen broeikasgassen en overige schade in Nederland in 2015 (in mld euro)

	Overige schade	Temperatuurscenario		
		3,5 à 4 graden	2,5 à 3 graden	2 graden
<i>Klimaat (broeikasgassen)</i>				
Scenario		WLO Laag	WLO Hoog	WLO 2 Graden
Milieuprijs Broeikasgassen (euro 2015)		14	57	93
Preventiekosten broeikasgassen		2,9	11,6	19,1
<i>Overige milieuschade¹⁾</i>				
Onderwaarde	13,4	16,3	25,0	32,5
Middenwaarde	19,5	22,4	31,1	38,6
Bovenwaarde	30,3	33,2	41,9	49,4

Bron: eigen berekeningen PBL.

1) Het gaat hier om alle overige schade naar lucht, alsmede schade naar water en bodem.

De milieuprijs van CO₂ bij het tweegradenscenario is gebaseerd op een meta-analyse van diverse studies die een schaduwprijs bij een tweegradendoel berekenen (Kuik et al. 2009). In de WLO wordt aangegeven dat de CO₂-prijs in 2050 naar verwachting tussen de 200 en 1.000 euro ligt. Deze variatie wordt met name bepaald door de onzekerheid over de kosten van te nemen maatregelen en van de reductie van broeikasgassen die nodig is om aan het tweegradendoel te voldoen (80 tot 95 procent reductie). Als deze bandbreedte wordt teruggerekend naar prijzen voor 2015, varieert de CO₂-prijs in 2015 tussen de 71 en 354

euro. Bij deze ondergrens van 71 euro komt de milieuschade als gevolg van broeikasgassen op ongeveer 15,75 miljard euro, terwijl deze bij de bovengrens kan oplopen tot 78,5 miljard euro.

4.3 Het bepalen van de emissie van broeikasgassen

Eerder is aangegeven dat de Emissieregistratie en de IPCC andere methoden hanteren om de omvang van de broeikasgasemissies in Nederland te bepalen (zie paragraaf 2.2). De belangrijkste verschillen zijn dat volgens de IPCC-voorschriften kortcyclische emissies, emissies door de zeescheepvaart en emissies afkomstig van de natuur (van methaan en lachgas) niet hoeven worden meegerekend. Daarnaast dienen volgens de IPCC de emissies door motorbrandstoffen te worden bepaald op basis van de brandstofafzet, terwijl de Emissieregistratie deze emissies berekent op basis van het aantal verreden kilometers. In deze studie wordt in principe de IPCC-methode gevolgd. Alleen voor de emissies voor verkeer (zie paragraaf 2.2) zijn de gegevens uit de Emissieregistratie op basis van de daadwerkelijk verreden kilometers en de emissie van de zeescheepvaart meegenomen.

Als wordt uitgegaan van de emissies volgens de IPCC-voorschriften, liggen de emissies van CO₂ ongeveer 11 procent lager dan bij de Emissieregistratie. Bijna het gehele verschil – zo'n 10 procentpunt – wordt hier verklaard doordat de emissies uit de zeescheepvaart en de kortcyclische emissies zijn weggelaten. Verder liggen de emissies van methaan en de emissies van lachgas zo'n 6,75 respectievelijk 8,5 procent lager dan de emissies volgens de IPCC-voorschriften. Dit komt vooral doordat de emissies door de natuur bij het IPCC niet hoeven worden meegerekend. Hoewel ook de zeescheepvaart methaan en lachgas uitstoot, is dit aandeel in het totaal praktisch verwaarloosbaar.

Tabel 4.4 geeft een overzicht van het effect dat deze verschillen tussen de drie methoden hebben op de totale monetaire milieuschade in Nederland in 2015, als wordt uitgegaan van de in deze studie gehanteerde referentiewaarden voor alle milieuprijzen. Als de emissies van broeikasgassen volgens de IPCC-voorschriften worden vastgesteld, leidt dat tot een lagere monetaire milieuschade van ongeveer 1,25 miljard euro. De berekening in deze notitie en de berekening op basis van IPCC verschillen 337 miljoen euro, wat bijna helemaal het gevolg is van het meenemen van de zeescheepvaart.

Tabel 4.4 Vergelijking monetaire milieuschade in Nederland in 2015 volgens diverse procedures (in mln euro)

	Volgens IPCC	Deze notitie	Volgens Emissieregistratie
Grondslag	Basisberekening	Basis + zeescheepvaart + verreden kilometers	Deze notitie + kortcyclisch + emissies uit de natuur
Koolstofdioxide	9.362	9.730	10.511
Methaan	1.330	1.290	1.427
Distikstofoxide	419	428	459
HFK's (in CO ₂ -eq)	131	131	131
PFK (in CO ₂ -eq.)	9	9	9
Zwavelhexafluoride	8	8	8
Totaal	11.259	11.597	12.544

Bron: eigen berekeningen PBL op basis van Emissieregistratie (RIVM 2017)

4.4 Waardering schade door stikstofdioxiden (NO_x)

Veel milieuprijzen in het Handboek Milieuprijzen uit 2017 liggen hoger dan in het oude Handboek Schaduwrijzen uit 2010 (zie paragraaf 4.1). Van de broeikasgassen en de NEC-stoffen is de milieuprijs van stikstofdioxiden (NO_x) duidelijk het sterkst toegenomen. Wanneer de milieuprijzen worden uitgedrukt in hetzelfde prijspeil, blijken deze in het nieuwe handboek ongeveer drie keer zo hoog te liggen. De belangrijkste oorzaak hiervan is dat er in het nieuwe handboek een extra effect wordt toegekend aan NO_x. In het oude handboek was de milieuschade van NO_x het gevolg van fijnstofvorming, acute mortaliteit¹¹ door ozonvorming, verzuring en vermesting. Er zijn echter aanwijzingen uit epidemiologisch onderzoek dat NO_x (en dan met name NO₂) ook effect heeft op de chronische mortaliteit. Dat was voor CE Delft reden om dit effect in het nieuwe handboek mee te nemen.

Ook de Gezondheidsraad stelt dat recente epidemiologische onderzoeken het aannemelijk maken dat blootstelling aan stikstofdioxide, nog los van fijnstof en ozon, gezondheidseffecten heeft maar dat over de grootte van deze effecten nog enige onzekerheid bestaat (Gezondheidsraad 2018: paragrafen 2.3, 2.5). Eerder in het rapport geeft de Gezondheidsraad echter aan dat er weliswaar een effect van verkeersgerelateerde verontreinigingen op de sterfte wordt gevonden dat onafhankelijk is van fijnstofvorming, maar dat nog onduidelijk is of dat door stikstofdioxiden komt of door andere stoffen, zoals roet of ultrafijnstof (PM_{0,1}) (Gezondheidsraad 2018: 23). Ook het RIVM vindt de onderbouwing van een extra effect van stikstofdioxiden nog te zwak en laat in een berekening van de effecten van enkele verkeersmaatregelen in opdracht van de Algemene Rekenkamer het extra effect van stikstofdioxiden buiten beschouwing (Algemene Rekenkamer 2018).

In het handboek zijn de effecten van afzonderlijke stoffen toegekend aan zogenoemde thema's. De in het handboek 2017 berekende additionele chronische schade van NO₂ is samengebracht onder het thema 'fotochemische smogvorming', omdat de in een epidemiologische studie bestudeerde effecten veel lijken op die als gevolg van ozon op leefniveau. Het European Environment Agency (EEA) benadrukt dat de gevonden verbanden tussen NO₂ en sterfte weliswaar onafhankelijk zijn van blootstelling aan fijnstof, maar dat nog steeds niet duidelijk is of deze verbanden berusten op effecten van de stikstofdioxide zelf of deels op effecten van andere verkeersgerelateerde verontreinigingen, zoals roet en ultrafijnstof, die ook onafhankelijk zijn van die van fijnstof (EEA, 2017). In het nieuwe handboek wordt niet langer een effect toegekend aan NO_x vanwege acute en chronische mortaliteit bij ozonvorming. Daarvoor wordt in Nederland NMVOS bepalend gehouden.

De opbouw van de schaduwprijs voor NO_x in het nieuwe Handboek 2017 is als volgt:

Fijnstofvorming	14,5 euro per kilogram
Smogvorming (acute mortaliteit)	0,0 euro per kilogram
Smogvorming (chronische mortaliteit)	18,7 euro per kilogram
Verzuring	1,4 euro per kilogram
Vermesting	0,1 euro per kilogram

Hieruit blijkt dat het chronische effect van stikstofdioxide, dat in het handboek is ingedeeld onder het thema 'smogvorming', nu dus dominant is in de schaduwprijs van NO_x van 34,8 euro per kilogram. Bovendien weegt het effect van stikstofdioxide via acute mortaliteit niet meer mee.

Wordt de schaduwprijs van NO_x bepaald volgens de methode uit het oude handboek, dan zou het effect van chronische mortaliteit door NO₂ niet worden meegenomen en het effect van acute mortaliteit juist wél. Omdat de schade van dit effect op de acute mortaliteit is berekend op 2,1 euro per kilogram, zou de schaduwprijs van NO_x 18,2 euro per kilogram

¹¹ Mortaliteit betreft vroegtijdig overlijden. Bij acute mortaliteit gaat het om het risico om (acuut) te overlijden en bij chronische mortaliteit om de levensverwachting.

bedragen in plaats van 34,8 euro. In dat geval halveert de totale schade door NO_x bijna: in plaats van 12,3 miljard euro zou het dan gaan om 6,4 miljard euro.¹² De totale monetaire milieuschade zou dan 25,2 miljard euro bedragen in plaats van 31,1 miljard euro.

Naast onzekerheden over de milieuprijs voor NO_x zijn er ook onzekerheden over de fysieke omvang van de gezondheidsschade door NO_x en door andere stoffen die gezondheidsschade veroorzaken. Het handboek presenteert een meest waarschijnlijke 'midpoint' schatting voor de fysieke effecten. Deze schatting zelf kent eveneens een onzekerheidsmarge (naar boven en beneden). De doorwerking van deze onzekerheden (naar boven en beneden) op de schadekosten zijn in deze studie verder niet in beeld gebracht.¹³ Voor de afleiding van de fysieke schadekentallen in het handboek wordt gebruik gemaakt van de resultaten van berekeningen met Europese verspreidingsmodellen (zie ook paragraaf 2.3). Inmiddels zijn er verspreidingsmodellen beschikbaar die met recentere informatie werken dan de verspreidingsmodellen waarmee CE Delft in het handboek heeft gerekend. Die recentere verspreidingsmodellen leiden tot een lagere milieuschade voor de stoffen die bijdragen aan de fijnstofvorming (met fijnstof, NO_x en SO₂).

4.5 Milieuschade uit natuur en bodem en als gevolg van landgebruik

De emissies uit de natuur zijn in deze notitie niet meegenomen bij het bepalen van de monetaire milieuschade omdat het daarbij niet om schade door menselijke handelen gaat. De Emissieregistratie geeft wel emissies uit de natuur voor de stoffen methaan, lachgas, stikstofoxiden, NMVOS, koolstofmonoxide en stikstof naar de bodem. Daarbij gaat het niet alleen om emissies uit natuurlijke bodems, maar ook om emissies uit landbouwbodems. Van methaan en koolstofmonoxide is ongeveer twee derde van de emissies afkomstig van landbouwbodems. De emissies van distikstofoxide en stikstofoxiden is daarentegen volledig afkomstig van niet-landbouwbodems. Naast emissies uit de bodem vallen onder de emissies uit de natuur ook emissies door bossen en natuurlijke vegetatie. Daarbij gaat het uitsluitend om NMVOS-emissies. De totale milieuschade door emissies uit de natuur is gelijk aan 212 miljoen euro schade, waarvan ongeveer drie kwart afkomstig is van de broeikasgassen methaan en lachgas (tabel 4.5).

Tabel 4.5 Emissies en monetaire milieuschade uit de natuur in Nederland in 2015

	Emissies (in kton)	Milieuschade (in mln euro)
Methaan	70,0	123
Distikstofoxide	2,4	36
Stikstofoxiden	1,1	39
NMVOS	3,3	7
Koolstofmonoxide	26,7	3
Stikstof naar bodem	23,0	5
Totaal		212
Extra twee graden		102
Totaal		313

Bron: emissies zijn afkomstig van de Emissieregistratie (RIVM 2017).

¹² De milieuschade door NEC-stoffen wordt dan 13,1 miljard euro en is daarmee nog steeds hoger dan de milieuschade door broeikasgassen, die 11,6 miljard euro bedraagt.

¹³ De gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.1 geeft uitsluitend de onzekerheid in milieuprijzen die is gegeven in het handboek van CE en die wordt verklaard door de onzekerheid in de waardering van een verloren levensjaar door blootstelling aan luchtverontreiniging.

De emissies als gevolg van landgebruik, veranderingen in landgebruik en bosbouw zijn wel het gevolg van menselijk handelen, maar worden juist niet in de Emissieregistratie vermeld. De emissie van broeikasgassen door deze activiteiten worden echter wel voor het IPCC bepaald.¹⁴ In totaal blijkt het hier voor 2015 te gaan om 6,7 miljard kilogram CO₂-equivalenten, die bijna geheel bestaan uit de emissie van koolstofdioxide (zie ook tabel 4.6). Van andere stoffen dan broeikasgassen zijn geen emissies als gevolg van landgebruik, veranderingen in landgebruik en bosbouw bepaald, maar vermoedelijk zijn die emissies beperkt.

Tabel 4.6 Broeikasgasemissies en monetaire milieuschade als gevolg van landgebruik, verandering in landgebruik en bosbouw in Nederland in 2015

	Emissies (in kton CO ₂ -eq.)	Milieuschade (in mln euro)
Koolstofdioxide	6.527,7	370
Methaan	0,3	0,0
Lachgas	129,4	7
Totaal	6.657,5	376,8
Extra Tweegraden		244
Totaal		621

Bron: eigen berekeningen PBL op basis van Emissieregistratie (RIVM 2017).

4.6 Waardering biodiversiteit

De milieuschade is voor het overgrote deel het gevolg van schade aan de gezondheid. De milieuschade door verlies aan biodiversiteit vormt maar een klein deel van de monetaire milieuschade. Dat kan komen doordat het fysieke verlies aan biodiversiteit relatief beperkt is of doordat de waardering van het verlies aan biodiversiteit laag is. Zoals uitgelegd in paragraaf 2.4, is hier gerekend met behulp van een waarde die is gekoppeld aan de potentieel verloren fractie (PDF) per vierkante meter per jaar. Deze waarde is bepaald met een meta-analyse en bedraagt – omgerekend naar euro's uit 2015 – 0,64 euro per vierkante meter per jaar.¹⁵ Deze waarde komt ongeveer overeen met de waarde die werd gevonden voor de herstelkosten van biodiversiteit voor het landtype met de laagste herstelkosten in Duitsland (Ott et al. 2006). Om deze reden wordt deze waarde van herstelkosten bijvoorbeeld door Van Grinsven et al. (2013) als ondergrens gezien en wordt ze voor de bovengrens vermenigvuldigd met een factor vijf.

Een andere aanpak is om natuur niet te waarderen op basis van biodiversiteit, maar op basis van ecosysteemdiensten. Op die manier wordt ook de schade aan natuurlijke systemen weergegeven, maar met behulp van een heel andere indicator (zie paragraaf 2.3). In De Groot et al. (2012) wordt een meta-analyse voor de waardering van ecosystemen gepresenteerd waarbij 22 ecosysteemdiensten worden onderscheiden (zie ook Markandya 2016). Van de tien ecosystemtypen hebben er zes een waarde die onder de waarde ligt die in het handboek wordt gebruikt, maar voor een aantal ligt die waarde juist veel hoger.¹⁶ Voor inlandse moerasland ('inland wetlands') en kustsystemen komt de waardering op basis van

¹⁴ Deze emissies zijn vooral bekend onder de Engelse afkorting LULUCF, van Land Use, Land Use Change en Forestry.

¹⁵ In een meta-analyse wordt echter meer waarde toegekend aan de mediane waarde dan aan de gemiddelde waarde. Het had dan ook meer voor de hand gelegen om de mediane waarde als centrale waarde te nemen dan de gemiddelde waarde. De mediane waarde ligt in deze meta-analyse een factor acht lager dan de gemiddelde waarde.

¹⁶ De waardering van de afzonderlijke ecosystemen is daarbij vergeleken met de prijs uit Kuik et al. (2008: 18). Beide studies gebruiken prijzen uit 2007. Er is gerekend met een wisselkoers voor internationale dollars van 1,37 per euro.

ecosystemen ongeveer een factor vier hoger uit dan de waardering op basis van biodiversiteitsverlies. De waardering van moeraslanden aan de kust is zelfs een factor 30 hoger en van koraalriffen een factor 55.¹⁷ Uiteindelijk lijkt het er op dat de waardering van ecosysteemdiensten in dezelfde ordegrootte ligt als de waardering van biodiversiteit die in het Handboek Milieuprijzen wordt gebruikt.

In het handboek is voor de stoffen niet aangegeven welk deel van de schade het gevolg is van schade aan de natuur, waardoor niet kan worden nagegaan wat een hogere waardering van de schade aan natuur betekent voor de totale schade. Er is wel een indicatie te geven van de milieuschade die het gevolg is van biodiversiteitsverlies door emissies van milieuschadelijke stoffen, bijvoorbeeld via verzuring en vermesting. De schade door emissies naar water en bodem is voor het grootste deel het gevolg van de emissie van stikstof, fosfor en zware metalen, en de schade veroorzaakt door die stoffen is weer voor het grootste deel schade aan natuur. Een verdubbeling van de waardering van de schade aan natuur zou dan betekenen dat ook de schade naar zowel water als bodem maximaal verdubbelt. Daardoor zou de schade naar zowel water als bodem toenemen met maximaal 85 respectievelijk 75 miljoen euro.

Ook smogvorming leidt tot schade aan de natuur, maar die is erg beperkt en hier daarom weggelaten. Van NO_x en SO_x is ongeveer 4 procent van de schade het gevolg van verzuring (en bij NO_x ook van vermesting) en van NH₃ is dat ongeveer 15 procent. Als aangenomen wordt dat de hele schade door verzuring het gevolg is van schade aan natuur (een klein deel is schade aan bouwwerken), dan betekent een verdubbeling van de waardering van natuurschade dat de schade van SO_x toeneemt met ongeveer 40 miljoen euro, die van NO_x met ongeveer 500 miljoen euro en die van NH₃ met ongeveer 600 miljoen euro.¹⁸ De totale milieuschade als gevolg van biodiversiteitsverlies komt dan uit op ongeveer 1,3 miljard euro. Een vervijfvoudiging van de waardering van de natuurschade leidt uiteindelijk tot een toename van de monetaire milieuschade met 5,2 miljard euro. Zelfs in dat geval wordt dus nog steeds het overgrote deel van de milieuschade veroorzaakt door gezondheidsschade. En dan neemt vooral de schade door NH₃ en NO_x toe, twee stoffen die ook al een grote schade toebrengen aan de gezondheid.¹⁹

4.7 Waardering andere milieuschade en dubbeltellingen

Hoewel een groot aantal stoffen in de berekeningen van de monetaire milieuschade is meegenomen, ontbreekt er nog steeds een aantal. Het lijkt echter onwaarschijnlijk dat belangrijke directe en indirecte milieuschade van emissies wordt gemist (vergelijk ook paragraaf 2.4 en 2.5). Desondanks is het natuurlijk altijd mogelijk dat er nog stoffen ontbreken die een substantiële milieuschade met zich meebrengen, mede ook omdat de kennis over de schadelijkheid van stoffen zich voortdurend ontwikkelt. Vooralsnog is ons echter geen andere milieuschadelijke stof bekend die mogelijk een grote monetaire milieuschade heeft.

Naast schade door de emissie van stoffen naar lucht, oppervlaktewater en bodem zijn er wel andere milieueffecten die schade veroorzaken en die mogelijk niet goed zijn meegenomen in de huidige berekening. Landgebruik is daarvan wellicht de belangrijkste. In het Handboek Milieuprijzen zijn schaduwrijzen gegeven voor verschillende typen landgebruik en is een

¹⁷ De hoge waardering van moeraslanden aan de kust is met name het gevolg van de ecosysteemdienst afvalbehandeling, die verantwoordelijk is voor bijna 85 procent van de waardering. Bovendien is de waardering van moeraslanden aan de kust erg scheef verdeeld: het gemiddelde is meer dan vijftien keer zo groot als de mediaan, een verhouding die bij alle ecosysteemttypen kleiner dan vier is.

¹⁸ Van de overige stoffen naar lucht is de schade bijna helemaal gezondheidsschade.

¹⁹ Merk op dat weliswaar de directe schade door stikstof naar bodem en water gering is, maar dat de depositie van stikstof ook verloopt via luchtmissies van NH₃ en NO_x. Deze schade is redelijk substantieel, namelijk zo'n 1,1 miljard euro, maar wordt al meegenomen onder de milieuschade van de NEC-stoffen.

gemiddelde prijs gegeven voor landgebruik in Nederland. De typen landgebruik die in het handboek worden onderscheiden, komen overeen met de indeling die wordt gebruikt in Eurostat en de gemiddelde prijs is gebaseerd op de verdeling van het landverbruik in Nederland over die typen volgens Eurostat. De milieuschade door landgebruik is dan ongeveer 750 miljoen euro, met een bandbreedte van 200 miljoen tot 1.400 miljoen euro. De verdeling over de landgebruikstypen in Eurostat is echter moeilijk te reconstrueren met behulp van gegevens over het landgebruik in CBS Statline. Daarom wordt deze milieuschade hier met enige voorzichtigheid gepresenteerd.

Een ander milieueffect is de schade als gevolg van restafval bij de afvalverwerking, zoals bodemas of zuiveringslib. Om te voorkomen dat de schadelijke stoffen van dit restafval schade veroorzaken, worden verwerkingskosten gemaakt. Met behulp van een preventiekostenmethode kan dan de schade van dit restafval worden bepaald. Als voor de kosten wordt uitgegaan van de kosten om chemisch afval bij stort te verwerken (vergelijk Dijkgraaf & Vollebergh 2004), dan is de prijs 3,12 euro per ton (in euro 2015). De totale schade is dan ongeveer 5 miljoen euro.

Tot slot zijn er diverse andere milieuvraagstukken waarvan niet altijd het onmiddellijke effect zichtbaar is. Dit geldt bijvoorbeeld voor de huidige zorgen rond de plastic soep (CPB 2017), maar ook voor watervervuiling via neoneticiden en zogenoemde drempel-effecten in ecologische systemen, zoals de oceanen.

Ook het vraagstuk van mogelijke dubbeltellingen is relevant. In het Handboek Milieuprijzen is in principe gecorrigeerd voor dubbeltellingen. Desondanks zijn er, bij het bepalen van de totale milieuschade in Nederland, wel degelijk risico's tot dubbeltellingen. Zo zijn er vluchtige organische stoffen die onder NMVOS vallen en die via die route dus bijdragen aan milieuschade door smogvorming, maar die tegelijkertijd een eigen schaduwprijs hebben waarvan smogvorming deel uitmaakt. Voor de vluchtige organische stoffen die in deze analyse zijn meegenomen, geldt dat bijvoorbeeld voor benzeen en naftaleen. Eenzelfde probleem speelt bij fijnstof. Enkele stoffen die onder fijnstof vallen, zoals enkele polycyclische aromatische koolwaterstoffen, hebben ook een eigen schaduwprijs. Hoe dan ook, de milieuschade van de stoffen die zowel een eigen schaduwprijs hebben als onder NMVOS en/of fijnstof vallen, is dusdanig gering dat voor deze mogelijke dubbeltellingen niet meer is gecorrigeerd.

5 Monetarisering en beleid

Dit rapport geeft de stand van zaken in 2015 met betrekking tot de monetaire milieuschade in Nederland. We combineren in deze studie cijfers van de Emissieregistratie (RIVM 2017) over de geëmitteerde omvang van veel stoffen met de milieuprijzen zoals CE Delft (2017a) die in Nederland heeft berekend. Door deze aanpak berekenen we in feite een direct jaarlijks welvaartsverlies voor Nederland als geheel. Doordat dit verlies in geld is uitgedrukt, kan het direct worden vergeleken met andere maatstaven die een indicatie geven van de welvaart, zoals de berekening van de welstand via het bruto binnenlands product (bbp). In 2015 bedroeg het bbp 683 miljard euro en de groei hiervan 20 miljard euro.²⁰ Het bbp komt derhalve 4,5 procent lager uit als rekening wordt gehouden met de monetaire milieuschade. Het valt te overwegen om deze berekening daarom te betrekken in de discussies over brede welvaart (zie PBL et al. 2018).

Behalve de macrobenadering van het maatschappelijk welvaartsverlies door milieuschade is het mogelijk om ook andere monetaire maatstaven van de welvaart of van beleid te analyseren. Een voorbeeld van zo'n andere toepassing is de vergelijking van de bijdrage aan het bbp van specifieke sectoren met de door die sector veroorzaakte milieuschade. Hierdoor ontstaat een beter beeld van wat zo'n sector echt bijdraagt aan de welvaart in een land. Met name voor de raffinaderijen, landbouw en de energiesector is de milieuschade hoog als die wordt gerelateerd aan de bijdrage aan het bbp, maar ook voor de vervoerssector, de basischemie, de basismetaleen, de bouwmaterialenindustrie en de afvalverwerking is die nog substantieel. Bij verkeer zijn dan met name het wegverkeer en de zeescheepvaart verantwoordelijk voor de milieuschade, evenals de luchtvaart indien rekening wordt gehouden met de schade door Nederlandse ingezetenen.

Weer een heel andere toepassing is nagaan waar in de productie- en consumptieketen de milieuschade plaatsvindt. Eerder is in Vollebergh et al. (2017) bijvoorbeeld geanalyseerd waar in de Nederlandse economie relatief veel milieuschade optreedt als gevolg van grondstoffen- en materialenverbruik in de hele productie- en consumptieketen (van winning tot afval). Elke fase levert afval op en milieuschade door emissies van verontreinigende stoffen. Deze schadelijke emissies ontstaan door en na het gebruik van grondstoffen en materialen in combinatie met energieverbruik. In die studie lag de nadruk echter op de complexiteit van dat grondstoffen- en materialenverbruik, onder meer vanwege diverse onderlinge leveringen zowel binnen als buiten Nederland, en moest worden gerekend met cijfers voor 2007. De cijfers in het onderhavige rapport zijn niet alleen veel recenter, namelijk van 2015, maar geven bovendien een completer beeld omdat hierin ook de milieuschade van de landbouw en consumptie in zijn geheel is meegenomen. Hoewel beide sectoren een substantiële bijdrage leveren aan de totale milieuschade, blijven de in Vollebergh et al. (2017) getrokken conclusies grotendeels overeind, namelijk dat het overgrote deel van de directe milieuschade is gekoppeld aan de fase waarin grondstoffen worden verwerkt tot bruikbaar materiaal of halffabricaat en eindproduct en aan de opwekking en het gebruik van energie in de elektriciteitssector en in de sector verkeer en vervoer. De milieuschade door de winning van grondstoffen en door storten en verbranding in de afvalfase is beperkt. De milieuschade in de consumptiefase is nog wel substantieel, maar is vooral gerelateerd aan de verbranding van (fossiele) energieproducten (aardgas).

²⁰ Volgens het CBS was sprake van een groei van 2,3 procent.

Een derde toepassing betreft de relatie met milieubeprijzing zoals deze nu vaak wordt bepleit. De berekende milieuschade impliceert een marginaal welvaartsverlies dat momenteel niet in de marktprijzen is verdisconteerd. Een betere beprijzing van deze milieuschade zorgt zowel voor een vermindering van de directe milieuschade als voor een toename van het hergebruik van grondstoffen en materialen (vergelijk bijvoorbeeld Vollebergh et al. 2014; 2017). Een voorbeeld van een betere beprijzing zijn groene belastingen mits de grondslag- en de tariefkeuze zoveel mogelijk in overeenstemming is gebracht met de milieuschade. Maar ook andere instrumenten, zoals vergunningseisen en verhandelbare rechten, dragen hieraan bij.²¹ Een belangrijk punt hierbij is dat de berekende monetaire schade niet naar nul kan of hoeft te worden gebracht. Kern van de milieubeprijzing is dat het beslag op het milieu in de productie- en consumptiebeslissingen wordt *meegewogen*, niet dat elk milieugebruik wordt voorkomen (zie ook PBL 2012).

Tot slot is het van belang te wijzen op een aantal beperkingen van deze aanpak. Ten eerste worden niet alle milieuproblemen door de hier gevolgde benadering even goed gerepresenteerd. Zo blijft alle milieuschade die niet het gevolg is van de emissie van milieuschadelijke stoffen maar die andere oorzaken heeft, zoals verandering in landgebruik, geluidhinder of dumping van afval, buiten beschouwing. Ook stoffen waarvan momenteel nog niet bekend is óf en hoeveel schade deze veroorzaken, zijn niet meegenomen. En tot slot zijn er al eerder volop stoffen in het milieu gebracht die nu de nodige schade veroorzaken. Het meest pregnante voorbeeld is de zogenoemde plastic soep en de microplastics. Maar ook 'oude' vervuiling, bijvoorbeeld die door polychloorbifenylen (pcb's), heeft een lange verblijfsduur die via de voedselketen alsnog voor problemen kan zorgen.

Ten tweede zijn de berekeningen in dit rapport gebaseerd op marginale schadeberekeningen. De gebruikte milieuprijzen geven in principe veranderingen in de milieuschade aan die het gevolg is van één extra kilogram emissie van die stof. Impliciet wordt daarmee verondersteld dat deze prijs geldt over de hele 'range' van vervuiling. Met andere woorden, de marginale schadekosten worden op deze wijze impliciet constant verondersteld. Er zijn echter volop aanwijzingen dat bij vervuiling ook zogenoemde niet-marginale effecten kunnen optreden, zoals drempel-effecten of hysteresis in ecologische systemen. Schaduwrijzen voor stoffen waarvan de marginale schade afhangt van de concentratie of depositie van de stof, zullen daarom niet constant zijn. Als de concentratie bijvoorbeeld hoger is, zal de schaduwrijzen ook hoger zijn. Dat geldt zeker voor ozon, fijnstof, verzuring (dus voor alle NEC-stoffen), maar ook voor vermesting, humane toxiciteit en ecotoxiciteit. Een uitzondering hierop zijn de broeikasgassen. De schade die deze stoffen veroorzaken, ligt in het verleden nog verder weg dan in het heden. Daarvan zijn de schaduwrijzen in het verleden dan dus lager.

²¹ Voor een uitgebreide uitwerking van deze toepassing voor de bestaande en ontbrekende belastingen op energie wordt verwezen naar de studies van Vollebergh et al. (2014; 2017).

Literatuur

Aalbers, R., G. Renes & G. Romijn (2016), *WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO₂-uitstoot in MKBA's*, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.

Algemene Rekenkamer (2018), *Resultaten verantwoordingsonderzoek 2017 Ministerie van Infrastructuur en Milieu (XII)*, Den Haag, Algemene Rekenkamer.

CE (2010a), *Handboek Schaduwrijzen. Waardering en weging van emissies en milieueffecten*, publicatienummer: 10.7788.25a NL, Delft: CE Delft.

CE (2010b), *Bijlagen - Handboek Schaduwrijzen*, publicatienr. 10.7788.25b NL, Delft: CE Delft.

CE Delft (2017a), *Handboek Milieuprijzen 2017*, publicatienr. 17.7A76.64, Delft: CE Delft,.

CE Delft (2017b), *Werkwijzer voor MKBAs op het gebied van milieu*, publicatienr. 17.7A76.48, Delft: CE Delft.

CPB (2017), *De circulaire economie van kunststof; van grondstoffen tot afval*, Den Haag: Centraal Planbureau.

CPB & PBL (2015), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Klimaat en Energie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau.

Dijkgraaf, E. & H. Vollebergh (2004), 'Burn or bury? A social cost comparison of final waste disposal methods', *Ecological Economics* 50: 233-247.

European Environment Agency (EEA) (2017), *Air quality in Europe - 2017 report*, Luxemburg, No.13.

Gezondheidsraad (2018), *Gezondheidswinst door schonere lucht*, publicatienr. 2018/01, Den Haag: Gezondheidsraad.

Grinsven, H. van, M. Holland, B. Jacobsen, Z. Klimont, M. Sutton & J. Willems (2013), 'Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation', *Environmental Science & Technology* 47(8): 3571-3579.

Groot, R. de, et al. (2012), 'Global Estimates of the Value of Ecosystems and their Services in Monetary Units', *Ecosystems* 1: 50-61.

Koopmans, C., A. Heyma, B. Hof, M. Imandt, L. Kok & M. Pomp (2016), *Werkwijzer voor kosten-batenanalyse in het sociale domein. Hoofdrapport*, SEO-rapport nr. 2016-11A, Amsterdam: SEO Economische Onderzoek.

Klein, J., H. Molnár-in 't Veld, G. Geilenkirchen J. Hulskotte, N. Ligterink, S. Dellaert & R. de Boer (2017), *Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands*, Den Haag/Heerlen: Centraal Bureau voor de Statistiek.

Kuik, O.J., L. Brander, N. Nikitina, S. Navrud, K. Magnussen & E.H. Fall (2008), *Report on the monetary valuation of energy related impacts on land use changes, acidification, eutrophication, visual intrusion and climate change*. Deliverable D3.2 CASES project.

Kuik, O., L. Brander & R. Tol (2009), 'Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis', *Energy Policy* 37(4): 1395-1403.

- Markandya, A. (2016), 'Cost benefit analysis and the environment: How to best cover impacts on biodiversity and ecosystem services', OECD Environment Working Papers No. 101, Paris: OECD Publishing.
- Muller, N.Z., R. Mendelsohn & W. Nordhaus (2011), 'Environmental Accounting for Pollution in the United States Economy', *American Economic Review* 101(5): 1649-1675.
- Ministerie van Financiën (2015), *Rapport Werkgroep Discontovoet 2015*, Den Haag: Ministerie van Financiën.
- OECD (2012), *Mortality risk valuation in environment, health and transport policies*, Parijs.
- Ott, W., M. Baur, Y. Kaufmann, R. Frischknecht & R. Steiner (2006), *Assessment of Biodiversity Losses*, Deliverable D.4.2.- RS 1b in NEEDS project, Zurich: Econcept AG,.
- PBL (2012), *Milieubelastingen en groene groei – Verkenning van de mogelijkheden in het kader van het energie- en klimaatbeleid*, Den Haag: Planbureau van de Leefomgeving.
- PBL (2017), *Compendium van de Leefomgeving: CO₂-emissies verklaard, 1990-2016*, Den Haag: Planbureau van de Leefomgeving.
- PBL, CBS & Wageningen University Research (2017), 'Belasting van het oppervlaktewater vanuit riolering en rioolwaterzuivering, 1990-2015', Uit: *Compendium voor de Leefomgeving*, <http://www.clo.nl/indicatoren/nl0515-belasting-van-oppervlaktewater-door-riolering-en-waterzuivering>, benaderd begin december 2017.
- PBL, CPB & SCP (2018), *Verkenning Brede Welvaart 2018 – Thema: Circulaire economie, gedrag en beleid*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving, Centraal Planbureau en Sociaal en Cultureel Planbureau.
- Perman, R, M. Yue, M. Common, D. Maddison & J. McGilvray (2011), *Natural Resource & Environmental Economics*, Essex: Addison Wesley Longman.
- RIVM (2017), *Emissieregistratie*, <http://www.emissieregistratie.nl>, benaderd eind november 2017.
- Romijn, G & G. Renes (2013), *Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse*, Den Haag: CPB/PBL.
- Stern, N. (2006), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vollebergh, H., E. Drissen, H. Eerens & G. Geilenkirchen (2014), *Milieubelastingen en Groene Groei Deel II. Evaluatie van belastingen op energie in Nederland vanuit milieuperspectief*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Vollebergh, H., J. Dijk, E. Drissen, H. Eerens & H. Vrijburg (2017), *Fiscale Vergroening: belastingverschuiving van arbeid naar grondstoffen, materialen en afval*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Appendix A Overzicht van stoffen

In deze Appendix zijn alle stoffen weergegeven waarvoor in deze studie de milieuschade is berekend (zie paragraaf 2.5 voor een verantwoording). De emissie-omvang is voor 2015 zoals weergegeven in de Emissieregistratie. Emissies afkomstig van de natuur zijn niet meegenomen en de emissies van koolstofdioxide gecorrigeerd voor kort-cyclische emissies.

Tabel A.1 Stoffen met een emissie naar lucht

		Emissie (in kg)			Emissie (in kg)
Klimaat (broeikasgassen)			Chloorfluorkoolstoffen		
Koolstofdioxide	CO ₂	171.912.955.454	Chloorfluorkoolstoffen	CFK's	75.200
Methaan	CH ₄	737.422.849	Hydrochloorfluorkoolstoffen	HCFK's	697.000
Distikstofoxide	N ₂ O	28.513.173			
Fluorkoolwaterstoffen	HFK's	2.311.311.065	Overige milieuschadelijke stoffen		
Perfluorkoolwaterstoffen	PFK's	161.892.740	1,1,1-Trichloorethaan		103.200
Zwavelhexafluoride	SF ₆	6.089	Acrylonitril		4.270
Luchtverontreiniging NEC-stoffen			Benzeen		2.319.000
Zwaveloxiden	SO _x	43.490.000	Captan		26.330
Stikstofoxiden	NO _x	355.166.000	Dioxinen	PCDD/F	0,0219
Ammoniak	NH ₃	127.900.000	Epoxiconazool		1.974
NMVO	NMVO	144.168.000	Esfenvaleraat		337
Grovere fijnstof	PM _{2,5-10}	13.830.000	Ethyleenoxide		17.750
Fijnere fijnstof	PM _{2,5}	16.530.000	Fenpropimorf		8.447
Zware metalen			Fluazifop-p-butyl		134
Antimoonverbindingen	Sb	6.610	Fluoriden anorganisch	HF	460.300
Arsenverbindingen	As	92,8	Formaldehyde	CH ₂ O	1.200.000
Cadmiumverbindingen	Cd	568	Glufosinaat-ammonium		1.016
Chroomverbindingen	Cr	3.614	Glyfosaat		29.370
Koperverbindingen	Cu	40.364	Hexachloorbenzeen	HCB	3,31
Kwikverbindingen	Hg	711	Isoproturon		340
Loodverbindingen	Pb	8.767	Koolstofmonoxide	CO	614.080.000
Nikkelverbindingen	Ni	38.224	Linuron		3.792
Seleenverbindingen	Se	1.003	Metazachloor		6.002
Zinkverbindingen	Zn	101.913	Methiocarb		82,5
Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen			Pentachloorfenol		14.950
Benzo(a)Pyreen			Tetrachlooretheen	1.661	493.862
Benzo(b)Fluorantheen		1.528	Tetrachloormethaan		1.507
Benzo(k)Fluorantheen		818	Thiabendazool		64,5
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen		806	Tolueen		4.016.031
Fluorantheen		24.819	Trichlooretheen		13.362
Anthraceen		6.027	Vinylchloride		24.590
Naftaleen		203.550	Waterstofcyanide		4.918

Tabel A.2 Stoffen met een emissie naar oppervlaktewater en riolering

		Emissie (in kg)			Emissie (in kg)
Meststoffen			Overige milieuschadelijke stoffen		
Stikstof	N	22.932.903	1,2-Dichloorethaan		452
Fosfor	P	3.053.534	Alachloor		0,172
Zware metalen			Aldrin		0,065
Antimoonverbindingen	Sb	11.650	Atrazine		0,172
Arseenverbindingen	As	7.877	Bariumverbindingen	Ba	129.900
Cadmiumverbindingen	Cd	383	Benzeen		67.560
Koperverbindingen	Cu	81.419	Bisfenol A		493
Kwikverbindingen	Hg	213	Carbendazim		125
Loodverbindingen	Pb	37.649	Chloorbenzenen		19.960
Nikkelverbindingen	Ni	12.416	Chloorfenvinfos		0,287
Organotinverbindingen (als tin)	Sn	3,50	Cyaniden		12.700
Seleenverbindingen	Se	156	Di(2-Ethylhexyl)Ftalaat		18.460
Thalliumverbindingen	Tl	3,92	Dibutylftalaat		3.020
Tinverbindingen	Sn	1.188	Dichloormethaan		6.634
Vanadiumverbindingen	V	1.557	Dieldrin		0,0645
Zilververbindingen	Ag	31,8	Dioxinen	PCDD/F	0,0128
Zinkverbindingen	Zn	325.073	Diuron		0,172
Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen			Endosulfan		105
Acenaftheen		38,6	Endrin		0,0645
Anthraceen			Ethylbenzeen	98,2	1.169
Benzo(a)Anthraceen		122	Fenolen		3.273
Benzo(a)Pyreen		48,3	Formaldehyde		18.680
Benzo(b)Fluorantheen		52,1	Heptachloor		0,0645
Benzo(ghi)Peryleen		121	Hexabromocyclododecaan		0,569
Benzo(k)Fluorantheen		275	Hexachloorbenzeen		17,9
Chryseen		205	Hexachloorbutadieen		1,10
Dibenzo(ah)anthraceen		6,54	Hexachloorcyclohexaan		35,6
Fenanthreen		844	Irgarol		1.203
Fluorantheen		234	Isodrin		0,645
Fluoreen		86,6	Mirex		0,287
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen		69,4	Nonylfenol/Ethoxylaten	Np/Npe	1.701
Naftaleen		1.720	Polychloorbifenyyl	PCB	5,03
Pyreen		360	Pentachloorfenol		232
			Simazine		0,172
			Tetrachlooretheen		50.860
			Tolueen		42.810
			Trichloorbenzenen		3.288
			Trichlooretheen		3.046
			Trichloormethaan (chloroform)		5.193
			Trifenyyltinverbindingen		0,0323
			Trifluralin		0,0645
			Vinylchloride		26,7
			Xylenen		401

Tabel A.3 Stoffen met een emissie naar bodem

		Emissie (in kg)		Emissie (in kg)	
Meststoffen			Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen		
Stikstof	N	278.300.000	Anthraceen	1.390	
Fosfor	P	7.151.000	Benzo(a)Anthraceen	604	
Zware metalen			Benzo(a)Pyreen	153	
Antimoonverbindingen	Sb	10.470	Benzo(b)Fluorantheen	180	
Arsenverbindingen	As	54.500	Benzo(ghi)Peryleen	173	
Cadmiumverbindingen	Cd	1.004	Benzo(k)Fluorantheen	949	
Chroomverbindingen	Cr	86.650	Chryseen	566	
Koperverbindingen	Cu	198.900	Fenanthreen	32.810	
Kwikverbindingen	Hg	654	Fluorantheen	9.846	
Loodverbindingen	Pb	24.410	Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen	118	
Nikkelverbindingen	Ni	7.880	Naftaleen	55.960	
Seleenverbindingen	Se	851	Overige milieuschadelijke stoffen		
Vanadiumverbindingen	V	5.594	Bariumverbindingen	Ba	115.200
Zinkverbindingen	Zn	248.400	Benzeen		35.060
			Chloorbenzenen		33,3
			Dibutylftalaat		3,29
			Dioxinen	PCDD/F	0,00000434
			Ethylbenzeen		983
			Fenol en Fenolaten		626
			Hexachloorbenzeen		5,75
			Hexachloorcyclohexaan		203
			Pentachloorfenol		533
			Polychloorbifenyyl	PCB	27,9
			Tolueen		987
			Trichloorbenzenen		3,65
			Xylenen (Totaal)		983

Appendix B

Milieuprijzen

Evaluatie met behulp van schaduwrijzen is een methode die steeds vaker wordt toegepast. Fysieke impacts van emissies in de vorm van milieuschade worden daarbij gewaardeerd in geld (monetaire eenheden). Deze methode is met name goed ontwikkeld voor de schade door broeikasgassen (BKG) en luchtverontreinigende stoffen (LUVG). Maar ook voor effecten van vele andere milieuproblemen, zoals geluidhinder, straling, humane en ecotoxiciteit door zware metalen en dioxinen en vervuiling bij het transport, zijn schaduwrijzen beschikbaar. In een eerdere studie is al uitgebreid ingegaan op de aanpak om via schaduwrijzen de milieuschade te waarderen (zie Vollebergh et al. 2014:76-99).

De in deze studie gebruikte kengetallen komen uit het Handboek Milieuprijzen (CE Delft 2017a); zie paragraaf 2.3 en 2.4. Dit handboek geeft schaduwrijzen voor emissies van verontreinigende stoffen en van landgebruik. Er worden afzonderlijke prijzen gegeven voor de emissie naar lucht, bodem en water van diverse verontreinigende stoffen. Alleen bij de milieuschade door fijnstof als gevolg van emissies door het wegverkeer is enigszins rekening gehouden met het feit dat hiervan de milieuschade verschilt tussen rurale en stedelijke gebieden. Dat geldt vooral voor fijnstof die door verbranding vrijkomt, de roetdeeltjes. Deze vallen onder de fijnere fractie fijnstof (PM_{2,5}). In het handboek (CE Delft 2017a) zijn aparte schaduwrijzen voor verkeer gegeven voor twee verschillende typen weglocaties: het sterk verstedelijkt gebied en het landelijk gebied.

Voor de analyse zijn de *centrale waarden* van de schaduwrijzen uit het handboek gebruikt (CE Delft 2017a). De centrale waarden geven de best mogelijke schatting van de milieuschade, gegeven de onzekerheden van de waardering van de eindpunten, zoals gezondheid en biodiversiteit (CE Delft 2017a: 30). Daarnaast geeft het handboek boven- en onderwaarden van de schaduwrijzen, die zijn voorgeschreven voor de maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) van het overheidsbeleid. Hoewel de boven- en onderwaarden niet direct een bandbreedte geven voor onzekerheid van de centrale waarden van de schaduwrijzen, geven ze wel enig inzicht in die onzekerheid. Tabellen B1-B3 geven een volledig overzicht van de in deze studie gebruikte milieuprijzen.

Voor de *broeikasgassen* is in het Handboek Milieuprijzen rekening gehouden met de voorschriften die gelden voor het maken van een MKBA (zie ook paragraaf 2.4 en paragraaf 4.2). De onder- en bovenwaarden van de broeikasgassen zijn gebaseerd op de twee energie- en klimaatscenario's uit de studie Welvaart en Leefomgeving (WLO) uit 2015 (CPB & PBL 2015), zoals geadviseerd door de Werkgroep Discontovoet. Deze werkgroep adviseert het kabinet met enige regelmaat over de hoogte van de maatschappelijke discontovoet (Ministerie van Financiën 2015).

De Werkgroep Discontovoet heeft ook gekeken of er reden is om voor onomkeerbare effecten – waarvan bij klimaatverandering mogelijk sprake is – een lagere discontovoet te gebruiken. Ten aanzien van klimaateffecten adviseert de werkgroep dat niet te doen, maar gebruik te maken van CO₂-prijzen die in de tijd oplopen volgens een vooraf vastgesteld beleidspad dat CPB en PBL in de WLO-studie dienen vast te stellen (Ministerie van Financiën 2015: 7). In de WLO worden twee klimaatscenario's beschreven, waarin klimaatbeleid wordt gevoerd (CPB & PBL 2015). In het scenario Laag bestaat het beleid uit de onvoorwaardelijke toezeggingen die landen bij de VN-klimaatonderhandelingen hebben gedaan en in het scenario Hoog bestaat het beleid uit de onvoorwaardelijke én voorwaardelijke toezeggingen.

De onvoorwaardelijke toezeggingen in Laag leiden tot een temperatuurstijging van 3,5 tot 4 graden aan het eind van de 21^{ste} eeuw, terwijl toevoeging van de voorwaardelijke toezeggingen leidt tot een temperatuurstijging van 2,5 tot 3 graden. De schaduw prijzen voor broeikasgassen volgens Hoog zijn in het handboek als middenwaarde genomen en die voor Laag als onderwaarde. Als bovenwaarde van de schaduw prijs wordt in het handboek ook de schaduw prijs volgens hoog genomen, maar in deze notitie wordt daarvoor de schaduw prijs genomen die hoort bij een scenario waarin de temperatuurstijging beperkt blijft tot twee graden.

In Aalbers et al. (2016) is bepaald wat de efficiënte CO₂-prijzen voor deze scenario's zijn. Het efficiënte CO₂-prijspad geeft voor elk jaar tot en met 2050 een CO₂-prijs die nodig is om de cumulatieve reductie van CO₂-emissies in een bepaald scenario tegen de laagst mogelijke kosten te realiseren (Aalbers et al. 2016: 8). Deze efficiënte prijzen wijken af van de prijzen volgens de preventiekostenmethodiek, doordat ze niet alleen afhankelijk zijn van het doel maar ook van de scenariocontext. In Hoog ontwikkelt de technologie zich bijvoorbeeld sneller dan in Laag en is er meer internationale samenwerking. In het Handboek Milieuprijzen zijn deze efficiënte prijzen voor broeikasgassen overgenomen voor de lage en de hoge waarde. De middenwaarde is in het handboek gelijkgesteld aan de hoge waarde. Er zijn verder geen milieuprijzen berekend voor scenario's met een temperatuurstijging van minder dan twee graden.

Tabel B1 Schaduw prijzen voor de emissie van stoffen naar lucht (in euro 2015 per kilogram)

		Ondergrens	Middenwaarde	Bovengrens	Handboek 2010
Klimaat (broeikasgassen)					
Koolstofdioxide	CO ₂	0,014	0,057	0,093	0,028
Methaan	CH ₄	0,45	1,75	2,88	0,70
Distikstofoxide	N ₂ O	3,75	15,00	24,70	8,34
Fluorkoolwaterstoffen	HFK	0,014	0,057	0,093	0,028
Perfluorkoolwaterstoffen	PFK	0,014	0,057	0,093	0,028
Zwavelhexafluoride	SF ₆	333	1330	2191	638
Luchtverontreinigende stoffen met NEC-plafond					
Zwaveloxiden	SO _x	17,7	24,9	38,7	17,2
Stikstofoxiden	NO _x	24,1	34,7	53,7	11,9
Ammoniak	NH ₃	19,7	30,5	48,8	31,1
NMVOS	NMVOS	1,61	2,10	3,15	2,84
Fijnstof	PM _{2,5-10}	3,51	4,93	8,79	4,26
Fijnstof	PM _{2,5}	56,8	79,5	122,0	72,5
Zware metalen					
Antimoonverbindingen	Sb	766	910	1190	155
Arsenverbindingen	As	703	1030	1230	908
Cadmiumverbindingen	Cd	798	1160	1830	142
Chroomverbindingen	Cr	0,152	0,531	1,02	37,5
Koperverbindingen	Cu	1,15	4,2	8,25	0,38
Kwikverbindingen	Hg	24800	34500	53600	12315
Loodverbindingen	Pb	3970	5910	6600	457
Nikkelverbindingen	Ni	75	133	225	6,01
Seleenverbindingen	Se	65,1	90,2	140,1	18,9
Zinkverbindingen	Zn	2,25	11,8	31,6	11,4

Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen

Benzo(a)Pyreen		8,36	11,4	17,7	1,12
Benzo(b)Fluorantheen		1,67	2,28	3,52	0,224
Benzo(k)Fluorantheen		1,30	1,77	2,74	0,174
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen		4,56	6,24	9,64	0,613
Fluorantheen		0,299	0,418	0,650	0,0437
Anthraceen		0,0564	0,0776	0,120	0,0082
Naftaleen		1,13	1,54	2,38	0,189

Chloorfluorkoolstoffen

Chloorfluorkoolstoffen	CFK's	134	436	674	234
Hydrochloorfluorkoolstoffen	HCFK's	24,1	93,1	153,2	50,6

Overige milieuschadelijke stoffen naar lucht

1,1,1-Trichloorethaan		4,94	12,7	14,6	4,10
Acrylonitril		10,0	13,7	21,1	
Benzeen		0,804	1,06	1,6	0,272
Captan		0,131	0,18	0,279	
Dioxinen	PCDD/PCDF	49000000	67100000	104000000	56983676
Epoxiconazool		0,0271	0,109	0,212	
Esfivaleraat		29,6	119	232	
Ethyleenoxide		1,58	2,16	3,34	0,233
Fenpropimorf		8,11	11,1	17,1	
Fluazifop-p-butyl		0,0027	0,0109	0,0212	
Fluoriden anorganisch (als HF)		41,6	57	88	6,1488
Formaldehyde	CH2O	19,3	26,3	40,5	0,31
Glufosinaat-ammonium		5,7	7,81	12,1	
Glyfosaat		0,349	0,478	0,739	
Hexachloorbenzeen	HCB	142	195	302	
Isoproturon		0,166	0,668	1,3	
Koolstofmonoxide	CO	0,0736	0,0958	0,152	0,0101
Linuron		2,37	3,29	5,11	
Metazachloor		0,0102	0,0411	0,0801	
Methiocarb		1,20	1,80	2,86	
Pentachloorfenol		6,87	9,4	14,5	
Tetrachlooretheen		12,1	16,5	25,5	1,30
Tetrachloormethaan		985	1410	2135	211
Thiabendazool		0,357	0,501	0,782	
Tolueen		1,86	2,44	3,66	0,72
Trichlooretheen		0,913	1,19	1,79	
Vinylchloride		2,41	3,30	5,09	
Waterstofcyanide		16,7	23,4	36,6	

Tabel B2 Schaduwrijzen voor de emissie van stoffen naar oppervlaktewater (in euro 2015 per kilogram)

		Ondergrens	Middenwaarde	Bovengrens	Handboek 2010
Meststoffen					
Stikstof	N	3,11	3,11	3,11	1,28
Fosfor	P	0,47	1,90	3,71	1,99
Zware metalen					
Antimoon	Sb	13,7	42,9	103,0	24,9
Arseen	As	202	433	911	629
Cadmium	Cd	5,25	6,57	8,91	5,56
Koper	Cu	1,43	5,95	12,00	
Kwik	Hg	78,8	1980	5950	1073
Lood	Pb	0,962	5,85	16,00	9,44
Nikkel	Ni	1,48	5,97	12,00	3,77
Organotin (als tin)	Sn	0,013	0,056	0,116	0,038
Seleen	Se	33,6	49,1	77,7	450
Thallium	Tl	17,5	54,2	128	86,1
Tin	Sn	0,013	0,056	0,116	0,038
Vanadium	V	5,15	31,7	83,8	19,0
Zilver	Ag	11,2	42,6	95,3	34,8
Zink	Zn	0,168	1,14	2,96	1,80
Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen					
Acenaftheen		0,0356	0,108	0,203	0,0892
Anthraceen		0,0367	0,146	0,284	0,146
Benzo(a)Anthraceen		0,0000036	0,0000145	0,0000282	
Benzo(a)Pyreen		0,280	0,466	0,770	
Benzo(b)Fluorantheen		0,056	0,093	0,154	
Benzo(ghi)Peryleen		0,043	0,072	0,119	
Benzo(k)Fluorantheen		0,015	0,025	0,041	
Chryseen		0,0022	0,0037	0,0061	
Dibenzo(ah)anthraceen		200	274	423	
Fenanthreen		0,042	0,169	0,329	
Fluorantheen		1,68	5,22	9,84	4,46
Fluoreen		0,260	0,532	0,929	
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen		37,3	51,1	79,1	
Naftaleen		0,188	0,289	0,466	0,137
Pyreen		0,178	0,646	1,240	0,604
Overige milieuschadelijke stoffen					
1,2-Dichloorethaan		2,68	3,66	5,66	5,08
Alachloor		0,194	0,78	1,52	
Aldrin		1650	2260	3490	
Atrazine		3,30	11,0	20,9	199
Bariumverbindingen	Ba	4,00	15,6	39,7	17,5
Benzeen		0,06	0,08	0,12	0,02
Bisfenol A		0,38	0,90	1,63	
Carbendazim		0,85	2,85	5,43	
Chloorbenzenen		0,0776	0,124	0,203	0,0651
Chloorfenvinfos		316	440	684	

Cyaniden		1,85	2,06	2,37	0,844
Di(2-Ethylhexyl)Ftalaat		9,74	13,3	20,6	
Dibutylftalaat		0,14	0,48	0,92	
Dichloormethaan		1,78	2,44	3,77	4,33
Dieldrin		5540	7610	11800	
Dioxinen	PCDD/PCDF	4850000	6640000	10300000	
Diuron		3,36	8,15	14,70	
Endosulfan		12,4	31,3	57,0	
Endrin		841	1330	2160	
Ethylbenzeen		0,0055	0,0129	0,0232	0,0088
Fenolen		0,00228	0,00449	0,00776	0,00254
Formaldehyde		0,84	1,15	1,78	0,24
Heptachloor		308	423	655	
Hexabromocyclododecaan		0,00292	0,0118	0,0229	
Hexachloorbenzeen		408	559	865	13,3
Hexachloorbutadieen		0,121	0,488	0,950	
Hexachloorcyclohexaan		24,2	36,9	59,4	
Irgarol		2,99	12,0	23,4	
Isodrin		0,11	0,42	0,82	
Mirex		6200	8480	13100	
Nonylfenol/Ethoxylaten	Np/Npe	0,250	1,01	1,96	
Polychloorbifenyyl	PCB	0,0019	0,00765	0,0149	
Pentachloorfenol		2,15	8,66	16,90	1,01
Simazine		2,62	4,06	6,56	
Tetrachlooretheen		7,45	10,2	15,8	2,11
Tolueen		0,0114	0,0182	0,0298	0,0069
Trichloorbenzenen		0,000262	0,001050	0,002050	
Trichlooretheen		0,0100	0,0174	0,0292	
Trichloormethaan (chloroform)		3,12	4,27	6,60	0,87
Trifenyltinverbindingen		168	273	447	
Trifluralin		13,0	18,4	28,8	0,36
Vinylchloride		0,73	1,00	1,54	
Xylenen		0,0114	0,019	0,0314	0,008

Tabel B3 Schaduw prijzen voor de emissie van stoffen naar bodem (in euro 2015 per kilogram)

		Ondergrens	Middenwaarde	Bovengrens	Handboek 2010
Meststoffen					
Stikstof	N	0,227	0,227	0,227	
Fosfor	P	0,025	0,101	0,196	0,101
Zware metalen					
Antimoonverbindingen	Sb	27,60	34,80	49,20	37,18
Arsenverbindingen	As	21,6	69,3	168	13,0
Cadmiumverbindingen	Cd	24,3	2.039	6.248	127
Chroomverbindingen	Cr	0,0000539	0,000636	0,00176	0,0000060
Koperverbindingen	Cu	0,012	0,239	0,695	0,0047
Kwikverbindingen	Hg	864	1.549	2.959	397
Loodverbindingen	Pb	0,11	14,20	43,60	0,13
Nikkelverbindingen	Ni	0,03	0,34	0,97	0,05
Seleenverbindingen	Se	117	161	249	
Vanadiumverbindingen	V	2,95	5,23	9,84	1,87
Zinkverbindingen	Zn	0,0934	8,78	26,9	0,286
Policyclische Aromatische Koolwaterstoffen					
Anthraceen		0,0082	0,0116	0,0183	36,51
Benzo(a)Anthraceen		0,00000197	0,00000795	0,00001550	
Benzo(a)Pyreen		68,4	93,6	145,0	
Benzo(b)Fluorantheen		13,7	18,7	28,9	
Benzo(ghi)Peryleen		3,73	5,11	7,91	
Benzo(k)Fluorantheen		10,6	14,5	22,5	
Chryseen		0,538	0,736	1,140	
Fenanthreen		0,000154	0,000619	0,001200	
Fluorantheen		0,0234	0,0412	0,0693	
Indeno (1,2,3-c,d)Pyreen		37,3	51,1	79,1	
Naftaleen		0,0434	0,0595	0,0920	
Overige milieuschadelijke stoffen					
Bariumverbindingen	Ba	7,67	9,14	12,0	11,1
Benzeen		0,12	0,16	0,25	
Chloorbenzenen		0,0565	0,0777	0,120	
Dibutylftalaat		0,01	0,02	0,04	
Dioxinen	PCDD/PCDF	751.000	1.030.000	1.590.000	
Ethylbenzeen		0,00255	0,00350	0,00541	
Fenol en Fenolaten		0,00350	0,00486	0,00756	
Hexachloorbenzeen		248	339	525	
Hexachloorcyclohexaan		1,84	2,56	3,99	
Pentachloorfenol		0,00	0,00	0,01	
Polychloorbifenyyl	PCB	0,01	0,01	0,01	
Tolueen		0,00717	0,00981	0,0152	
Trichloorbenzenen		0,00	0,00	0,00	
Xylenen (Totaal)		0,00520	0,00712	0,0110	

Appendix C

Milieuschade diverse activiteiten

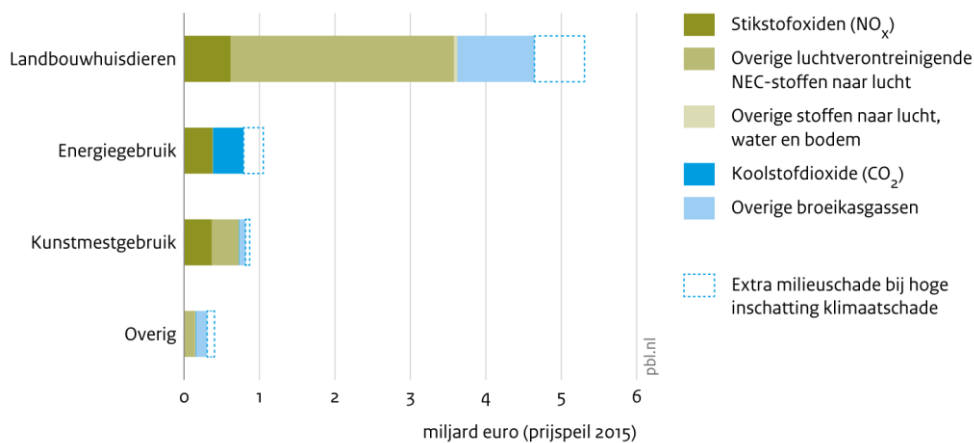
In deze appendix gaan we dieper in op de milieuschade bij de verschillende doelgroepen die in de Emissieregistratie worden onderscheiden. Ook wordt steeds kort aangegeven hoe deze (sub)doelgroepen zich verhouden tot de productgroepen in het rapport over de rol van grondstoffen en materialen (zie Vollebergh et al. 2017) en de aldaar onderscheiden fasen van het economisch proces (zie ook paragraaf 2.1).

C.1 Milieuschade door de landbouw

Volgens onze berekening is de landbouw verantwoordelijk voor 6,5 miljard euro milieuschade. Als rekening wordt gehouden met de extra klimaatschade, komt daar nog ongeveer 1 miljard euro bij. Binnen de landbouw wordt verreweg de meeste milieuschade veroorzaakt door de veeteelt. Waar bij de meeste andere activiteiten de emissie van NO_x en CO₂ voor de meest milieuschade zorgen, is dat in de veeteelt vooral ammoniak, methaan en lachgas. Deze milieuschade van de landbouw is overigens grotendeels niet meegenomen in de berekeningen van Vollebergh et al. (2017) omdat daar geen aandacht is besteed aan de rol van biomassa als grondstof voor voedsel en energie.

Figuur C.1

Monetaire milieuschade door landbouw, 2015



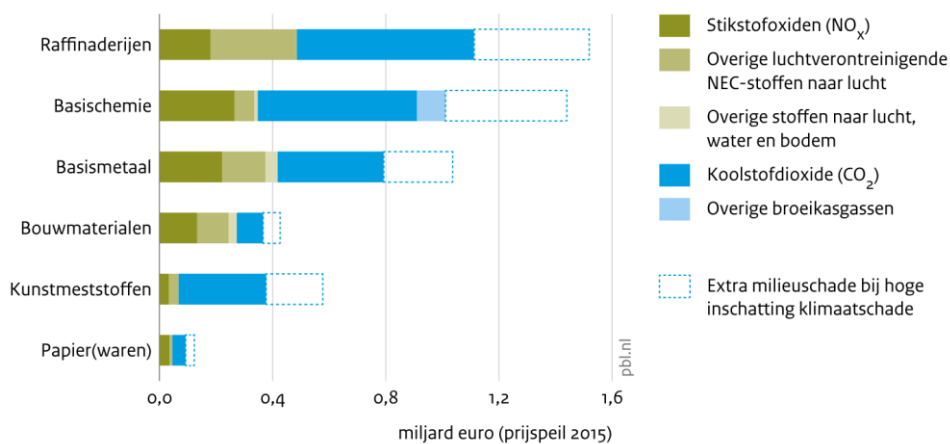
Bron: Emissieregistratie en CE Delft 2017

C.2 Milieuschade door de nijverheid

Op basis van de onderscheiden doelgroepen is het mogelijk de nijverheid onder te verdelen in de basisindustrie en de verwerkende industrie. Het gaat dan om sectoren en producten die in Vollebergh et al. (2017) zijn aangemerkt als de productiefase (fase 2). In totaal gaat het hier om 3,75 miljard euro milieuschade in de basisindustrie in 2015 en een kleine 1 miljard euro in de verwerkende industrie. Als rekening wordt gehouden met de extra klimaatschade, komt daar nog een kleine 1,5 respectievelijk 300 miljoen euro bij. De verwerkende industrie veroorzaakt duidelijk veel minder emissies, en daardoor milieuschade, dan de basisindustrie.

Figuur C.2

Monetaire milieuschade door basisindustrie, 2015

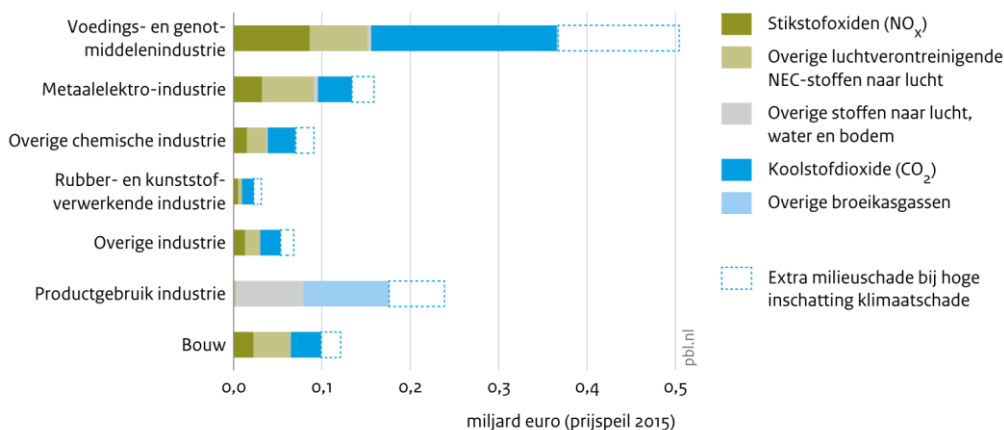


Bron: Emisieregistratie en CE Delft 2017

Binnen de basisindustrie (zie figuur C.2) veroorzaken de raffinaderijen de meeste schade, op de voet gevolgd door de basischemie. Maar ook de basismetaal is nog goed voor 1 miljard euro milieuschade, gevolgd door bouwmaterialen en kunstmeststoffen. Opvallend is verder dat in deze sector wel degelijk de meeste schade wordt veroorzaakt door broeikasgassen en veel minder schade door luchtverontreiniging.

Figuur C.3

Monetaire milieuschade door verwerkende industrie en bouw, 2015



Bron: Emisieregistratie en CE Delft 2017

Bij de verwerkende industrie (zie figuur C.3) valt met name de voedings- en genotmiddelenindustrie nog op, met een kostenpost van een kleine 0,5 miljard euro milieuschade. De schade van de hele 'overige industrie' is beperkt. Deze bestaat onder meer uit de textiel- en tapijtindustrie, de houtbewerkende industrie en de grafische industrie. Een interessante categorie tot slot is de schade door productgebruik in de industrie. Deze heeft nog een omvang van bijna 200 miljoen en komt voor het overgrote deel door HFK's en NMVOS die vrijkomen bij koelen, vriezen en aircogebruik en verder vooral bij het gebruik van hard isolatieschuim. De emissie door het gebruik van deze producten wordt in de Emissieregistratie niet verder toegedeeld aan de verschillende industriële sectoren.

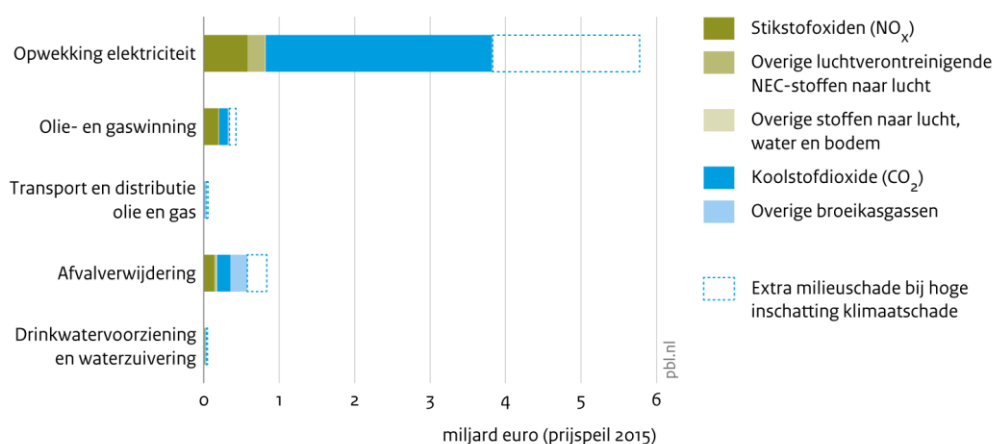
C.3 Milieuschade door de energiesector en overige nutsbedrijven

In de Emissieregistratie is de energiesector samen met de overige nutsbedrijven een aparte doelgroep. Daaronder valt de winning van aardgas en aardolie (fase 1 in Vollebergh et al. 2017), de opwekking van elektriciteit en de distributie van energie door de energiebedrijven (fase 2 en 3) en afvalverwijdering (fase 4). Naast de energiebedrijven zijn er nog andere bedrijven die voor nutsvoorzieningen zorgen. De Emissieregistratie onderscheidt hier drie doelgroepen: afvalverwijdering, drinkwatervoorziening en riolerings- en waterzuiveringsinstallaties.

In totaal veroorzaken deze doelgroepen een kleine 5 miljard euro milieuschade en daar komt nog 2,25 miljard euro bij als rekening wordt gehouden met de extra klimaatschade (zie figuur C.4). De reden dat deze schade zo gevoelig is voor de milieuprijs van broeikasgassen, is dat met name klimaatschade dominant is bij de opwekking van elektriciteit. Dit hangt samen met de hoge koolstofintensiteit daarvan in Nederland.

Figuur C.4

Monetaire milieuschade door energie, water en afval, 2015



Bron: Emissieregistratie en CE Delft 2017

Deze berekeningen bevestigen overigens de bevindingen uit Vollebergh et al. (2017) over het relatieve belang van de verschillende fasen in de grondstof- en materiaalketen, namelijk dat fase 2 dominant is bij het veroorzaken van milieuschade. Immers, de schade van olie- en gaswinning is hier eveneens betrekkelijk klein en ook de afvalverwijdering gaat weliswaar nog gepaard met de nodige milieuschade, namelijk zo'n 600 miljoen euro, maar deze is inderdaad beperkt vergeleken met de schade veroorzaakt in fase 2 en de moeilijk aan fase 2

of 3 toe te rekenen schade door de opwekking van elektriciteit en door verkeer en vervoer (zie hierna).

C.4 Milieuschade door verkeer en vervoer

Verkeer en vervoer is de doelgroep met verreweg de grootste milieuschade. De totale schade van deze doelgroep bedroeg in 2015 zo'n 12,25 miljard euro en daar komt nog ruim 1,5 miljard bij in het geval van de tweegradendoelstelling (zie figuur C5). Deze toename is betrekkelijk gering omdat de milieuschade door verkeer en vervoer wordt gedomineerd door de schade als gevolg van luchtverontreinigende stoffen.

Figuur C.5

Monetaire milieuschade door verkeer en vervoer, 2015



Bron: Emissieregistratie en CE Delft 2017

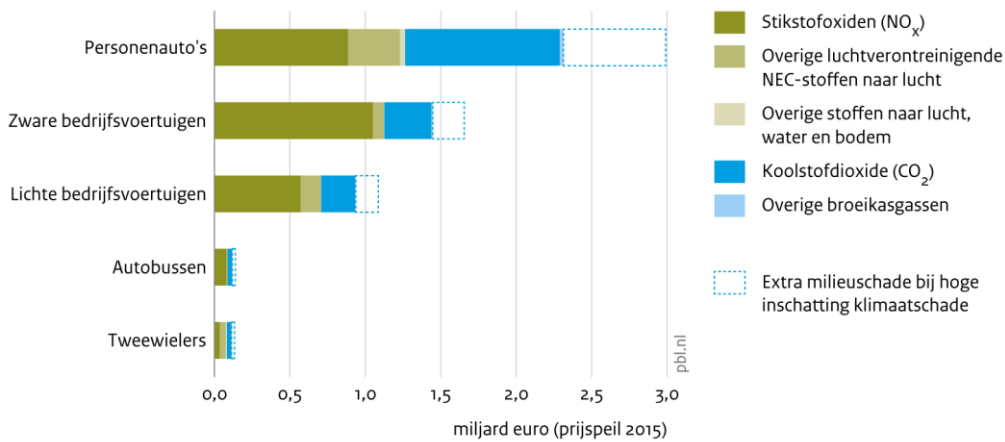
Figuur C.5 maakt duidelijk dat vooral het wegverkeer en de zeescheepvaart verantwoordelijk zijn voor de milieuschade; beide zijn goed voor een kleine 5 miljard aan schade. Met name de schade door de zeescheepvaart valt hoog uit. Dat is mede het gevolg van de beperkte regulering van deze sector en van de stikstofoxiden (zie ook paragraaf 4.4). De milieuschade door de luchtvaart is juist weer relatief gering omdat in onze berekening – conform de aanpak in de Emissieregistratie – alleen de start- en landingscycli (LTO) worden meegenomen. Emissies die boven de 3.000 voet plaatsvinden, worden niet meegenomen, ook al vinden die binnen Nederland en het Nederlandse continentaal plat plaats.²² Verder is er nog milieuschade door het gebruik van smeermiddelen in het verkeer, die niet is toegekend aan één van de vervoersmodaliteiten. Die schade is ongeveer 2,5 miljoen euro en volledig het gevolg van CO₂-emissies.

Een verdere opsplitsing van de milieuschade door het wegverkeer (zie figuur C.6) maakt duidelijk dat met name personenauto's en zware bedrijfsvoertuigen (vrachtauto's en bestelauto's) verantwoordelijk zijn voor bijna alle schade door het wegverkeer. Doordat verreweg de meeste bedrijfsvoertuigen diesel verbruiken, is de schade door luchtverontreiniging relatief extra groot.

²² Zoals eerder aangegeven, wijken de luchtvaartemissies volgens IPCC hiervan af. Voor de IPCC-berekening worden alleen de emissies voor binnenlandse vluchten aan Nederland toegekend.

Figuur C.6

Monetaire milieuschade door wegverkeer, 2015



Bron: Emisierregistratie en CE Delft 2017

C.5 Milieuschade door de dienstensector en consumenten

Tot slot resteren nog twee doelgroepen, namelijk de dienstensector, die bij de Emisierregistratie 'Handel, Diensten en Overheid' wordt genoemd, en de consumenten. Beide sectoren zijn eerder in Vollebergh et al. (2017) niet meegenomen in de berekeningen omdat in deze doelgroepen slechts sprake is van een indirecte relatie met de productie van grondstoffen en materialen. In feite gaat het voor beide doelgroepen om fase 3, dat wil zeggen de fase waarin eindproducten worden 'geconsumeerd'.

Figuur C.7

Monetaire milieuschade door consumenten en diensten, 2015



Bron: Emisierregistratie en CE Delft 2017

In totaal gaat het hier om ruim 2,25 miljard euro schade, waar nog een kleine 1 miljard bijkomt als rekening wordt gehouden met de tweegradendoelstelling (zie figuur C.7). Het

grootste deel van de milieuschade is het gevolg van energieverbruik voor ruimteverwarming en warm watergebruik. Met name de verbranding van aardgas voor dit doel zorgt voor het aanzienlijke aandeel broeikasgassen in beide sectoren. Dit gebruik wordt ook wel aangeduid als het gebruik door de gebouwde omgeving. Merk op dat in deze berekening geen schade wordt toegerekend als gevolg van de opwekking van elektriciteit dan wel verkeer en vervoer.

Behalve milieuschade verbonden aan energieverbruik veroorzaken deze doelgroepen ook andere milieuschade. Vooral voor consumenten is de milieuschade door andere activiteiten dan aardgasverbruik goed voor bijna 800 miljoen euro milieuschade. Met name ammoniak (27 procent), het fijnere fijnstof (PM_{2,5}: 26 procent), CO₂ (17 procent), NO_x (10 procent) en NMVOS (9 procent) spelen een rol. Ammoniak wordt met name veroorzaakt door de afzet van mest bij particulieren en op natuurterreinen (bijna de helft; ongeveer 20 procent van de mest wordt afgezet op natuurterreinen) en mest van huisdieren (ongeveer 21 procent). Daarnaast is veel van de schade het gevolg van open haarden (sfeerverwarming woning). Het grootste deel van de NMVOS-emissies komt vrij bij het gebruik van producten die oplosmiddelen bevatten.

De schade door de overige activiteiten van de dienstensector is voor ruim 70 procent het gevolg van ammoniak en voor zo'n 25 procent door NMVOS. De ammoniakemissie wordt weer voor zo'n 85 procent veroorzaakt door paarden en pony's die in het bezit zijn van particulieren en waarvan de emissie – en dus ook de milieuschade – wordt toegekend aan de dienstensector. De overige 15 procent is het gevolg van het gebruik van schoonmaakmiddelen. Van de NMVOS-schade wordt ongeveer 40 procent veroorzaakt door op- en overslag terwijl de rest kan worden toegeschreven aan diverse activiteiten, zoals schoonmaak en onderhoud.²³

²³ Ongeveer 14 procent is het gevolg van het gebruik van verven en lakken bij autoreparaties, 13 procent door het gebruik van schoonmaakmiddelen, bijna 12 procent door andere producten met oplosmiddelen, 7 procent bij autotanks van benzinestations (verdriftingsverliezen), en ongeveer 5 procent in de groothandel van brandstoffen en 8 procent door ander productgebruik in de dienstensector.