



Effecten van een belasting op luchtvervuiling voor drie sectoren

Een belasting op luchtvervuiling in de Nederlandse industrie zorgt ervoor dat de emissies hiervan op korte termijn sterk afnemen. Dit volgt uit analyses met de Rekentool Beprijzing Luchtvervuiling. Deze tool berekent het effect van een belasting gelijk aan de maatschappelijke kosten van een kilo uitstoot op stikstofoxiden (NO_x), zwaveldioxide (SO₂) en fijnstof (PM_{2,5}) in drie sectoren in Nederland: de productie van ijzer en staal, kunstmest en ethyleen.

Door de belasting stijgen de kosten en kan de productie in de Nederlandse industrie dalen. De productiedaling in 2050 varieert per sector: van enkele tienden procenten in de ethyleenproductie, tot rond de 4% in de ijzer- en staal- en in de kunstmestindustrie.

Samenvatting en conclusies

Een belasting op luchtverontreiniging in de Nederlandse industrie zorgt ervoor dat de emissies hiervan op korte termijn sterk afnemen. Dit volgt uit analyses met de Rekentool Beprijzing Luchtverontreiniging. Deze rekentool berekent het effect van een belasting op de belangrijkste luchtvervuilende stoffen in de Nederlandse industrie: stikstofoxiden (NO_x), zwaveldioxide (SO₂) en fijnstof (PM_{2,5}). Drie specifieke sectoren zijn hiervoor onderzocht: ijzer- en staalproductie, ethyleenproductie en de kunstmestindustrie. Deze industrieën kunnen emissies van luchtvervuilende stoffen op relatief korte termijn terugdringen door bestaande technologieën in te voeren, zoals filters.

De belasting per kilogram die we analyseren is gelijk aan de maatschappelijke kosten van een kilogram uitstoot. Deze maatschappelijke kosten bestaan voor het grootste gedeelte uit gezondheidsschade. De stoffen NO_x, SO₂ en PM_{2,5} vertegenwoordigen op het gebied van luchtvervuiling voor de industrie de grootste schade. Een vermindering van deze schade levert voor Nederland maatschappelijke baten op, hoewel een deel van de uitstoot ook naar het buitenland verdwijnt.

Bedrijven zetten technologieën in om emissies te reduceren als de baten ervan hoger zijn dan de kosten. Een bedrijf besluit om een technologie in te voeren als de belasting per kilogram uitstoot hoger is dan wat de technologie om een kilogram uitstoot te verminderen kost. Veel bestaande technologieën die binnen de industrie op dit moment beschikbaar zijn voldoen aan dit criterium.

Alleen CO₂-beprijzing zou ook tot een afname van luchtverontreinigende emissies leiden, maar minder en pas op de langere termijn. De resultaten van een belasting op luchtvervuilende stoffen worden vergeleken met een basispad waarin alleen CO₂-beprijzing bestaat, gebaseerd op het Europese Emissions Trading System (ETS). In dit basispad kunnen emissies van luchtvervuilende stoffen ook afnemen, omdat technologieën voor CO₂-reductie co-benefits kennen: ze verminderen ook de uitstoot van met name NO_x en SO₂.

Door een belasting op luchtvervuiling stijgen de kosten en daalt de productie in de Nederlandse industrie. De kosten nemen toe door de reductiekosten die bedrijven maken. Omdat we als uitgangspunt nemen dat alleen Nederland deze belasting invoert, stijgt de prijs van Nederlandse producten ten opzichte van die van het buitenland. De sectoren die wij bekijken exporteren veel, waardoor het effect op de vraag groot kan zijn. De productiedaling in 2050 varieert per sector: van enkele tienden van procenten in de ethyleenproductie, tot rond de 4% in de ijzer- en staalindustrie en in de kunstmestindustrie.

De resultaten zijn met onzekerheid omgeven, en kennen daarom een aanzienlijke bandbreedte. Om de berekeningen te doen zijn enkele belangrijke aannames gedaan, zoals constante reductiekosten en een jaarlijkse efficiëntieverbetering. De invloed van deze aannames is onderzocht door verschillende gevoeligheidsanalyses te doen. Deze analyses geven voor de drie onderzochte sectoren een variatie van ±1 %-punt voor de kostenstijging, en ±7%-punt voor daling in de sectorale productie.

1 Inleiding

De Policy Brief ‘Circulaire economie: economie en ecologie in balans’ verwoordt het principe dat een circulaire economie begint bij het beprijzen van milieuschade (Romijn e.a., 2018). Dit Achtergronddocument en de bijbehorende rekentool geven meer houvast bij dit principe door een kwantitatieve analyse van de effecten van beprijzing te presenteren. De analyse in dit Achtergronddocument vormt de onderbouwing van de Policy Brief “Een belasting op luchtvervuiling in de Nederlandse industrie” (Mot e.a., 2019).

We willen daarom uitspraak kunnen doen over de effecten van een directe belasting op luchtvervuilende uitstoot voor de Nederlandse industrie. Wat doet een belasting met de hoogte van emissies¹, productie- en kostenniveaus van een industriële sector? Bij een directe belasting krijgt uitstoot van stoffen die de lucht vervuilen een prijs per kilogram. Deze *milieuprijs* verschilt per stof en is afhankelijk van de schade die uitstoot van die stof veroorzaakt (bijvoorbeeld gezondheidsschade). Een dergelijke belasting wordt ook wel een *Pigouviaanse* of *Pigou-belasting* genoemd (Pigou, 1952). Als bron voor de milieuprijzen gebruiken we het Handboek Milieuprijzen (De Bruyn e.a., 2017).

We werken de analyse uit voor drie sectoren: ijzer & staal, kunstmest en ethyleen. Zij kennen namelijk een hoge jaarlijkse uitstoot van luchtvervuilende stoffen. Een belasting op luchtvervuiling zou voor deze sectoren dus een grote impact kunnen hebben. We beperken de analyse tot de drie stoffen die landelijk voor de industrie – in geld uitgedrukt -de grootste schade vertegenwoordigen: zwaveldioxide (SO₂), fijnstof (PM_{2,5})² en stikstofoxiden (NO_x). Ook gaan we ervan uit dat de belasting alleen in Nederland wordt opgelegd en het buitenland geen soortgelijke maatregelen neemt.

Voor de analyse introduceren we de Rekentool Beprijzing Luchtvervuiling³, waarmee we de effecten per sector berekenen met behulp van sectorspecifieke gegevens. Om deze rekentool te kunnen gebruiken is per sector onder andere een beeld nodig van de beschikbare schone technologieën, de vormgeving van het productieproces en de huidige emissie- en kostenniveaus. Deze kenmerken lopen tussen sectoren uiteen. Wel heeft de Nederlandse industrie een aantal generieke mogelijkheden om luchtvervuiling te verminderen. Vanwege de benodigde aannamen zijn de uitkomsten van de berekening met onzekerheden omgeven. De resultaten geven wel een indruk van de orde van grootte van de effecten.

Om de invloed van onzekerheden op de resultaten in kaart te brengen voeren we gevoeligheidsanalyses uit. Deze analyses laten zien binnen welke bandbreedte de kwantitatieve resultaten vallen en vervullen zo een cruciale rol bij de interpretatie ervan. Wat als bijvoorbeeld technologie voor emissiereductie duurder blijkt te zijn? En wat als de milieuprijs verbonden aan luchtvervuiling hoger uitvalt?

¹ Als we in dit Achtergronddocument over emissies spreken, gaat het altijd om emissies die direct afkomstig zijn uit een industriële installatie. Naast directe emissies bestaan er ook indirecte emissies die verband houden met industriële activiteit, bijvoorbeeld uitstoot van een naburige elektriciteitscentrale. Omdat we de energiesector niet in ons onderzoek meenemen, laten we ook de indirecte emissies buiten beschouwing.

² Hier staat ‘PM_{2,5}’ voor het aandeel fijnstof (Particulate Matter) met een diameter van maximaal 2,5 micrometer. Fijnstof wordt ook vaak aangeduid als ‘PM₁₀’ (diameter maximaal 10 micrometer). Het aandeel PM_{2,5} valt dus binnen PM₁₀, maar veroorzaakt verreweg het grootste deel van de schade. Uit gesprekken met CE Delft blijkt dat de milieuprijs van ‘PM₁₀ niet zijnde PM_{2,5}’ 4,90 euro is, tegenover 79,50 euro voor PM_{2,5}. Daarom spreken we als we het hebben over fijnstof in deze publicatie alleen over PM_{2,5}.

³ Hierna: rekentool.

De rekentool beperkt zich tot directe effecten van een Pigou-belasting binnen industriële sectoren. Wat we met de rekentool niet kunnen analyseren is hoe beprijzing effect heeft op gebruik van grondstoffen en materialen, op afvalstromen en of beprijzing bijvoorbeeld ecodesign en recycling bevordert. Hoewel we verwachten dat beprijzing een gunstige uitwerking heeft op deze zaken omdat het gebruik van vervuilende grondstoffen duurder wordt, is de rekentool niet geschikt om deze uitwerking te geven.⁴ Ook kijken we met de rekentool niet naar de doorwerking van effecten binnen een sector op de rest van de Nederlandse economie.

Leeswijzer

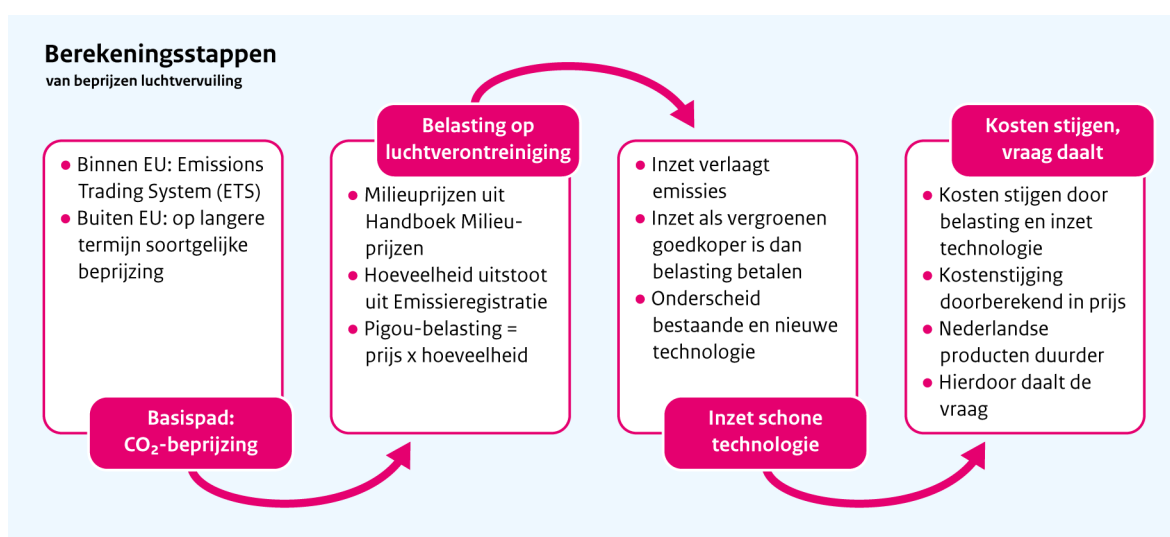
In hoofdstuk 2 bespreken we de opzet van de rekentool, de verschillende stappen van de berekening en de daarbij gemaakte aannamen. Hoofdstuk 3 beschrijft de verschillende typen berekeningen die met de rekentool gedaan zijn en de resultaten van die berekeningen. Bijlagen A tot en met E beschrijven in detail de informatie die in de rekentool gebruikt wordt over milieuschade, de drie sectoren en technologieën en hun kosten. Bijlage F geeft ten slotte een volledige specificatie van de vergelijkingen van de rekentool in formulevorm.

2 Een rekentool voor beprijzing van industriële luchtvervuiling

Het doel van de Rekentool Beprijzing Luchtvervuiling is kwantitatief inzicht krijgen in de effecten van een Pigou-belasting op luchtvervuilende emissies⁵ in de Nederlandse industrie. Deze effecten komen tot stand, doordat zowel Nederlandse bedrijven als (buitenlandse) afnemers van deze bedrijven reageren op de belasting. Nederlandse bedrijven krijgen door de belasting namelijk te maken met hogere kosten. Afnemers van Nederlandse producten worden geconfronteerd met hogere prijzen, en gaan voor hun producten mogelijk op zoek naar andere, goedkopere partijen. Tegelijkertijd heeft de belasting effect op de emissies van luchtvervuiling in Nederland. Beide mechanismen zijn in de rekentool verwerkt.

Figuur 2.1 toont schematisch de verschillende stappen van de berekening in de rekentool, die we hierna verder toelichten.⁶

Figuur 2.1 De rekentool bestaat uit vier stappen



⁴ Verrips e.a., (2019) doet wel een kwalitatieve analyse naar (het bevorderen van) de vraag naar secundaire grondstoffen (recycling).

⁵ Emissiegegevens zijn voor zover beschikbaar afkomstig uit de Emissieregistratie (Rijksoverheid, 2019).

⁶ Zie bijlage F voor een specificatie van de vergelijkingen van de rekentool.

2.1 Alleen CO₂-beprijzing in het basispad

Voor de rekentool formuleren we een basispad waarin de drie industriële sectoren alleen betalen voor CO₂-uitstoot.⁷ De drie sectoren vallen onder het Europese Emissiehandelssysteem (ETS), waar voor CO₂ een prijs tot stand komt. De maatregelen uit het klimaatakkoord zullen weliswaar gevolgen hebben voor de Nederlandse industrie, maar de exacte uitwerking en timing van deze maatregelen voor de industrie zijn complex en onzeker, zeker richting 2050. Om deze onzekerheid buiten de analyse te houden, beperken we ons tot ETS-prijzen.

De CO₂-prijs zal naar verwachting sterk gaan stijgen naarmate het aantal CO₂-rechten binnen het ETS afneemt. Voor de ETS-prijs in 2030 maken we gebruik van de projectie van het PBL (Brink, 2018). In 2050 veronderstellen we een CO₂-prijs van 200 euro per ton (Aalbers e.a., 2016). Sommige bedrijven die onder het ETS vallen krijgen gratis rechten toegewezen op basis van o.a. historische productiecijfers, vanwege mogelijke weglek van CO₂-uitstoot naar andere delen van de wereld (Europese Commissie, 2019). Ook met gratis rechten ervaren ETS-bedrijven aan de marge dezelfde prikkel om CO₂-emissies te reduceren. Als zij immers een ton minder CO₂ uitstoten, kunnen zij het bijbehorende ETS-recht verkopen op de markt tegen de dan geldende prijs, ongeacht of dit recht gekocht of gratis toegewezen was.

Geografisch onderscheiden we drie gebieden: Nederland (NL), de Europese Unie (EU) en de rest van de wereld (ROW). Deze onderverdeling is gekozen om onderlinge prijsverschillen die voortkomen uit emissiebelastingen te kunnen inschatten. Het ETS-systeem voor de veiling van CO₂-uitstootrechten geldt voor heel Europa. We nemen aan dat in 2050 in de rest van de wereld dezelfde CO₂-prijs geldt als in de EU omdat landen buiten Europa ook klimaatbeleid gaan voeren.

2.2 Een Pigou-belasting op luchtverontreiniging

De Pigou-belasting op luchtverontreinigende uitstoot geldt voor de stoffen SO₂, NO_x en PM_{2.5}. In de rekentool worden alleen deze stoffen meegenomen, omdat zij in geld uitgedrukt de grootste schade teweegbrengen (zie bijlage A). De emissies in 2015 zijn afkomstig uit de Emissieregistratie (Rijksoverheid, 2019). We veronderstellen dat de Pigou-belasting alleen in Nederland wordt ingevoerd (zie tabel 2.1).

Tabel 2.1 Reikwijdte Pigou-belasting luchtverontreiniging per (zicht)jaar en gebied.

	2030	2050
Nederland	Ja, volledig	Ja, volledig
EU	Geen	Geen
Rest van de wereld	Geen	Geen

⁷ De Nederlandse industrie blijft onder de geldende emissieplafonds voor luchtvervuiling, waardoor deze geen prikkel (meer) geven tot verdere emissiereductie voor deze stoffen.

Voor het bepalen van de Pigou-belasting per sector gebruiken we milieuprijzen per kilogram uitstoot, zoals gegeven in het Handboek Milieuprijzen (De Bruyn e.a., 2017). Deze prijzen geven de welvaartsverliezen weer die optreden als er één extra kilogram van de stof in het milieu terecht komt. Het Handboek geeft voor iedere stof een lage, hoge en een middenwaarde (zie tabel 2.2). We veronderstellen dat deze prijzen reëel constant blijven in de tijd (in prijzen van 2015) en gelden voor heel Nederland. Ook variëren de prijzen in de berekening niet per locatie.⁸ We laten eventuele interacties tussen stoffen buiten beschouwing, waardoor de totale belasting neerkomt op de som van de belastingen per stof.

Tabel 2.2 Milieuprijzen luchtvervuilende stoffen, prijspeil 2015

Stof	Milieuprijs - laag	Milieuprijs - midden	Milieuprijs - hoog
NO _x	€24,10	€34,70	€53,70
SO ₂	€11,20	€19,40	€32,30
PM _{2,5}	€56,80	€79,50	€122,00

Bron: De Bruyn e.a. (2017).

De Pigou-belasting wordt meteen volledig ingevoerd. De overheid kan ervoor kiezen een belasting gefaseerd in te voeren, om bedrijven tijd te geven voor bijvoorbeeld de ontwikkeling van nieuwe technologieën. Omdat in dit geval de technologie al beschikbaar is, lijkt hier minder reden voor. De aankondiging dient natuurlijk wel voldoende tijdig te zijn.

2.3 Inzet van technologie vermindert luchtvervuiling

Een Pigou-belasting op emissies leidt tot een kosten-batenafweging op bedrijfsniveau. Een bedrijf zet een bepaalde technologie in als de marginale kosten van die technologie lager zijn dan de belasting per eenheid emissie.⁹ De technologie is in dat geval economisch rendabel. Als er voor een gegeven stof meerdere technologieën bestaan, begint een bedrijf met het inzetten van de goedkoopste optie. Door de inzet van schone technologie dalen de emissies, over alle 'overblijvende' emissies betaalt het bedrijf de Pigou-belasting.

De rekentool bevat daarom per sector een overzicht van technologieën om emissies terug te dringen, de kosten hiervan en, indien relevant, jaar van invoering.¹⁰ Sommige technologieën zijn nog niet voldoende ontwikkeld om nu al ingevoerd te worden. Sommige technologieën kunnen de emissies van meerdere stoffen verlagen; dan spreken we van co-benefits. Verder kunnen technische mogelijkheden specifiek zijn voor een sector, of generiek toepasbaar in alle drie de industriële sectoren.

⁸ Het is aannemelijk dat in werkelijkheid de prijzen wel per locatie variëren. Uitstoot van fijnstof is bijvoorbeeld schadelijker in dichtbevolkte gebieden. Milieuprijzen op lokaal niveau zijn echter veelal niet beschikbaar. In hoeverre industriële emissies lokaal neerslaan of juist op grote afstand is installatiespecifiek en van veel factoren afhankelijk, zoals weersomstandigheden en hoogte van schoorstenen.

⁹ Een sector anticipeert in de tool niet op toekomstige ontwikkelingen bij het maken van een keuze. Het kan mogelijk zijn dat een optimalisatie over de tijd leidt tot een lagere totale kostenstijging (belasting en reductiekosten), bijvoorbeeld doordat bedrijven investeringen in CO₂-reductie naar voren halen om daarmee ook (een deel van) de Pigou-belasting te vermijden.

¹⁰ Zie bijlagen B t/m D voor een beschrijving van sectorspecifieke technologieën en bijlage E voor het complete overzicht.

We veronderstellen dat de kosten per eenheid vermeden emissie (de *marginale reductiekosten*) van een technologie constant zijn.¹¹ Deze kosten variëren in de rekentool dus niet door de tijd en zijn onafhankelijk van de hoeveelheid vermeden emissie. In de regel zijn de marginale reductiekosten echter niet constant, maar kunnen ze bijvoorbeeld sterk stijgen als de concentratie af te vangen stof in de uitlaatgassen daalt.¹² Hiermee rekening houden vereist gedetailleerde informatie over uitstootconcentraties op installatieniveau, die niet (publiek) beschikbaar is. Om toch de invloed van deze veronderstelling op de uitkomsten te beoordelen, doen we een extra gevoeligheidsanalyse, waarbij we aannemen dat het voor bedrijven niet rendabel is om voor de laatste 10% van de luchtvervuilende emissies te investeren in technische oplossingen.

Los van de inzet van specifieke reductietechnologieën nemen wij aan dat de emissies van bedrijven dalen door het voortdurend optimaliseren van bestaande productieprocessen en de emissies die daarbij vrijkomen. Ook na het toepassen van nieuwe reductietechnologie kunnen er leereffecten optreden, waarbij deze technologie na introductie steeds effectiever wordt ingezet. Jaarlijks dalen de emissies in de rekentool met een vast percentage.¹³ Binnen de tool is deze autonome verbetering kostenneutraal opgenomen. De verbetering zou bijvoorbeeld gefinancierd kunnen worden vanuit de bestaande, jaarlijkse onderzoeksbudgetten waarover bedrijven in de sector beschikken.

2.4 Kostenstijging werkt door in vraag, import en export

De kostenstijging die de Pigou-belasting teweeg brengt, werkt in de rekentool door als een daling van de binnenlandse en buitenlandse vraag naar Nederlandse producten. IJzer & staal, ethyleen en kunstmest zijn export intensieve sectoren waardoor ze gevoelig zijn voor prijsverschillen ten opzichte van het buitenland. Deze sectoren opereren in een globale markt, de concurrentiepositie ten opzichte van het buitenland is dus belangrijk. De invloed die milieubeprijzing in Nederland heeft op de concurrentiepositie, hangt mede af van de manier waarop het milieubeleid zich in het buitenland ontwikkelt.¹⁴ Tabel 2.3 laat zien hoeveel van de productie per sector bestemd is voor de export.

Tabel 2.3 De drie sectoren exporteren veel, met name binnen Europa

	IJzer en staal	Ethyleen	Kunstmest
Export (% , totale productie)	75%	85%	89%
Export naar EU (% , totale export)	84%	78%	73%
Import vanuit EU (% , totale import)	96%	62%	79%

Bronnen: CBS Statline; Tata Steel (2018); Meststoffen Nederland (2015); DOW Benelux (2015).

¹¹ Hiermee laten we ook bedrijfsspecifieke vormgeving van investeringsbeslissingen (bijvoorbeeld manier van afschrijven en onderscheid tussen kapitaal- en operationele kosten) buiten beschouwing.

¹² Zie onder meer DHV (2009).

¹³ Dit is in lijn met de Evaluatie Meerjarenafspraken Energie Efficiëntie 2008-2020 (Ecorys, 2013).

¹⁴ Naast milieubeleid zijn er veel andere factoren die de concurrentiepositie van bedrijven in een land bepalen. Nederland scoort traditioneel hoog op ranglijsten van concurrentiekracht, zie bijvoorbeeld (World Economic Forum, 2019).

Invoering NO_x-belasting in Denemarken

Denemarken heft sinds 2007 een belasting op stikstofoxiden (NO_x). Deze belasting geldt voor stationaire installaties in de energie-intensieve industrie en energieopwekking. Het belastingtarief bedroeg in beginsel 70 eurocent per kilo uitgestoten stikstof. In 2012 is de belasting op NO_x verhoogd naar 3,35 euro per kilo.

De emissies zijn hierdoor sterk gedaald, waardoor ook de belastinggrondslag grotendeels is verdwenen. De emissies van NO_x zijn sterk naar beneden gegaan door de introductie van de belasting (bron: presentatie Jens Holger Hansen, International Tax Dialog juli 2019, OECD). Ook onder het lage tarief daalden de emissies. In de cementindustrie bijvoorbeeld, waren de NO_x-emissies in 2013 een zesde van wat ze in 2005 waren. Hierdoor zijn ook de belastingopbrengsten, na een initiële stijging, weer flink gedaald (zie onderstaande figuur). Er zijn geen gegevens van de opbrengsten van deze belasting beschikbaar voor 2010.

De grondslag van de NO_x-belasting in Denemarken is grotendeels verdwenen



Bron: Statistics Denmark ([link](#)).

De mate waarin de productie in Nederland verandert, hangt af van het verschil in prijzen tussen Nederland en het buitenland. De prijzen in Nederland stijgen ten opzichte van het buitenland door de kosten van schone technologie en door belasting over de overgebleven emissies.¹⁵ Wij nemen aan dat bedrijven deze kosten volledig doorberekenen in hun afzetprijzen. Buitenlandse afnemers zullen daardoor bijvoorbeeld minder Nederlands staal inkopen, waardoor de staalexport vanuit Nederland daalt. Tegelijk zal een deel van de

¹⁵ We nemen daarbij aan dat bedrijven de kostenstijging geheel doorberekenen aan klanten. Deze aanname is conservatief: afhankelijk van zijn situatie kan een bedrijf overwegen om de prijsstijging en daarmee de vraagdaling te beperken door (een deel van) de kostenstijging niet door te berekenen en deze ten koste te laten gaan van de winst per eenheid productie.

Nederlandse vraag naar staal niet meer vervuld worden door Nederlandse productie, maar door import uit het buitenland.

De Armington-elasticiteit drukt de sterkte van dit effect uit. Deze geeft aan met welk percentage de Nederlandse export daalt (de import stijgt) als de prijs van Nederlandse producten met 1% stijgt ten opzichte van het buitenland. We gebruiken de Armington-elasticiteiten uit het Worldscan-model (Bollen en Rojas-Romagosa, 2018).

Omdat de belangrijkste handelspartners onderdeel zijn van de EU, geldt voor hen dezelfde CO₂-beprijzing. Binnen alle landen die lid zijn van de EU valt de energie-intensieve industrie onder het Emissiehandelssysteem EU ETS, waaronder de drie sectoren die in de rekentool zijn opgenomen. Hun Europese concurrenten hebben daarom te maken met dezelfde CO₂-beprijzing. We veronderstellen daarom dat de kostenstijging gerelateerd aan CO₂-beprijzing geen effect heeft op de afzet binnen de EU.

De huidige regelgeving omtrent luchtvervuilende stoffen geldt op dezelfde manier voor andere Europese landen.¹⁶ Voor luchtvervuilende stoffen gelden in Nederland de eerder genoemde NEC-plafonds, vastgelegd in een Europese richtlijn. Ook deze gelden op dit moment dus voor alle Europese landen. We nemen in onze analyses aan dat het huidige milieubeleid op het gebied van luchtvervuiling in de belangrijkste handelspartners van Nederland ongewijzigd blijft. Verschillen zullen dan ontstaan enkel doordat Nederland luchtvervuilende emissies gaat beprizen.

Ten slotte dalen de emissies mee met de productiedaling. Door productiedaling die mogelijk optreedt in de bestudeerde sectoren, zullen ook de emissies in de betreffende sector afnemen. Deze emissiereductie is eenzelfde percentage als de productiedaling. Hier zijn geen extra kosten aan verbonden.

3 Resultaten

Om de effecten van een Pigou-belasting op luchtvervuiling in beeld te brengen levert de rekentool voor elk van de drie geanalyseerde sectoren een serie basisresultaten en gevoeligheidsanalyses. Eerst beschrijft paragraaf 3.1 de soorten analyses die uitgevoerd zijn en hun belangrijkste invoer. Paragrafen 3.2 en 3.3 beschrijven de resultaten zelf. Deze resultaten onderbouwen de Policy Brief “Een belasting op luchtvervuiling in de Nederlandse industrie” (Mot e.a., 2019).

3.1 Twee soorten resultaten: centraal scenario en gevoeligheidsanalyses

In onze resultaten schenken we aandacht aan de effecten van beprijzing en de onzekerheden die deze berekening met zich meebrengt. Voor de berekening van de effecten gebruiken we een *centraal scenario*, waarin alle invoerparameters van de analyse hun meest waarschijnlijke of centrale waarde aannemen.¹⁷ Om de

¹⁶ Mot en Van der Wal (2019) gaat verder op deze regelgeving in.

¹⁷ Voor milieuprijzen, Armington-elasticiteiten en ETS-projecties gebruiken we centrale waarden zoals die bronnen voor deze cijfers die rapporteren. Voor alle resultaten in dit Achtergronddocument en in Mot e.a. (2019) vormt dit centrale scenario het ijkpunt.

onzekerheden in beeld te brengen, gebruiken we meerdere gevoeligheidsanalyses, waarin we de invoer van de rekentool variëren ten opzichte van het centrale scenario.

We voeren twee soorten gevoeligheidsanalyses uit: meervoudig en enkelvoudig. In de meervoudige gevoeligheidsanalyse variëren we meerdere parameters tegelijk ten opzichte van het centrale scenario om zo een indruk te geven van de boven- en ondergrens van de uitkomsten.¹⁸ In de enkelvoudige analyse variëren we telkens één parameter om de invloed van die parameter in beeld te krijgen. De gevoeligheidsanalyses zijn gelijk voor alle drie de geanalyseerde sectoren.

De eerste (meervoudige) gevoeligheidsanalyse beschouwt een scenario waarin bedrijven in Nederland relatief gemakkelijk de concurrentie met het buitenland aankunnen ('makkelijk') en een scenario waarin dat relatief moeilijk is ('moeilijk'). In het scenario 'makkelijk' krijgen alle parameters waarden waarbij de productie in Nederland zoveel mogelijk hetzelfde niveau behoudt. Zo vallen schaduw prijzen en Armington-elasticiteiten bijvoorbeeld lager uit ten opzichte van het centrale scenario en zijn technologieën goedkoper in te zetten. Voor het moeilijke scenario geldt het omgekeerde. Tabel 3.1 geeft de waarden van parameters in beide gevoeligheidsanalyses en in het centrale scenario. De prijs voor CO₂ is voor de drie meervoudige scenario's gelijk gehouden omdat deze onder het basispad valt. Deze prijs wordt later apart gevarieerd.

Tabel 3.1 Overzicht invoerparameters voor het centrale scenario en de twee meervoudige gevoeligheidsanalyses binnen de rekentool

	Makkelijk	Centraal	Moeilijk	Bron
Hoogte milieuprijs				
NO _x	€ 24,10	€ 34,70	€ 53,70	(De Bruyn e.a., 2017)
SO ₂	€ 11,20	€ 19,40	€ 32,30	(De Bruyn e.a., 2017)
PM _{2,5}	€ 56,80	€ 79,50	€ 122,00	(De Bruyn e.a., 2017)
Armington-elasticiteit				
Export NL - EU	3,5	4,9 (staal), 5,6 (kunstmest, ethyleen)	7,5	(Bollen en Rojas-Romagosa, 2018)
Export NL - ROW	3,5	4,9 (staal), 5,6 (kunstmest, ethyleen)	7,5	(Bollen en Rojas-Romagosa, 2018)
Import NL	3,5	4,9 (staal), 5,6 (kunstmest, ethyleen)	7,5	(Bollen en Rojas-Romagosa, 2018)
ETS-prijs CO₂				
2030	€ 46	€ 46	€ 46	(Brink, 2018)
2050	€ 200	€ 200	€ 200	Aanname, o.b.v. (Aalbers e.a., 2016)
Kosten inzet technologie t.o.v. centraal scenario				
2030	-50%	0%	+50%	Aanname
2050	-50%	0%	+50%	Aanname
Autonome efficiëntieverbetering (per jaar)	1%	0,5%	0%	Aanname

¹⁸ De theoretische bovengrens van de effecten wordt bereikt als de sectoren geen enkele (end-of-pipe-)technologie inzet om luchtverontreiniging te vermijden, en ervoor kiest om de Pigou-belasting in zijn geheel te betalen. Omdat veel technologieën al beschikbaar en betaalbaar zijn, achten wij dit scenario onwaarschijnlijk.

In de tweede (enkelvoudige) gevoeligheidsanalyse bekijken we hoe variatie van individuele invoerparameters de uitkomsten van de rekentool beïnvloedt. Dit doen we apart voor de milieuprijs, de kosten van inzet van technologieën, de Armington-elasticiteit en de autonome efficiëntieverbetering (per jaar). Voor de enkelvoudige gevoeligheidsanalyses gebruiken we verder dezelfde variaties als aangegeven in Tabel 3.1, waarbij we de variant met de lage en hoge waarde in het vervolg aanduiden als ‘Laag’ en ‘Hoog’. De gevoeligheidsanalyses kunnen met de rekentool zowel op het ETS-basispad als op de berekening met Pigou-belasting toegepast worden.

Ten slotte doen we ook een gevoeligheidsanalyse op het basispad: wat zou er gebeuren als de CO₂-prijs meer of minder stijgt dan in het centrale scenario? Tabel 3.2 toont de variatie voor de gevoeligheidsanalyse van de CO₂-prijzen. Het centrale scenario gaat voor 2030 uit van de middenwaarde van de ETS-prijsprojectie en voor 2050 van de ondergrens van het tweegradenscenario in de WLO (bronnen in tabel 3.2). In de gevoeligheidsanalyse met lage CO₂-prijzen kiezen we de lage waarde van de ETS-projectie en de CO₂-prijs uit WLO-laag. Met deze CO₂-prijs worden de doelen gesteld in het Parijs-akkoord niet gehaald. De hoge waarde van de ETS-projectie en de prijs in het midden van de bandbreedte van het tweegradenscenario in de WLO¹⁹ gebruiken we als hoge CO₂-prijzen. De CO₂-prijzen voor 2050 gelden in alle gevallen ook voor de EU en de rest van de wereld.

Tabel 3.2 Variatie van de CO₂-prijs in gevoeligheidsanalyse basispad

	Laag	Centraal	Hoog	Bron
2030	€ 12	€ 46	€ 80	Brink (2018)
2050	€ 40	€ 200	€ 600	Aanname o.b.v. Aalbers e.a. (2016)

In de laatste enkelvoudige gevoeligheidsanalyse kijken we wat de invloed is van stijgende reductiekosten bij dalende emissies. Dit doen we door als extra randvoorwaarde te stellen dat de emissies van NO_x, SO₂ en PM_{2,5} in de berekening niet lager kunnen worden dan 10% van hun oorspronkelijke waarden in het basisjaar 2015. Over deze 10% overblijvende emissies betalen bedrijven dan de Pigou-belasting, omdat in dit scenario de kosten om deze laatste 10% weg te nemen hoger zijn dan de belasting zelf. Zij investeren dan dus niet in de daarvoor benodigde vermijdingstechnologie.²⁰

3.2 Resultaten centraal scenario en meervoudige gevoeligheidsanalyses

Als eindresultaat geeft de rekentool voor ieder scenario het verwachte effect van een Pigou-belasting per sector. Dit gebeurt op drie vlakken: de luchtvervuilende uitstoot (sterke daling in het centrale scenario), de marginale productiekosten (beperkte stijging), en ten slotte het effect op vraag uit binnen- en buitenland (productiedaling). Tabel 3.3 vat de kostenstijging en productiedaling samen voor scenario’s ‘Centraal’, ‘Makkelijk’ en ‘Moeilijk’.

¹⁹ De bandbreedte in het WLO tweegradenscenario is 200-1000 euro per ton CO₂.

²⁰ DHV (2010) laat met kostencurves zien dat dit voor SO₂, NO_x en fijnstof het geval is.

Tabel 3.3 Stijging marginale kosten en daling Nederlandse productie als gevolg van de Pigou-belasting, in procenten ten opzichte van het basispad

	Centraal		Makkelijk		Moeilijk	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Staal						
Stijging marginale kosten	1,4%	1,1%	0,7%	0,4%	2,4%	2,2%
Daling productie in Nederland	5,1%	3,9%	1,5%	0,9%	13,2%	12,2%
Ethyleen						
Stijging marginale kosten	0,9%	0,0%	0,4%	0,0%	1,5%	0,1%
Daling productie in Nederland	3,7%	0,2%	0,9%	0,0%	8,4%	0,5%
Kunstmest						
Stijging marginale kosten	1,9%	1,1%	0,9%	0,4%	3,1%	2,0%
Daling productie in Nederland	7,6%	4,4%	2,0%	0,9%	16,1%	10,9%

Bij invoering van een Pigou-belasting tussen 2015 en 2030 vallen de emissies van de luchtvervuilende stoffen vrijwel weg. Dit komt doordat producenten technologieën inzetten om hun emissies te verminderen. De technologieën voor reductie van luchtvervuiling zijn over het algemeen op korte termijn beschikbaar en marginale kosten zijn gelijk aan of lager dan de milieuprijs waarop de Pigou-belasting gebaseerd is.²¹ Na invoering van een Pigou-belasting is het voor bedrijven dus kostenefficiënt om bestaande technologieën zoals filters te gaan gebruiken.

De Pigou-belasting leidt in alle sectoren tot een stijging van de productiekosten per eenheid van enkele procenten. In de staalsector nemen de kosten ten opzichte van het basispad met ruim 1% toe in 2030. In de kunstmestsector is de kostenstijging in 2030 groter met ongeveer 2%. Dit komt onder meer door de relatief hoge uitstoot van PM_{2,5} in deze sector en de daarmee samenhangende reductiekosten. De kostenstijging bij ethyleen is minder dan 1% in 2030, omdat de luchtvervuilende emissies in verhouding tot de productie kleiner zijn. In 2050 is de stijging van de marginale kosten ten opzichte van het basispad in alle sectoren kleiner, omdat er via co-benefits veel emissies ‘gratis’ kunnen worden gereduceerd.

Ten slotte kan door de Pigou-belasting de wereldwijde vraag naar Nederlandse producten van de drie sectoren afnemen. Op de lange termijn bedraagt berekende de productiedaling ten opzichte van het basispad tienden van procenten voor ethyleen en rond de 4% voor kunstmest en ijzer & staal in het centrale scenario. De bandbreedte van de productieafnamen is groter dan bij de kostenstijging, zo varieert de berekende daling bij kunstmest tussen 2,0% (2030, makkelijk) en 16,1% (2030, moeilijk). De kunstmestsector kent ook de hoogste marginale kostenstijging en is zeer exportintensief.

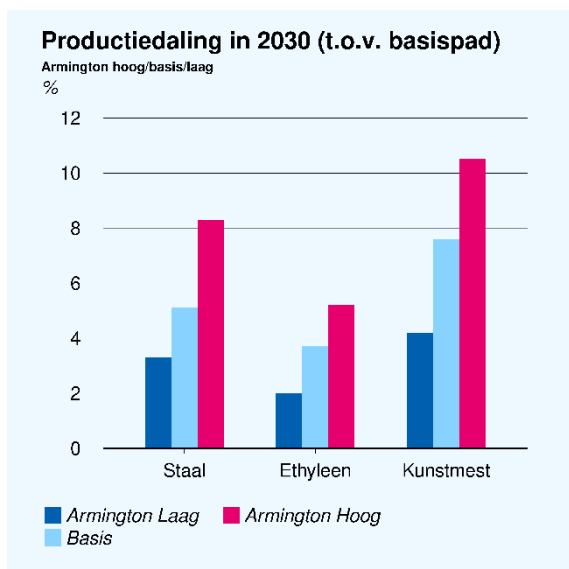
3.3 Resultaten enkelvoudige gevoeligheidsanalyses

Bij alle enkelvoudige gevoeligheidsanalyses blijft de conclusie dat de luchtvervuiling sterk daalt door beprijzing overeind. Wel variëren de kostenstijging en de productiedaling afhankelijk van het enkelvoudige gevoeligheidsscenario. Per scenario presenteren we in deze paragraaf voor deze twee parameters de verschillen tussen de scenario's ‘Hoog’, ‘Laag’ en ‘Centraal’ voor het jaar 2030, omdat daar de verschillen het grootst zijn.

²¹ Zie bijlage E.

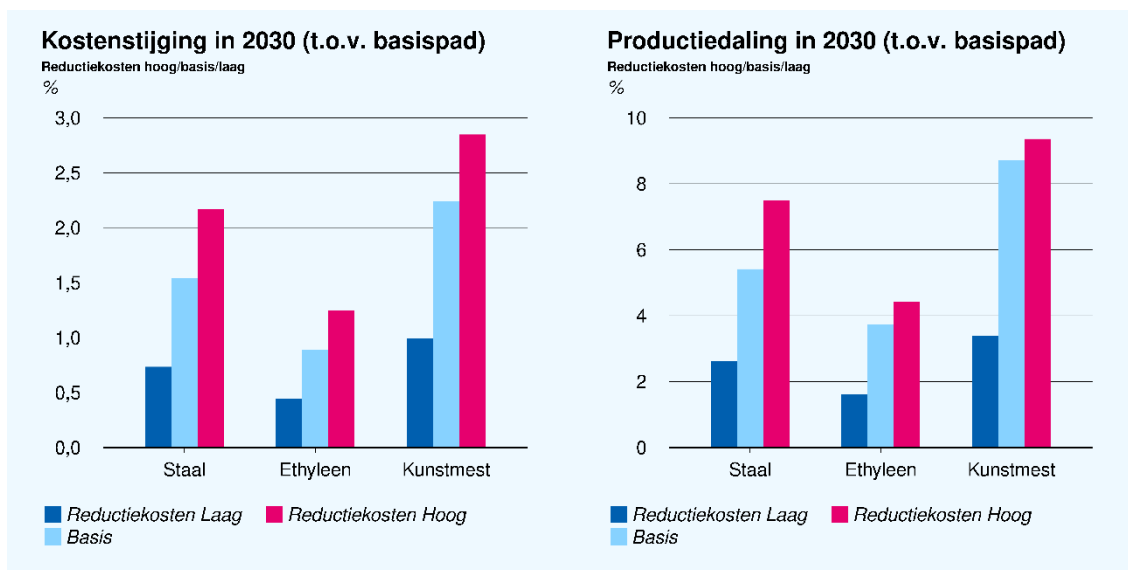
De waarde van Armington-elasticiteit heeft voor alle drie de sectoren een grote invloed op de productiedaling. Een lagere (hogere) Armington-elasticiteit leidt tot een lagere (hogere) productiedaling, omdat de vraag minder (sterker) reageert op het prijsverschil met andere landen. De kostenstijging wordt in de berekening hierdoor niet beïnvloed. De grootste stijging vindt plaats bij ijzer & staal en kunstmest: de productiedaling bij 'Armington hoog' is in deze sectoren 3,4%-punt hoger dan in het centrale scenario (zie figuur 3.1).

Figuur 3.1 Productie daalt sterker bij een hogere Armington-elasticiteit



De hoogte van de milieuprijzen kan een effect hebben op de uitkomsten, maar in de resultaten zien wij dit niet terug. Als de reductiekosten van een techniek in de buurt van de milieuprijs liggen, kan deze techniek net niet of net wel rendabel zijn. De kosten van de maatregelen voor reductie van luchtvervuiling liggen in scenario's 'Hoog' en 'Laag' echter nog ruimschoots lager dan de Pigou-belasting voor de drie geanalyseerde sectoren. Hierdoor levert variatie van de milieuprijs binnen deze bandbreedte geen andere uitkomsten op ten opzichte van het centrale scenario.

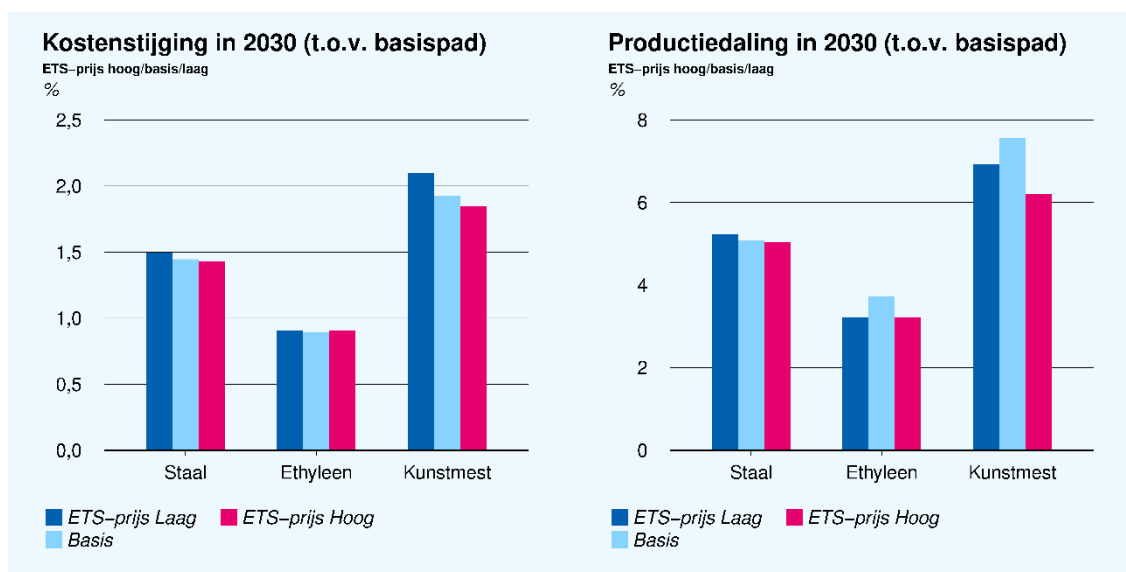
Figuur 3.2 Hogere reductiekosten versterken de kostenstijging in alle sectoren



Hogere reductiekosten zorgen ervoor dat technologie minder snel rendabel wordt. Als een techniek bovendien wel wordt toegepast, leidt deze tot hogere kosten in Nederland en vervolgens tot een hogere productiedaling (zie figuur 3.2). Het grootste kostenverschil ten opzichte van het centrale scenario vinden we voor 'reductiekosten hoog' bij kunstmest (+1,1%), voor de productiedaling bij ijzer & staal (+2,6%).

Een hogere CO₂-prijs heeft een gunstig effect op de productiedaling in 2030. Dit komt omdat co-benefits groter zijn bij een hogere CO₂-prijs. De unilaterale kostenstijging (die alleen door kosten gerelateerd aan de Pigou-belasting veroorzaakt wordt) en daarmee gepaard gaande productiedaling is daardoor lager, zie ook figuur 3.3. Bij een lagere CO₂-prijs kunnen bepaalde technologieën om CO₂ te reduceren, mogelijk met co-benefits, nog niet kosteneffectief zijn. Overigens gaan de emissies van CO₂ met een hoger percentage naar beneden bij een hogere CO₂-prijs, waar ze met een lagere CO₂-prijs op een hoger niveau blijven.

Figuur 3.3 Een hogere CO₂-prijs vermindert de productiedaling ten opzichte van het basispad

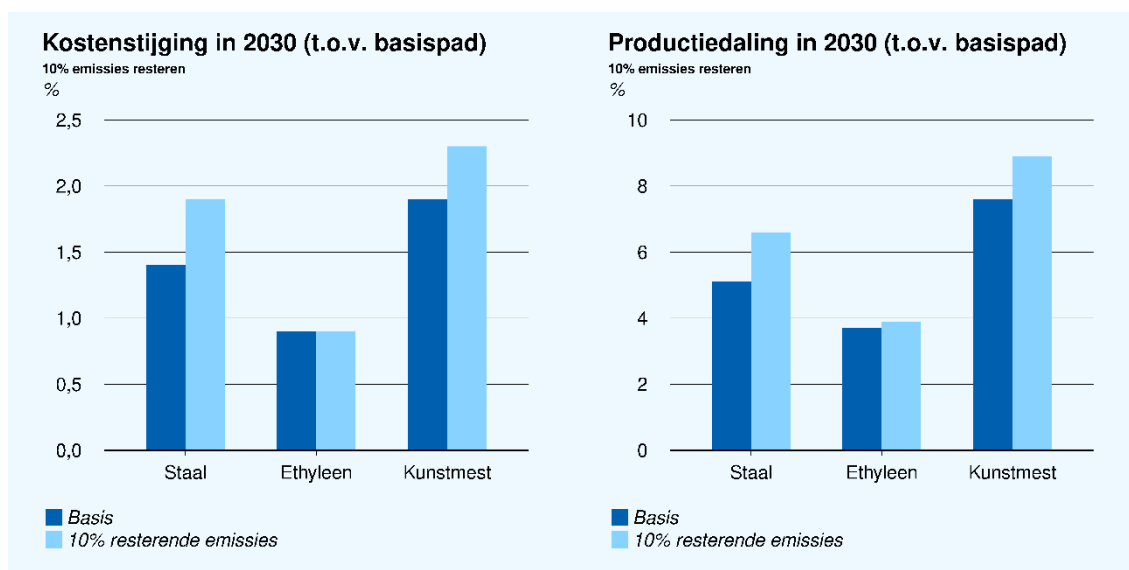


Ten slotte stijgen productiekosten met enkele tienden procentpunten als het voor bedrijven financieel niet aantrekkelijk is om de laatste 10% emissies weg te nemen. Dit is het geval als de reductiekosten sterk stijgen naarmate de emissieniveaus omlaag gaan. Deze analyse houdt zo rekening met reductiekosten die niet constant zijn, waar dat wel het geval is in de overige analyses. Het resultaat is een indicatie, omdat kosten van reductiemaatregelen van geval tot geval sterk uiteen kunnen lopen, zoals beschreven wordt in DHV (2010).²² Figuur 3.4 toont voor 2030 de verschillen tussen het centrale scenario en het scenario met 10% resterende emissies. Het grootste verschil treedt op bij sector ijzer & staal (kostenstijging +0,5%-punt, productiedaling +1,6%-punt).²³

²² De gebruikte constante marginale kosten in de overige analyses kunnen opgevat worden als een mediane waarde voor de kosten van een technologie, die tot stand komt als allerlei dure en goedkope reductiecasussen in een fabriek bij elkaar worden genomen. Merk daarbij op, dat de marginale kosten zelf ook gevarieerd worden binnen gevoeligheidsscenario's 'reductiekosten hoog/laag'.

²³ Bij ijzer & staal zijn de marginale reductiekosten gemiddeld 40 euro/kg voor PM_{2,5}, 4,6 euro/kg voor SO₂ en 6,9 euro/kg voor NO_x. De Pigou-belastingen voor deze stoffen zijn veel hoger met resp. 80, 20 en 35 euro/kg.

Figuur 3.4 Kostenstijging en productiedaling nemen toe als het voor bedrijven niet rendabel is om alle luchtverontreiniging weg te nemen



Literatuur

Aalbers, R., G. Romijn en G. Renes, 2016, WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO₂- uitstoot in MKBA's, CPB/PBL Achtergronddocument ([link](#)).

Batool, M. en W. Wetzels, 2019, Decarbonisation options for the Dutch fertiliser industry, MIDDEN: Manufacturing Industry Decarbonisation Data Exchange Network, PBL ([link](#)).

Bollen, J. en H. Rojas-Romagosa, 2018, Trade Wars: Economic impacts of US tariff increases and retaliations. An international perspective, CPB Achtergronddocument.

Brink, C., 2018, Projectie ETS-prijs volgens uitgangspunten concept wetvoorstel minimum CO₂-prijs elektriciteitsproductie, PBL ([link](#)).

Bruyn, S. de, 2018, Effecten van CO₂- beprijzing in de industrie, CE Delft.

Bruyn, S. de, S. Ahdour, M. Bijleveld, L. De Graaff, E. Schep, A. Schroten en R. Vergeer, 2017, Handboek Milieuprijzen, CE Delft.

Croezen, H. en M. Korteland, 2010, Technological developments in Europe - A long-term view of CO₂ efficient manufacturing in the European region, CE Delft ([link](#)).

DHV, 2009, Handreiking luchtmissiebeperkende technieken, MD-MV20081123.

DHV, 2010, Onderzoek Kosteneffectiviteit in de NeR, IKC 51189.

Ecofys, 2018, Chemistry for Climate: Acting on the need for speed, VNCI ([link](#)).

Ecorys, 2013, Evaluatie Meerjarenafspraak Energie Efficiëntie 2008-2020 (MJA3).

Europese Commissie, 2019, Regels voor toewijzing gratis rechten ETS 2021-2025 ([link](#)).

Hammingh, P., K.E.L. Smekens, A.J. Plomp en R. Koelemeijer, 2010, Co-impacts of climate policies on air polluting emissions in the Netherlands, Text 265 ([link](#)).

Koelemeijer, R., B. Daniëls, P. Koutstaal, G. Geilenkirchen, J. Ros, Pieter Boot, Gert Jan van den Born en Marian van Schijndel, 2018, Kosten energie- en klimaattransitie in 2030 – update 2018, PBL.

Mot, E., T. Hendrich en E. van der Wal, 2019, Een belasting op luchtvervuiling in de Nederlandse industrie, CPB Policy Brief ([link](#)).

Mot, E. en E. van der Wal, 2019, Instrumenten voor beprijzing luchtvervuiling in de Nederlandse industrie, CPB Achtergronddocument ([link](#)).

Næss-Schmidt, H. en M. Hansen, 2015, Carbon leakage in the nitrogen fertilizer industry, Copenhagen Economics ([link](#)).

NOS, 2018, Nieuwe fabriek Tata Steel onverwachts niet in IJmuiden, maar naar India ([link](#)).

Oliveira, C. en A. Van Dril, te verschijnen, Decarbonisation options for large volume organic chemicals production at Chemelot, MIDDEN: Manufacturing Industry Decarbonisation Data Exchange Network, PBL.

Pigou, A., 1952, *The Economics of Welfare* ([link](#)).

Rijksoverheid, 2019, Emissieregistratie ([link](#)).

RIVM, 2018, Grootschalige concentratie- en depositiekaarten Nederland, RIVM Briefrapport 2018-0104 ([link](#)).

Romijn, G., T. Hendrich, E. Mot, J. Tijm, K. Jansema-Hoekstra en A. Verrips, 2018, Circulaire economie: economie en ecologie in balans, CPB Policy Brief.

Ros, J. en W. Wetzels, 2019, Achtergronddocument Effecten Ontwerp Klimaatakkoord: Industrie. Methodiek doorrekening industrie, 3730, PBL ([link](#)).

Smeets, W., P. Hammingh en J. Aben, 2015, De kosten en baten van het Commissievoorstel ter vermindering van de nationale emissies van bepaalde luchtverontreinigende stoffen, PBL ([link](#)).

Tata Steel, 2016, Tata Steel IJmuiden BV Reports & Accounts 2016 ([link](#)).

Verrips, A., E. van der Wal, J. Tijm en E. Mot, 2019, Meer milieuwinst met recycling #hoedan?, CPB Policy Brief.

Vollebergh, H., J. Dijk, E. Drissen, H. Eerens en H. Vrijburg, 2017, Fiscale vergroening: belastingverschuiving van arbeid naar grondstoffen, materialen en afval, PBL ([link](#)).

Wang, C., C. Ryman en J. Dahl, 2009, Potential CO₂ emission reduction for BF–BOF steelmaking based on optimised use of ferrous burden materials, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 3(1): 29–38 ([link](#)).

Watson, C., J. Newman, R.H.S. Upton en P. Hackmann, 2005, Can transnational sectoral agreements help reduce greenhouse gas emissions, *Round Table on Sustainable Development*, Parijs, OESO.

Wesseler, J.H.H., A. Bonanno, D. Drabik, V.C. Materia, L. Malaguti, M. Meijer en T.J. Venus, 2015, *Overview of the Agricultural Inputs Sector in the EU*, Europese Unie.

World Economic Forum, 2019, The Global Competitiveness Report ([link](#)).

Bijlage A: milieuschade door luchtverontreiniging

Emissies naar lucht zijn in Nederland de grootste bron van milieuschade (Vollebergh e.a., 2017).

Geregistreerde emissies zijn uitgesplitst naar lucht, bodem en water. Voor zover nu bekend wordt de milieuschade in Nederland grotendeels veroorzaakt door emissies naar de lucht. Hierbij gaat het vooral om de luchtverontreinigende stoffen en broeikasgassen. Over schade aan de leefomgeving en de natuur bij de winning of verwerking van grondstoffen buiten Nederland is niet veel bekend.

Gezondheidsschade is de belangrijkste component van de schade door luchtverontreinigende stoffen.

Fijnstof veroorzaakt een verkorting van de gemiddelde levensverwachting van Nederlanders van ongeveer 9 maanden (RIVM, 2013). Stikstofdioxide veroorzaakt bij de huidige luchtverontreinigingsniveaus een verkorting van de gemiddelde levensverwachting van ongeveer 4 maanden (link). Bij de huidige lage concentratie lijkt zwaveldioxide geen direct effect op de gezondheid te hebben, maar wel een belangrijk indirect effect via de vorming van secundair fijnstof (De Bruyn e.a., 2017).²⁴

De totale schade door NO_x, SO₂ en fijnstof (PM_{2,5}) in de industrie is ongeveer 1,4 miljard euro (zie tabel A.1). Tabellen A.1-A.4 laten de schade van deze stoffen voor de drie sectoren en voor de hele industrie zien tegen verschillende waarden van de milieuprijs. De schade door NO_x is in alleen in de kunstmestindustrie niet de grootste vervuilingbron. In Mot et al., (2019) wordt een bedrag van 1,5 miljard euro genoemd, dit omvat ook andere luchtvervuilende stoffen, zoals PM₁₀.

Tabel A.1 Totale schade in de Nederlandse industrie tegen verschillende schaduw prijzen (laag, midden, hoog)

Stof	Uitstoot in 2015 (mln kg)	Schade – laag (mln euro)	Schade – midden (mln euro)	Schade – hoog (mln euro)
NO _x	24,1	€ 582	€ 838	€ 1297
SO ₂	9,25	€ 104	€ 230	€ 299
PM _{2,5}	3,6	€ 204	€ 286	€ 439
Totaal		€ 890	€ 1354	€ 2035

Bron: Emissieregistratie (Rijksoverheid, 2019) en (De Bruyn e.a., 2017).

²⁴ Secundair fijnstof ontstaat in de lucht omdat verzurende stoffen zoals SO₂ binden tot zouten of zich aan primaire deeltjes hechten.

Tabel A.2 Totale schade IJzer & staal tegen verschillende milieuprijzen (laag, midden, hoog)

Stof	Uitstoot in 2015 (mln kg)	Schade – laag (mln euro)	Schade – midden (mln euro)	Schade – hoog (mln euro)
NO _x	5,69	€ 137	€ 198	€ 306
SO ₂	2,76	€ 31	€ 54	€ 89
PM _{2,5}	0,46	€ 27	€ 37	€ 57
Totaal		€ 195	€ 288	€ 452

Bron: berekeningen op basis van Emissieregistratie (Rijksoverheid, 2019) en (De Bruyn e.a., 2017).

Tabel A.3 Totale schade Ethyleen tegen verschillende milieuprijzen (laag, midden, hoog)

Stof	Uitstoot in 2015 (mln kg) ²⁵	Schade – laag (mln euro)	Schade – midden (mln euro)	Schade – hoog (mln euro)
NO _x	4,60	€ 111	€ 160	€ 247
SO ₂	3,16	€ 4	€ 6	€ 10
PM _{2,5}	0,12	€ 7	€ 10	€ 15
Totaal		€ 121	€ 176	€ 272

Bron: berekeningen op basis van Emissieregistratie (Rijksoverheid, 2019), Oliveira en Van Dril (te verschijnen) en De Bruyn e.a. (2017).

Tabel A.4 Totale schade sector Kunstmest tegen verschillende milieuprijzen (laag, midden, hoog)

Stof	Uitstoot in 2015 (mln kg)	Schade – laag (mln euro)	Schade – midden (mln euro)	Schade – hoog (mln euro)
NO _x	1,34	€ 32	€ 47	€ 72
SO ₂	0,22	€ 0,3	€ 0,4	€ 0,7
PM _{2,5}	0,60	€ 34	€ 48	€ 73
Totaal		€ 67	€ 95	€ 146

Bron: berekeningen op basis van Emissieregistratie (Rijksoverheid, 2019), Batool en Wetzels (2019) en De Bruyn e.a. (2017).

Aandeel industrie in Nederlandse luchtverontreiniging

De industrie, energiesector en raffinaderijen zijn verantwoordelijk voor het overgrote deel van de SO₂-uitstoot (95%), en tussen de 21 en 28% van de uitstoot van NO_x en SO₂. De industrie is dus niet de enige uitstoter, maar wel een belangrijke. Tabel A.5 laat het aandeel van verschillende sectoren zien in de uitstoot van de luchtvervuilende stoffen die wij bekijken. Het verkeer is ook een grote uitstoter van NO_x en fijnstof. De landbouw heeft een grote bijdrage in de uitstoot van NO_x (16%).

²⁵ Voor sommige bedrijven zijn de emissies van enkele stoffen niet geregistreerd dus is een inschatting gemaakt aan de hand van de grootte van de productielocaties in verhouding tot andere bedrijven. Dit geldt ook voor de sector kunstmest.

Tabel A.5 Aandelen per sector in de uitstoot van drie luchtvervuilende stoffen in Nederland (2015)

Sector	NO _x -uitstoot	SO ₂ -uitstoot	PM _{2,5} -uitstoot
Industrie, Energie en raffinaderijen	21%	95%	28%
Verkeer	56%	3%	35%
Consumenten	4%	1%	28%
HDO en Bouw	3%	0%	4%
Landbouw	16%	0%	5%

Bron: Emissieregistratie (Rijksoverheid, 2019).

De concentratie²⁶ van luchtvervuilende stoffen in Nederland is opgebouwd uit bijdragen van verschillende sectoren in Nederland, van het buitenland als geheel en van de internationale scheepvaart (RIVM, 2018). De industrie droeg in 2017 3% bij aan de gemiddelde Nederlandse concentratie van PM_{2,5} en NO_x en 16% aan de concentratie van SO₂. Verder komt een groot deel van de concentratie van luchtvervuilende stoffen uit het buitenland.

Bijlage B: sector IJzer & staal

In Nederland is Tata Steel IJmuiden (TSIJ) de enige producent van primair staal uit ijzererts, met een productie van 7 miljoen ton staal per jaar.²⁷ De winst bedroeg in 2015 315 miljoen euro (Tata Steel, 2016). De fabriek van TSIJ in IJmuiden is een geïntegreerde installatie, die het hele productieproces verzorgt van ijzererts tot rollen staal. Hiermee concurreert TSIJ op de wereldmarkt niet met staalproducenten die secundair staalschroot gebruiken als grondstof (De Bruyn, 2018). Deze leggen zich meer toe op laagwaardig staal voor bijvoorbeeld constructies en betonwapening.

Tata Steel is gespecialiseerd in hoogwaardige staalsoorten voor gebruik in onder andere auto's, en in dun staal geschikt voor bijvoorbeeld batterijen. Op wereldniveau concurreert Tata Steel met onder anderen Posco uit Korea en met Chinese staalfabrikanten. TSIJ verzorgde in 2018 0,4% van de wereldwijde staalproductie (World Steel Association, 2019). In Europa zijn ArcelorMittal in Gent en Voestalpine in Oostenrijk belangrijke concurrenten.

Productieproces en milieuschade

Staalproductie gebeurt in een geïntegreerde fabriek in ruwweg twee stappen: verwerking van ijzererts tot ruwijzer in een hoogoven, en vervolgens de productie van staal in een oxystaaloven (Basic Oxygen Furnace, BOF). De CO₂-uitstoot bij staalproductie komt voornamelijk van de hoogovens (Wang e.a., 2009). Fijnstof komt onder andere vrij bij transportbewegingen in de buitenlucht van bijvoorbeeld steenkool.

Gebruik van gerecycled (secundair) staalschroot in plaats van ijzererts als grondstof niet mogelijk voor de productie van hoogwaardig staal. Bij gebruik van staalschroot wordt er geen BOF gebruik zoals bij TSIJ, maar een elektrische vlamboogoven (Electric Arc Furnace, EAF). De staalproductie met een BOF heeft een vier tot vijf maal hogere emissie-intensiteit van CO₂ vergeleken met een EAF (Watson e.a., 2005). Gerecycled staalschroot

²⁶ Concentratie is hier de hoeveelheid opgenomen stof per eenheid van volume, gemeten in bijvoorbeeld microgram per m³.

²⁷ We kijken naar SBI sector 241 ('vervaardiging van ijzer en staal in primaire vorm').

bestaat uit verschillende staalsoorten en is in de regel vervuild met allerlei stoffen, waaronder koper en zink. De tolerantie voor verontreiniging is bij het staal dat TSIJ maakt laag. De fabriek in IJmuiden kan wel staalschroot gebruiken uit de eigen productie, omdat hiervan de eigenschappen bekend zijn. Dit schroot wordt bijvoorbeeld bijgemengd om te koelen.

Sectorspecifieke technologieën

Voor de staalindustrie hebben we drie sectorspecifieke technologieën geïdentificeerd: HIsarna, Carbon Capture & Storage en Carbon Capture & Utilization. Iedere technologie kan een grote rol spelen in de vermindering van met name CO₂-uitstoot. Daarnaast levert HIsarna ook co-benefits: vermindering van luchtvervuiling naast CO₂-reductie.

HIsarna

HIsarna is een technologie om staal te produceren zonder gebruik van cokes, die wel nodig zijn voor primaire staalproductie met gangbare hoogovens. Net als bij de conventionele hoogovens produceert een HIsarna-fabriek ruwijzer (pig iron). In een HIsarna-fabriek wordt de verwerking van ijzererts tot ruwijzer echter gecombineerd in één stap (Croezen en Korteland, 2010). HIsarna kan daardoor werken zonder voorbereidende stappen in pellet- en sinterfabrieken, processen waarbij veel CO₂-uistoot vrijkomt. Bovendien komt CO₂ bij het HIsarna-proces vrij in pure vorm, waardoor deze direct kan worden opgeslagen (door middel van CCS).

De verwachting is dat HIsarna een 20% hogere energie-efficiëntie heeft ten opzichte van een conventionele hoogovens, met daardoor navenant lagere CO₂-uistoot (Croezen en Korteland, 2010). Door de vrijkomende CO₂ op te slaan met CCS is de CO₂-uitstoot met in totaal 80% te verlagen. Sinds 2011 is er een HIsarna-pilotfabriek operationeel in IJmuiden. In een volgende ontwikkelingsfase zal een grotere pilotfabriek gebouwd worden in India door Tata Steel, het moederbedrijf van TSIJ (NOS, 2018). De verwachting is dat grootschalige staalproductie met HIsarna kan plaatsvinden rond 2030.

Het gebruik van HIsarna-technologie levert gemeten over het hele productieproces een CO₂-reductie op van 16%. Na het HIsarna-proces vindt er immers ook uitstoot plaats bij de daarop volgende processtappen.²⁸ Binnen een geïntegreerde staalfabriek vervangt een HIsarna-fabriek vier conventionele installaties: een hoogoven, en de bijbehorende kookfabriek, pelletfabriek en sinterfabriek. Deze vier componenten vertegenwoordigen samen 80% van de totale CO₂-emissies van een generieke staalfabriek (Wang e.a., 2009), waardoor de CO₂-reductie van 20% op installatieniveau uitkomt op 16% voor de totale staalfabriek.

De hogere energie-efficiëntie van HIsarna zorgt niet alleen voor een CO₂-reductie, maar ook voor een reductie van de uitstoot van SO₂ en NO_x. We nemen aan dat deze reducties ook 16% bedragen, net als de CO₂-reductie. Omdat HIsarna nog steeds gebruikmaakt van steenkool als input, nemen wij aan dat de uitstoot van fijnstof ongewijzigd blijft.²⁹ Een groot deel van deze uitstoot is immers te wijten aan stof dat vrijkomt bij logistiek en transport in de buitenlucht.

Het HIsarna-proces is per saldo goedkoper dan het werken met conventionele hoogovens. Door verbeterde efficiëntie dalen ook bijvoorbeeld ook de energiekosten. Ook zal een HIsarna-fabriek gebruik kunnen maken van een hoger percentage staalschroot, waarvan de kwaliteit meer mag variëren zonder de

²⁸ Waaronder het verwerken van ijzer tot staal in een Basic Oxygen Furnace, en bijvoorbeeld het rollen van staal tot plakken.

²⁹ Mogelijk dalen de emissies van fijnstof, omdat een fabriek op basis van HIsarna-technologie uit minder individuele installaties zal bestaan dan de huidige conventionele hoogovens. Hierdoor kan onder meer de hoeveelheid te reinigen lucht (het debiet, in m³/s) afnemen. In welke mate dit een reductie van fijnstofuitstoot oplevert, is met de huidige gegevens niet te zeggen.

kwaliteit van het eindproduct naar beneden te halen. Croezen en Korteland (2010) stellen dat de investeringskosten 35% lager kunnen zijn dan voor een nieuwe, conventionele hoogoven, bij inpassing in bestaande infrastructuur.³⁰ Voor de operationele kosten, inclusief afschrijving, gaat het om 10%. Binnen dit onderzoek bekijken we HIsarna vanuit het oogpunt van emissiereductie. De marginale kosten van een kilogram CO₂-reductie stellen we daarom voor HIsarna op nul³¹: door efficiëntieverbetering kost de vermindering van CO₂-uitstoot dan geen geld, maar brengt deze ook geen geld op.

Carbon Capture & Storage (CCS)

Carbon Capture & Storage (CCS) is een belangrijke technologie voor CO₂-reductie in de Nederlandse staalindustrie. Bij CCS wordt CO₂ die voortkomt uit het productieproces afgevangen en permanent opgeslagen, zodat deze niet vrijkomt in de atmosfeer. De staalindustrie heeft naast CCS en HIsarna weinig andere mogelijkheden om grootschalige CO₂-reductie te bereiken (De Bruyn, 2018). Omdat CCS nog weinig wordt toegepast, is deze technologie relatief duur, met 50 euro per ton CO₂.³²

Voor TSIJ zijn er twee mogelijke manieren om CCS in te zetten: zelfstandig en als toevoeging op het HIsarna-proces. Als CCS zelfstandig wordt ingezet, geeft dat voor de staalindustrie in Nederland een potentiële CO₂-reductie van 0,5 Mton (Koelemeijer e.a., 2018). Deze bron voorziet operationele toepassing van CCS niet voor 2030. Bij toepassing van HIsarna stijgt de CO₂-reductie door inzet van CCS van 16% naar 64% voor TSIJ als geheel. Het HIsarna-proces levert een uitgaande stroom op van zuiver CO₂. Deze stroom is daardoor geschikt om direct af te vangen, waar dit met de emissies van huidige conventionele hoogovens niet het geval is (Croezen en Korteland, 2010). In de rekentool is deze additionele CCS naast HIsarna als aparte technologie opgevoerd. We gaan daarbij uit van marginale kosten van 50 euro per ton CO₂-reductie, gelijk aan de reguliere CCS.

Carbon Capture & Utilization (CCU)

Een variant op CCS is Carbon Capture & Utilization (CCU), waarbij afgevangen CO₂ niet wordt opgeslagen, maar hergebruikt wordt in een ander industrieel proces, mogelijk buiten de eigen sector. Bij TSIJ bestaat de mogelijkheid om CO₂ af te vangen uit restgassen, en deze te gebruiken als grondstof voor de productie van nafta in de chemische industrie (Ros en Wetzels, 2019). Het maximale potentieel wordt wederom geraamd op 0,5 Mton. Omdat de CO₂ van TSIJ in dit geval ergens anders wordt gebruikt, stellen we de marginale reductiekosten hier op nul.³³ Ook hier gaan we uit van een introductie van de oplossing in 2030. We gaan er in onze berekening van uit dat de chemische industrie medewerking zal verlenen als TSIJ deze oplossing wil toepassen, bijvoorbeeld omdat de CO₂ uit CCU wordt aangeboden voor een aantrekkelijke prijs.

Bijlage C: sector Ethyleen

Ethyleen is een van de belangrijkste bouwstenen voor kunststof. Het productieproces van plastic bestaat uit verschillende stappen. In de eerste fase wordt nafta, een product gemaakt van aardolie, omgezet in zogenaamde monomeren, waar ethyleen de belangrijkste van is. Andere voorbeelden van monomeren zijn styreen en propyleen. Zij komen terecht in een fabriek waar polymerisatie plaatsvindt en polymeren ontstaan, die de basis vormen voor allerlei verschillende kunststoftoepassingen.

³⁰ Zie (Croezen en Korteland, 2010), tabel 3, 'brown field' infrastructuur. Dit is exclusief een eventuele CCS-installatie.

³¹ Merk op dat hetzelfde geldt voor de reductie van NO_x en SO₂. Vermindering van uitstoot van deze stoffen vormen de co-benefits van HIsarna.

³² Zie (Koelemeijer e.a., 2018), tabel 13, CCS industriële emissies ijzer- en staalindustrie.

³³ We volgen hierbij de methodiek voor CCU gebruikt bij de doorrekening van het Klimaatakkoord (Ros en Wetzels, 2019).

De productie van ethyleen vindt plaats in zogeheten stoomkrakers. Ethyleen wordt gemaakt door middel van het kraken van de voedingsstof nafta in een stoomkraker. Onder hoge temperaturen vindt een chemische reactie plaats, waarmee het product ethyleen ontstaat. Een andere veel gebruikte voedingsstof voor ethyleen is ethaan, een gas dat vrijkomt bij de winning van ruwe olie. In Nederland komt dit echter niet voor. Het produceren van ethyleen (en bijbehorende producten) valt onder de SBI-code 20.14.1: de vervaardiging van petrochemische producten.

In Nederland zijn stoomkrakers op 3 locaties. Deze staan bij DOW in Terneuzen (3 krakers), SABIC in Geleen (2 krakers) en Shell Moerdijk (1 kraker). Tabel C.1 laat de productiecapaciteit van deze drie locaties zien. De krakers gebruiken grondstoffen vanuit olieraffinaderijen. Shell Moerdijk is sterk geïntegreerd met raffinaderij van Shell Pernis. Op sommige locaties volgt direct de volgende fase, het maken van polymeren. Bij Shell Moerdijk gebeurt alleen het kraken, van deze monomeren maken bijvoorbeeld Lyondell Basel en ShinEtsu vervolgens polymeren. Er bestaat een pijpleidingennetwerk waar deze producenten en die in Antwerpen en het Ruhrgebied op aangesloten zijn. Zo kan iedere vestiging op ieder moment over voldoende voeding beschikken.

Tabel C.1 Productiecapaciteit ethyleen van Nederlandse stoomkrakers

Locatie	Productiecapaciteit (kton/jaar)
Shell Moerdijk	900
DOW Terneuzen	1810
SABIC Geleen	1250

Bron: Shell ([link](#)), DOW ([link](#)), Sabic ([link](#)).

Nederlandse producenten zijn belangrijke spelers in de Europese markt. Andere belangrijke kraakinstallaties staan in de haven van Antwerpen en in het Ruhrgebied. In de VS en het Midden-Oosten wordt geproduceerd op basis van ethaan. Zeker in Saudi-Arabië zijn de kosten hiervan laag, omdat het gas vrijkomt bij de oliewinning. Transportkosten schermen de Europese producenten niet af voor concurrentie uit deze delen van de wereld. Ethyleen is moeilijk transporteerbaar vanwege strenge temperatuureisen, maar de grote hoeveelheden polymeren uit bijvoorbeeld Saudi-Arabië drukken de prijzen in Europa.

Ethyleen is een homogeen product. De producten die stoomkrakers produceren zijn homogeen. Het pijpleidingennetwerk waar alle krakers op aangesloten zijn en waar iedereen dus dezelfde prijs ontvangt voor ethyleen, illustreert dit al. Bedrijven kunnen zich niet onderscheiden door een extra hoge kwaliteit te bieden. Ze concurreren op kosten: welke bedrijf kan zoveel mogelijk produceren tegen de laagste kosten?

Productieproces en milieuschade

Hoge temperaturen in de stoomkraker maken het mogelijk nafta te 'breken' in verschillende fracties waarvan ethyleen de meest waardevolle is. In de stoomkraker worden verschillende chemische stoffen, voornamelijk nafta afgebroken oftewel gekraakt. Nafta is een condensaat dat ontstaat bij het destilleren van ruwe olie, wat gebeurt in een raffinaderij. Het is een mengsel van koolwaterstoffen. De stoomkraker bestaat uit vele onderdelen. Het belangrijkste onderdeel is het fornuis waar de nafta gekraakt wordt onder hoge temperaturen. De restwarmte wordt gebruikt om de nieuwe, koude voeding alvast iets op te warmen. Nafta onder deze temperaturen valt uit elkaar in verschillende fracties. Nadat de producten uit de oven komen wordt het grof gescheiden. Voorbeelden van de producten die ontstaan door middel van kraken zijn ethyleen,

propyleen, en butadien. Ethyleen is van deze de meest waardevolle. Daarom proberen producenten de fractie ethyleen te maximaliseren.

De meeste milieuschade ontstaat bij de verbranding van fossiele brandstoffen om de kraker te verwarmen. De verbranding van gas om de kraker te verwarmen gaat gepaard met een hoge uitstoot van CO₂ en NO_x. In kleinere mate ontstaat er schade bij het uitdampen van de tanks (methaan), bij startup, shut-down, in het geval van reiniging en bij fakkelen. Fakkelen is een soort veiligheidssysteem: als een gedeelte van de kraker stil komt te staan in een noodsituatie, moet de aanwezige inhoud ergens heen. Dit wordt dan afgefakkeld: de koolwaterstoffen worden verbrand. Er komt bij de productie van ethyleen relatief weinig fijnstof vrij.

Sectorspecifieke technologieën

Elektrificatie

De belangrijkste technologie om op termijn CO₂-uitstoot te reduceren is elektrificatie. Op wat langere termijn is veel milieuwinst te boeken door de gasfornuizen in naftakrakers te vervangen door elektrische boilers die duurzame energie gebruiken. Dit veroorzaakt een substantiële reductie van de CO₂-uitstoot, omdat deze nu vooral uit dit verbrandingsproces voortkomt. In onze analyses werken we met een reductiepercentage van 80%.³⁴ Op industriële schaal wordt elektrificatie nog niet toegepast, wij verwachten dat dit tot minimaal 2040 duurt. De marginale kosten van elektrificatie zijn 90 euro per ton vermeden CO₂ (Ecofys, 2018).

Behalve CO₂ zal ook de uitstoot van NO_x en SO₂ dalen door elektrificatie. De uitstoot van NO_x en SO₂ hangt net zoals CO₂ samen met de verbranding van fossiele brandstoffen. Daarom zal elektrificatie ook de uitstoot van deze stoffen met 80% terugdringen. Dit zijn dus de co-benefits van deze technologie.

Mechanische recycling

Mechanische recycling vermindert de CO₂-uitstoot, omdat er minder ethyleen wordt gebruikt als grondstof voor kunststoffen. 18% van de productie kan worden vervangen door mechanische recycling (Ecofys, 2018). Mechanische recycling houdt in dat ethyleen als grondstof vervangen wordt door al gebruikt kunststof.³⁵ We verwachten dat de CO₂-uitstoot door het produceren van ethyleen hierdoor met 18% afneemt. De voorwaarde hiervoor is dat het smelten van gebruikt kunststof op basis van hernieuwbare energie gebeurt. De kosten hiervan zijn 31 euro per ton vermeden CO₂. Met deze techniek vermindert ook het grondstoffengebruik. We nemen niet mee dat het mechanisch recyclen van kunststof ook uitstoot in de afvalfase - wanneer het kunststof verbrand zou worden - bespaart.

CCS

Afvang en opslag van CO₂ verminderen zowel de proces- als de verbrandingsemissies. In de hele industrie is afvang en opslag van CO₂ (*Carbon Capture and Storage*; CCS) een veelgenoemde route om de CO₂-uitstoot op redelijk korte termijn terug te dringen. Welk percentage van de CO₂-emissies kan worden afgevangen, verschilt per soort emissie. Van de verbrandingsemissies kan 85% worden afgevangen. Voor procesemissies is dit 100%. Deze beslaan een veel kleiner deel van de totale emissies (Ecofys, 2018).

De technologie is inzetbaar vanaf 2025, maar tegen hoge kosten. Bij de productie van ethyleen is het mogelijk om CCS toe te passen vanaf 2025. De kosten voor CCS van procesemissies zijn 27 euro per ton vermeden CO₂. Voor CCS bij verbrandingsemissies zijn deze hoger, 103 euro per ton vermeden CO₂

³⁴ Bron: Hans Eerens, expert PBL.

³⁵ Onlangs is SABIC begonnen met het inzetten van afvalplastic in haar krakers, nadat het is gesmolten en afgebroken tot synthetische oliën.

(Koelemeijer e.a., 2018). De ETS-prijs in 2030 is volgens de prognose die wij hanteren nog niet zo hoog dat dit op dat moment kosteneffectief is (Brink, 2018).

CCS heeft co-benefits voor luchtvervuilende stoffen. CCS bij verbrandingsemissies kent co-benefits voor andere stoffen. De uitstoot van NO_x en SO₂ daalt met 10%. Volgens Hammingh e.a. (2010) daalt de uitstoot van fijnstof met 50%.

Bio-based grondstoffen

Fossiele brandstoffen vervangen met biomassa levert netto CO₂-besparing. De chemische industrie kan biomassa als grondstof gebruiken als alternatief voor aardgas, dus om warmte op te wekken. De verbranding van biomassa veroorzaakt netto minder CO₂, omdat de CO₂ eerder aan de lucht onttrokken is. De beschikbaarheid van biomassa is wel een voorwaarde. De marginale kosten van het gebruik van biomassa worden geschat op 27 euro per ton vermeden CO₂. De maximale hoeveelheid te reduceren CO₂ is met 370 miljoen kilogram relatief laag (Ecofys, 2018).

End-of-pipe technologieën SO₂: rookgasreiniging en stookgasreiniging

Rookgasreiniging verwijdert SO₂ voor 9,60 euro per kilogram. De optie 'Rookgasreiniging Regenerator Catcrackers' betreft het verwijderen met natronloogwassers van SO₂ dat vrijkomt tijdens het schoonbranden van de katalysators van de krakers. Deze optie vervangt ook een deel van een bestaand SO₂-filter. De totale reductie door deze optie is circa 2,2 kiloton en de kosten worden geschat op bijna 21,2 miljoen euro (Smeets e.a., 2015). Hierdoor zijn de marginale kosten per kilogram vermeden SO₂-uitstoot 9,60 euro.

Stookgasreiniging is een duurdere optie met minder potentieel. Stookgasreiniging verwijdert schadelijke stoffen, waaronder SO₂, door middel van een doekfilter. De emissiereductie die dit kan opleveren in de chemische industrie is 0,4 kiloton tegen 6,5 miljoen euro (Smeets e.a., 2014). Dit maakt de kosten per kilogram vermeden SO₂ relatief hoog: 16,10 euro. Dit bedrag is wel lager dan de milieuprijs van SO₂, te weten 19,40 euro.

End-of-pipe technologieën NO_x: SCR en SNCR

De uitstoot van NO_x kan omlaag dankzij NSCR (Niet Selectieve Katalytische Reductie). Een katalysator reinigt de NO_x uit gassen die vrijkomen bij verbranding. 90 tot 98% van de emissies kunnen hiermee worden verwijderd.³⁶ De technologie is per direct beschikbaar. De geschatte marginale kosten lopen enigszins uiteen (Smeets e.a., 2014). We hebben voor een pessimistische inschatting gekozen en de marginale reductiekosten gelijkgesteld aan 25 euro per kilogram vermeden NO_x.

Een complexere en duurdere variant van deze techniek is SNCR. SNCR staat voor selectieve niet katalytische reductie. Deze techniek vindt zijn toepassing in het tegengaan van NO_x-emissies in onder andere de chemische industrie, door een gas te injecteren in het afgas dat reageert met de NO_x en dit reduceert. Vaak is het reagerend gas (reagens) ammoniak. Er zijn hoge temperaturen vereist om de gassen te laten reageren op elkaar, daarom is de techniek ook geschikt in de chemische industrie. De verwijderingsefficiëntie is tussen de 40 en 80% van de emissies. De techniek is relatief eenvoudig en kent lage investeringskosten.³⁷ Omdat de kosten van SNCR hoger zijn dan die van SCR, gaan wij er niet vanuit dat bedrijven deze zullen gebruiken.

³⁶ Bron: Rijkswaterstaat ([link](#)), geraadpleegd in april 2019.

³⁷ Bron: Rijkswaterstaat ([link](#)), geraadpleegd in april 2019.

Bijlage D: sector Kunstmest

De derde sector die wij behandelen is kunstmest op basis van stikstof. De kunstmestindustrie maakt kunstmatige meststoffen voor de agrarische sector ter aanvulling van dierlijke meststoffen. Kunstmestsoorten zijn in drie hoofdgroepen in te delen: op basis van stikstof, fosfor en kalium. Binnen deze groepen bestaan weer verschillende specifiekere soorten. In Europa wordt vooral kalkammonsalpeter geproduceerd, een kunstmest op basis van ammoniumnitraat, waarvoor stikstof als grondstof wordt gebruikt. De sector die dit produceert behandelen wij in onze analyse.

De sector in Nederland bestaat uit twee grote producenten: Yara Sluiskil en OCI Nitrogen. Binnen Europa is Nederland het vijfde land in kunstmestproductie, maar met een relatief klein aantal bedrijven (Wesseler e.a., 2015). Yara is een Noors bedrijf en wereldwijd de grootste kunstmestproducent. Yara Sluiskil is binnen Yara de locatie van Yara met de grootste productiecapaciteit: 4,5-5 miljoen ton. OCI Nitrogen produceert ongeveer 3 miljoen ton kunstmest per jaar. Nederland is een netto-exporteur van kunstmest. Van de 7,5 miljoen ton die jaarlijks wordt geproduceerd is slechts 11% bestemd voor de Nederlandse landbouw (Meststoffen Nederland, 2015).

Kunstmest is een bulkproduct en de markt heeft geen sterke afbakening. Kunstmest is een bulkproduct met geen duidelijk onderscheidende kwaliteitskenmerken (Næss-Schmidt en Hansen, 2015). Dit geeft weinig ruimte voor individuele producenten om hun prijs te verhogen zonder dat dit de vraag naar hun product aantast. Niet alle planten hebben dezelfde soort kunstmest nodig. Kalkammonsalpeter wordt bijvoorbeeld het meest gebruikt in Europa, maar gewassen in andere werelddelen kunnen andere meststoffen nodig hebben om optimaal te kunnen groeien. Voor de Nederlandse kunstmestproducenten is de Europese markt dus het voornaamste speelveld. Daarbij zijn transportkosten relatief hoog om het product de hele wereld over te vervoeren. Echter kunnen de verschillen in productiekosten zo sterk oplopen, bijvoorbeeld door de beschikbaarheid in andere landen van heel goedkoop gas, dat deze hoger worden dan de transportkosten en concurrentie uit andere werelddelen opkomt.

Productieproces en milieuschade

De eerste stap om kunstmest te maken is de productie van ammoniak. Ammoniakfabrieken produceren de benodigde ammoniak. Ammoniak wordt gemaakt uit waterstof en stikstof, vrijwel uitsluitend volgens het Haber-Bosch proces.³⁸ Daaraan voorafgaand zijn dus twee andere stappen nodig, namelijk het maken van waterstof en van stikstof. Het maken van waterstof gebeurt op basis van aardgas door middel van 'steam reforming'. Stikstof uit de lucht halen gebeurt via een destillatieproces; hierbij wordt de lucht gekoeld om zuurstof en stikstof te scheiden.

Ammoniak wordt verwerkt tot salpeterzuur en uiteindelijk kunstmestkorrels. Vervolgens worden water en lucht aan het ammoniak toegevoegd, waardoor een oplossing bestaande uit 60% salpeterzuur ontstaat. Vermengd met ammoniakgas vormt zich hieruit de kunstmeststof ammoniumnitraat. De laatste stap van het productieproces bestaat uit het verwerken van deze stof tot korrels. Om deze korrels vorm te geven gebruiken de kunstmestproducenten dolomietgesteente en gips. Daarnaast wordt van ammoniak en CO₂ nog ureum gemaakt, dat ook verwerkt wordt tot kunstmestkorrels.

³⁸ Het Haber-Bosch proces is een methode voor ammoniak-synthese waarbij gebruik wordt gemaakt van hoge temperatuur en druk.

Voor de ‘steam reforming’ met aardgas als grondstof veroorzaakt grote schade in de vorm van CO₂-uitstoot. De productie van waterstof in de kunstmestindustrie vindt plaats door middel van steam reforming op basis van aardgas. De kunstmestindustrie is hiermee een grote afnemer van aardgas. De grootste milieuschade bij de productie van kunstmest ontstaat bij dit maken van waterstof uit aardgas. De milieuschade bij de andere stappen (het Haber-Bosch proces, de stikstofdestillatie en het maken van salpeterzuur) zijn gering ten opzichte van de schade die ontstaat bij het maken van waterstof uit aardgas.

De fijnstofemissies van de kunstmestindustrie zijn aanzienlijk. Dit heeft vooral te maken met op- en overslag van producten: van de eindproducten (de korrels) en het gesteente dat hiervoor nodig is.

Sectorspecifieke technologieën

Elektrificatie

Op de langere termijn kan elektrolyse voor een sterke reductie van CO₂ zorgen. In plaats van ‘steam reforming’ om waterstof te maken van aardgas, kan waterstof worden gemaakt van water door middel van elektrolyse. Wanneer dit gebeurt met duurzame elektriciteit, zal dit proces geen CO₂-emissies meer veroorzaken. Omdat er in andere delen van het productieproces wellicht nog wel CO₂ vrijkomt, hebben we het reductiepercentage van deze technologie gelijkgesteld aan 80%. Een voordeel van deze vergroening is dat het gebruikmaakt van de huidige infrastructuur en dat het vrij snel kan worden ingepast in het (Haber-Bosch) productieproces. Wel zal het nog enige tijd duren voordat de technologie toepasbaar en kosteneffectief is op grote schaal. Daarom nemen wij in onze analyses aan dat elektrolyse vanaf 2040 toegepast kan worden. Hierbij hebben we geen rekening gehouden met de beschikbaarheid van duurzame stroom, die ook toereikend moet zijn.

De kosten van kunstmestproducenten stijgen door elektrolyse met 72 euro per ton vermeden CO₂. Deze reductiekosten zijn berekend op basis van cijfers uit het MIDDEN-project (Batool & Wetzels, te verschijnen). Hierbij is rekening gehouden met de investeringskosten, afschrijvingskosten en onderhoudskosten. De kosten van elektriciteit zijn niet expliciet in de berekening meegenomen.

Omdat de productie aardgasonafhankelijk wordt, daalt ook de uitstoot van NO_x en SO₂. Net zoals bij ethyleenproductie, kent elektrificatie bij ammoniakproductie co-benefits. De fossiele grond- en brandstof aardgas wordt vervangen door water en duurzame elektriciteit. Hierdoor vermindert ook de uitstoot van NO_x en SO₂. We nemen aan dat dit met hetzelfde reductiepercentage, dus 80%, gebeurt.

CCS bij ammoniakfabrieken

In de kunstmestindustrie zijn relatief goedkope opties om de helft van de CO₂ te reduceren door deze af te vangen en op te slaan. Volgens Koelemeijer e.a. (2018) liggen deze kosten tussen de 10 en 50 euro per vermeden ton CO₂. Wij hebben hiervan een waarde van 36 euro per ton CO₂ genomen, rekening houdend met verschillen in marginale kosten tussen bedrijven. Voor niet alle emissies is afvang en opslag mogelijk. Het maximum potentieel voor de kunstmestindustrie is vastgesteld op 2,5 miljard kilogram, ongeveer de helft van de totale emissies in de uitgangssituatie.

End-of-pipe technologieën

Voor de reductie van luchtverontreinigende stoffen zijn verschillende end-of-pipe technologieën beschikbaar. Voor NO_x en SO₂ zijn dit industriebrede maatregelen en SCR/SNCR. Voor fijnstof zijn de twee typen filters beschikbaar net zoals in de andere sectoren. Deze end-of-pipe technologieën worden besproken in bijlage E.

Bijlage E: overzicht technologieën

Hieronder volgt een overzicht van technologieën voor emissiereductie per sector. Daarna volgt een toelichting op de generieke technologieën, die voor iedere sector beschikbaar zijn. Bij 'maximaal potentieel' kijken we net zoals bij emissiegetallen alleen naar directe emissies (ook wel: *scope 1-emissies*) en niet naar indirecte uitstoot van energiecentrales.

Kunstmest

Tabel E.1 Overzicht technologieën in de kunstmestindustrie

Stof	Technologie / oplossing	Uniek of Generiek	% Emissiereductie per eenheid output (kg)	Maximaal potentieel - indien van toepassing (mln. kg)	Introductiejaar - indien van toepassing	Marginale kosten per eenheid emissiereductie (Euro / kg)	Bron
CO ₂	Elektrificatie	u	80%	n.v.t.	2040	0.072	Eigen berekening o.b.v. Batool en Wetzels (2019)
CO ₂	CCS bij ammoniakfabrieken	u	100%	2500	2025	0.036	Koelemeijer e.a. (2018)
SO ₂	Industriebrede de-SO _x maatregelen	g	100%	0.10	n.v.t.	11.72	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Elektrificatie SO ₂	g	80%	n.v.t.	2040	0	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	CCS bij ammoniakfabrieken SO ₂	u	0%	n.v.t.	2025	0	Hammingh e.a. (2010)
NO _x	Industriebrede de-NO _x maatregelen	g	100%	1.3	n.v.t.	8.4	Smeets e.a. (2015)
NO _x	Elektrificatie NO _x	g	80%	n.v.t.	2040	0	Smeets e.a. (2015)
NO _x	CCS bij ammoniakfabrieken NO _x	g	0%	n.v.t.	2025	0	Hammingh e.a. (2010)
NO _x	SNCR/SCR	g	90%	n.v.t.	n.v.t.	25	Hammingh e.a. (2010)
PM _{2,5}	CCS bij ammoniakfabrieken PM _{2,5}	u	0%	n.v.t.	2025	0	Hammingh e.a. (2010)
PM _{2,5}	Electrostatic Precipitator (ESP)	g	100%	n.v.t.	n.v.t.	40	DHV (2010)

Staal

Tabel E.2 Overzicht technologieën in de ijzer- en staalindustrie

Stof	Technologie / oplossing	Uniek of Generiek	% Emissiereductie per eenheid output (kg)	Maximaal potentieel - indien van toepassing (mln. kg)	Introductiejaar - indien van toepassing	Marginale kosten per eenheid emissiereductie (Euro / kg)	Bron
CO ₂	CCU project	u	100%	500	2030	0,00	PBL 2019 (Ros & Wetzels)
CO ₂	CCS Tata Steel	u	100%	550	2030	0,05	Koelemeijer e.a. (2018)
CO ₂	Hisarna	u	16%	n.v.t.	2030	0	Croezen en Korteland (2010)
CO ₂	CCS icm hisarna (extra reductie)	u	48%	n.v.t.	2030	0,05	Croezen en Korteland (2010)
SO ₂	Rookgasreiniging Roetfabricage	g	100%	0.50	n.v.t.	2,90	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Diepere ontzwaveling Kookfabrieken	g	100%	0.90	n.v.t.	5,70	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Noodwasser Kookfabriek	u	100%	0.10	n.v.t.	13,50	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Optimalisatie Gaswasser Staalindustrie	u	100%	0.80	n.v.t.	7,70	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Industriebrede de-SO _x maatregelen	g	100%	0.82	n.v.t.	11,70	Smeets e.a. (2015)
NO _x	Industriebrede de-NO _x maatregelen	g	100%	5.32	n.v.t.	8,40	Smeets e.a. (2015)
PM _{2,5}	Electrostatic Precipitator (ESP)	g	100%	n.v.t.	n.v.t.	40	DHV (2010)
SO ₂	Hisarna (SO ₂)	u	16%	n.v.t.	2030	0	Croezen en Korteland (2010)
NO _x	Hisarna (No _x)	u	16%	n.v.t.	2030	0	Croezen en Korteland (2010)
PM _{2,5}	Hisarna (PM _{2,5})	u	0%	n.v.t.	2030	0	Croezen en Korteland (2010)

Ethyleen

Tabel E.3 Overzicht technologieën in de ethyleenindustrie

Stof	Technologie / oplossing	Uniek of Generiek	% Emissiereductie per eenheid output (kg)	Maximaal potentieel - indien van toepassing (mln. kg)	Introductiejaar - indien van toepassing	Marginale kosten per eenheid emissiereductie (Euro / kg)	Bron
CO ₂	Elektrificatie	u	80%	5900	2040	0,090	Ecofys (2018)
CO ₂	Mechanical recycling	g	100%	1300	2020	0,031	Ecofys (2018)
CO ₂	Biobased feedstock - functional	g	100%	370	2030	0,027	Ecofys (2018)
CO ₂	CCS (process)	g	100%	242	2025	0,027	Ecofys (2018)
CO ₂	CCS (fuel)	g	85%	6100	2025	0,10	Ecofys (2018)
SO ₂	Industriebrede de-SO _x maatregelen	g	100%	0.100	n.v.t.	11,7	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Elektrificatie SO ₂	g	80%	n.v.t.	2040	0	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Rookgasreiniging Regenerator Catcrackers	g	100%	2.2	n.v.t.	9,6	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	Stookgasreiniging chemie	g	100%	0.40	n.v.t.	16,1	Smeets e.a. (2015)
SO ₂	CCS (fuel) SO ₂	u	10%	n.v.t.	2025	0	Hammingh e.a. (2010)
NO _x	Industriebrede de-NO _x maatregelen	g	100%	1.26	n.v.t.	8,4	Smeets e.a. (2015)
NO _x	Elektrificatie NO _x	g	80%	n.v.t.	2040	0	Smeets e.a. (2015)
NO _x	CCS (fuel) NO _x	g	10%	n.v.t.	2025	0	Hammingh e.a. (2010)
NO _x	SNCR/SCR	g	90%	n.v.t.	n.v.t.	25	Hammingh e.a. (2010)
PM _{2,5}	CCS (fuel) PM _{2,5}	u	50%	n.v.t.	2025	0	Hammingh e.a. (2010)
PM _{2,5}	Electrostatic Precipitator (ESP)	g	100%	n.v.t.	n.v.t.	40	DHV (2010)

Toelichting generieke maatregelen

Voor de reductie van luchtverontreinigende stoffen zijn generieke en unieke end-of-pipe technologieën beschikbaar. Een end-of-pipe technologie verandert niets aan het productieproces, maar reduceert de emissies die hieruit voortkomen. In deze paragraaf bespreken we per stof generieke end-of-technologieën die voor de hele industrie, dus voor alle drie de sectoren beschikbaar zijn.

Industriebrede maatregelen kunnen de uitstoot van NO_x reduceren. Voor alle sectoren zijn industriebrede maatregelen toepasbaar die de uitstoot van NO_x terug kunnen dringen (PBL, 2015). Voorbeelden hiervan zijn lage NO_x-branders, het beperken van procesemissies en de reductie van stikstofoxiden van verbrandingsemissies. Voor iedere sector is het reductiepotentieel van deze end-of-pipe technologieën berekend door het aandeel van de sector van de industriële emissies van NO_x te nemen van het totale reductiepotentieel van deze industriebrede maatregelen. De marginale kosten zijn een gemiddelde van alle maatregelen die onder deze categorie vallen, gewogen naar reductiepotentieel.

Industriebrede maatregelen kunnen de uitstoot van SO₂ reduceren. Dezelfde methode als voor NO_x wordt toegepast voor de industriebrede reductiemogelijkheden van SO₂. Een industriebrede reductiemaatregel voor SO₂ is bijvoorbeeld ontzwaveling van stookgas en rendementsverbetering van SRU's (Sulphur Recovery Units).

Reductie van PM_{2.5} is mogelijk door de inzet van een Elektrostatisch filter (Electrostatic Precipitator, ESP)³⁹ De marginale kosten van maatregelen zijn sterk afhankelijk van de concentratie fijnstof in de gasstroom die gezuiverd moet worden. We gebruiken de kostencurves uit DHV (2010) om een benadering van de marginale kosten te maken voor een hele installatie. De kosten van deze maatregelen stellen we 40 euro per kilo vermeden PM_{2.5}.

³⁹ Bron: Rijkswaterstaat ([link](#)), geraadpleegd in april 2019.

Bijlage F: vergelijkingen rekentool

Deze bijlage geeft een overzicht van de vergelijkingen die gebruikt worden in de rekentool zoals die beschreven is in hoofdstuk 2. De vergelijkingen staan hier in volgorde van berekening en monden uit in de eindresultaten op sectorniveau: de verandering van productievolume, marginale kosten en emissieniveaus in Nederland als resultaat van emissiebelastingen. Allereerst geeft tabel F.1 een verklaring van de gebruikte parameters. De wijze van berekenen en het type parameters zijn voor alle drie de sectoren gelijk. De mogelijke technologieën en hun effect op emissies verschillen wel tussen de sectoren.

Tabel F.1 Verklaring van de gebruikte parameters vergelijkingen rekentool beprijzing milieuschade

Parameter	Betekenis	Eenheid
E	Emissie	kg
η	Efficiëntieverbetering	-
t	Belasting per eenheid emissie	Euro/kg
p – prijs	Prijs per eenheid product	Euro/kg
c - kosten	Kosten	Euro/kg
NL, EU, ROW	Nederland, EU, Rest van de Wereld	-
Q –	Productie (jaarlijks)	kg
P	Productiewaarde (jaarlijks)	Euro
W	Winst (jaarlijks)	Euro
f – fractie, percentage		-
T_{ijt}	Inzet van technologie, 1 als technologie wordt ingezet, anders 0	-
[A]	Gelijk aan 1 als conditie A waar is, anders 0	-
Subscript i	Stof i	-
Subscript j	Technologie j	-
Subscript t	Jaar t	-

De berekening begint met een ruwe schatting van de kostprijs en de afzetprijs zonder belasting in 2015. Iedere sector maakt in deze benadering één type product, dat per kilogram kan worden verkocht. De afzetprijs zonder belasting p_0 volgt uit de productiewaarde P en de productie Q en blijft constant:

$$p_{0,2015} = \left(\frac{P}{Q} \right)_{2015} = constant$$

De kostprijs volgt met de jaarwinst W als:

$$c_{0,2015} = \left(\frac{P - W}{Q} \right)_{2015} = constant$$

De hoeveelheid export richting de EU, ROW en de binnenlandse vraag tellen samen op tot de totale Nederlandse productie in jaar t:

$$Q_t = Q_{NL,t} + Q_{EU,t} + Q_{ROW,t}$$

De emissies van een stof i dalen ook zonder belasting jaarlijks met $\eta\%$ (de autonome efficiencyverbetering) ten opzichte van het basisjaar 2015:

$$E_{0i,t} = E_{0i,2015} (1 - \eta)^{t-2015} = E_{0i,2015} \eta_t, \eta > 0$$

Nadat een belasting op emissies wordt ingesteld⁴⁰, beslissen bedrijven of zij reductietechnologie willen inzetten, de belasting betalen of een combinatie. In beide gevallen maken bedrijven hierbij kosten, waardoor de prijs in Nederland stijgt en de vraag naar hun product daalt.

Emissiereductie door technologie gaat via twee mechanismen: relatief en absoluut. Allereerst kan een technologie de bestaande emissies met een relatief percentage verminderen. De maximale emissiereductie $E_{ij,red,max}$ wordt dan:

$$E_{ij,red,max} = f_{red,i} E_{0i}$$

Een technologie kan ook gebonden zijn aan een maximale potentiële emissiereductie:

$$E_{ij,red,max} = \bar{E}_{pot,i}$$

Als beide mechanismen tegelijk van toepassing zijn, wordt de maximale reductie het minimum van beide mogelijkheden:

$$E_{ij,red,max} = \min(\bar{E}_{pot,i}, f_{red,i} E_{0i})$$

Als de marginale belasting op een verontreinigende stof groter is dan de marginale reductiekosten van de goedkoopste technologie, dan loont het voor een bedrijf om die technologie in te zetten. Bepaalde complexe technologieën zijn in het basisjaar echter nog niet volwassen, waardoor bedrijven deze pas kunnen inzetten als het verwachte introductiejaar y_{int} aangebroken is. In formulevorm wordt de overweging dan voor technologie j , stof i , jaar t :

$$T_{ijt} = [y \geq y_{int}][t_{it} > c_{jt}], j \in [1, \dots, n], T_{ijt} \in [0, 1]$$

waarbij $T = 1$ betekent dat een technologie geheel of gedeeltelijk wordt ingezet.

Bedrijven kunnen een technologie geheel of gedeeltelijk inzetten op een continue schaal $f_{inzet,jt}$, zodat het mogelijk wordt dat de emissies op nul uitkomen⁴¹. De emissiereductie $E_{ijt,red}$ komt dan uiteindelijk neer op:

$$E_{ijt,red} = T_{ijt} E_{ij,red,max} f_{inzet,jt}, f_{inzet,jt} \in [0, \dots, 1]$$

De emissies van stof i in jaar t , na toepassing van de gekozen technologieën, zijn te berekenen door alle emissiereducties van de basisemissies af te trekken:

$$E_{it} = E_{0,it} - \sum E_{ijt,red}$$

⁴⁰ De rekentool bevat geen anticipatie-effecten.

⁴¹ In werkelijkheid is dit niet altijd mogelijk, omdat installaties een bepaalde schaalgrootte kunnen vereisen om technisch rendabel te zijn.

Als een technologie volledig is ingezet, overweegt een bedrijf de inzet van de technologie die daarna het goedkoopst is per eenheid vermeden emissie. Dit proces gaat door totdat de emissies teruggebracht zijn naar nul, of tot er geen technologieën meer beschikbaar zijn voor de betreffende stof. Met deze aanpak minimaliseert een bedrijf de kostenstijging die het gevolg is van de opgelegde belasting. Deze kostenstijging bestaat uit twee componenten: de belasting zelf en de gemaakte reductiekosten.

De totale reductiekosten bedragen:

$$c_{r,t} = \sum \Delta E_{ijt} c_{r,ij}$$

De totale belasting in jaar t over alle stoffen wordt:

$$c_{b,t} = \sum E_{it} t_t$$

De totale kosten per eenheid product inclusief belastingen en reductiekosten, opgesplitst in de bijdragen van ETS (CO₂) en de Pigou-belasting (NO_x, SO₂, fijnstof) worden nu:

$$c_t = c_0 + \left(\frac{c_{b,t} + c_{r,t}}{q_t} \right)_{ETS} + \left(\frac{c_{b,t} + c_{r,t}}{q_t} \right)_{Pigou} = c_0 + c_{t,ETS} + c_{t,Pigou}$$

Het kostenniveau zonder belastingen is in de rekentool voor alle gebieden gelijk:

$$c_{0,NL} = c_{0,EU} = c_{0,ROW}$$

Hetzelfde geldt voor de afzetprijs zonder belastingen:

$$p_{0,NL} = p_{0,EU} = p_{0,ROW}$$

Met belastingen wordt de afzetprijs per eenheid product dan:

$$p_t = p_0 + PTR([ETS] * c_{t,ETS} + [Pigou] * c_{t,Pigou})$$

In de berekening stellen we de Pass Through Rate PTR op 1, Nederlandse bedrijven berekenen de volledige kostenstijging door aan hun klanten in binnen- en buitenland. Dit leidt tot een bovengrens voor de prijsstijging van Nederlandse producten. Per periode en gebied zijn belastingen wel of niet actief. Zowel NL als EU vallen bijvoorbeeld onder ETS, maar niet de rest van de wereld. De relatieve prijsverhouding tussen twee gebieden m en n is vervolgens te berekenen als:

$$\Delta p_{t,mn} = \frac{p_{t,m}}{p_{t,n}} - 1$$

Als ten slotte de prijzen in Nederland stijgen ten opzichte van het buitenland, zal de vraag naar Nederlandse producten dalen ten opzichte van de situatie in 2015: hoe groter de Armington-elasticiteit⁴², hoe groter de daling. De vraagdaling ten opzichte van 2015 volgt nu uit:

$$\left(\frac{q_t}{q_{2015}} \right)_{m,n} = (1 + \Delta p_{t,mn})^{1-\varepsilon_{m,n}} - 1$$

⁴² Bij een Armington-elasticiteit van 1 neemt de vraag ten opzichte van het buitenland 1% af als de prijs relatief met 1% stijgt.