



Centraal Planbureau

CPB Notitie | 6 november 2011

# Analyse Routekaart 2050

*Op verzoek van het ministerie  
van Infrastructuur en Milieu*





# CPB Notitie

Aan: Ministerie van Infrastructuur en Milieu

**Centraal Planbureau**

Van Stolkweg 14  
Postbus 80510  
2508 GM Den Haag

T (070) 3383 380  
I [www.cpb.nl](http://www.cpb.nl)

**Contactpersonen**

Rob Aalbers  
Johannes Bollen  
Kees Folmer  
Peter Arts

**Datum:** 6 november 2011

**Betreft:** Analyse Routekaart 2050

## Samenvatting

Het ministerie van Infrastructuur en Milieu heeft het CPB gevraagd om de economische gevolgen van het pad dat geschetst wordt in de Europese Routekaart 2050 voor Nederland en de Europese Unie in kaart te brengen. Tevens is gevraagd of er ontwikkelingen zijn, de zogenaamde robuuste elementen, waarvan we met een behoorlijke mate van zekerheid kunnen zeggen dat deze noodzakelijk zijn voor het bereiken van de doelstelling van 80% emissiereductie in de EU in 2050.

Klimaatbeleid brengt zowel kosten als baten met zich mee. Aan de batenkant kan dan in de eerste plaats gedacht worden aan het voorkomen van klimaatverandering, maar ook aan een betere luchtkwaliteit als gevolg van de afname van fijn stof (of aan de vermeden bestrijdingskosten voor luchtbeleid). Aan de kostenkant gaat het om de meerkosten die verbonden zijn aan de inzet van duurere technologieën, zoals wind, zonPV, kolen- en gas CCS en zonthermisch (met opslag). Uit de analyse met WorldScan blijkt dat uitvoering van de Europese Routekaart 2050 gepaard gaat met een welvaartsverlies (uitgedrukt als percentage van het nationaal inkomen) in 2030 van maximaal 1% in de EU. In Nederland is het welvaartsverlies, als gevolg van de al bestaande consumptiebelastingen op elektriciteit, gas en brandstof, in vrijwel alle scenario's en tijdstippen ongeveer twee keer zo groot. Ofschoon de CO<sub>2</sub> prijs overal in de EU gelijk is, wordt het extra welvaartsverlies in Nederland veroorzaakt door de stapeling van CO<sub>2</sub> prijs op de bestaande energiebelastingen, die in Nederland relatief hoog zijn ten opzichte van het EU gemiddelde. Voor zover deze belastingen geen andere doelen dienen, zoals congestie en vermindering van luchtvervuiling (fijn stof), leiden ze tot een te grote daling van de energieconsumptie van huishoudens door het inzetten van dure bestrijdingsopties en daarmee tot een extra welvaartsverlies (bovenop het welvaartsverlies door klimaatbeleid). Dit extra welvaartsverlies kan worden beperkt door de bestaande energiebelastingen te verlagen met een bedrag dat overeenkomt met de CO<sub>2</sub> prijs. Hierdoor wordt een deel van de Nederlandse emissiereductie verschoven naar de andere EU landen, waardoor de energieconsumptie van huishoudens in Nederland niet disproportioneel wordt teruggedrongen. Een andere manier om het dit inkomensverlies te beperken is door coördinatie van klimaatbeleid, bijvoorbeeld door de invoering van emissiehandel in alle deelnemende landen. Uit onze analyse blijkt dat dit het inkomensverlies (en daarmee de kosten van klimaatbeleid) met ongeveer 50% vermindert.

De genoemde inkomensverliezen maskeren echter deels de ontwikkelingen op sectorniveau. Zo kunnen de productieverliezen in een aantal sectoren in Nederland, waaronder de energie-intensieve en de landbouwsector, in 2030 oplopen tot respectievelijk 13% en 8%. Ook hier geldt dat de invoering van emissiehandel zal leiden tot een forse daling van deze productieverliezen: in de landbouw sector dalen ze

bijvoorbeeld van 8% naar 2% als de Annex 1 landen, dat zijn de landen die verplichtingen zijn aangegaan onder het Kyoto protocol, emissiehandel introduceren. In de energie-intensieve sector dalen ze in dat geval van 13% naar 5%.

Coördinatie van klimaatbeleid is overigens niet alleen nodig om de inkomensverliezen verbonden aan de Europese Routekaart 2050 te beperken, maar ook om tot een substantiële reductie van de mondiale emissies te komen. Een klimaatakkoord tussen de Annex 1 landen, dat wil zeggen zonder de deelname van Brazilië, India en China, slaagt er namelijk niet in om de mondiale emissies substantieel te laten dalen. Zonder deelname van Brazilië, India en China dalen de mondiale emissies in 2030 namelijk met slechts 3%, omdat het overgrote deel van de emissiereductie in de EU en de overige Annex 1 landen, namelijk 72%, weglekt naar de niet deelnemende landen.

Onze analyse laat verder zien dat de cumulatieve emissiereductie, zoals voorgesteld onder de Europese Routekaart 2050, een efficiënte strategie is, mits de wereld zich committeert aan de 2-graden doelstelling. In dat geval wordt namelijk een groot deel van de tot 2050 beschikbare emissieruimte ingenomen door de emissies van de bestaande kolen- en gascentrales met als gevolg dat deze centrales. Het gevolg daarvan is dat deze centrales, zodra ze zijn afgeschreven, vervangen moeten worden door productiecapaciteit die vrijwel geen CO<sub>2</sub> uitstoot. Verder lijkt ook het reductietempo van de Europese Routekaart 2050 efficiënt te zijn. Daarbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat het CPB - gezien de beperkt beschikbare onderzoekstijd - geen rekening kon houden met retrofit van nieuw te bouwen kolen- en gascentrales noch met de mogelijkheid van biomassa met CCS. Dit zou het optimale reductietempo kunnen beïnvloeden.

In onze analyse hebben we de robuuste elementen in de Europese elektriciteitssector in kaart met het MERGE model. Het MERGE model bevat een volledige beschrijving van het wereldwijde energieverbruik en -aanbod en de daaraan verbonden emissies, opties en kosten om de uitstoot van broeikasgassen tegen te gaan. Bovendien houdt het model rekening met alle andere broeikasgasemissies, zoals voortkomend uit veranderingen in landgebruik en de productie van cement. Ook voor deze emissies kan het MERGE model de opties en kosten verbonden aan emissiereductie simuleren. Een bijzondere eigenschap van het MERGE model is dat het in de elektriciteitssector rekening houdt met *endogeen leren*: de kosten van een technologie, zoals zonPV, wind en kolen CCS, worden beïnvloed door de wereldwijde cumulatieve inzet van die specifieke technologieën. Met het MERGE model zijn uitgebreide gevoeligheidsanalyses gedraaid door de hoogte van de leereffecten - met welk percentage dalen de kosten bij een verdubbeling van de wereldwijde capaciteit - te variëren. Uit deze analyse komen de volgende conclusies naar voren:

- Wind en biomassa worden in alle onderzochte gevallen in substantiële hoeveelheden in gezet. Zo groeit de inzet van biomassa in de elektriciteitssector van bijvoorbeeld 7 EJ in 2020 naar 65 EJ in 2050 en 100 EJ in 2100.
- Zonder een politieke ban op conventionele nucleaire elektriciteitscentrales neemt het aandeel nucleair in de EU toe tot 36% in 2030 om daarna op een iets lager niveau (25%) min of meer te stabiliseren.
- *Zonder een goede en goedkope oplossing* om fluctuerende bronnen, zoals wind en zonPV, in te passen in het elektriciteitsnetwerk lijkt het potentieel voor deze technologieën beperkt te zijn. Na 2060 komt de bodem van de wereldwijde gasvoorraden namelijk in zicht, terwijl tegelijkertijd de vraag naar gas in andere regio's onverminderd sterk blijft, als gevolg van de lokale inpassing van wind en zonPV.
- Bij goede en goedkope oplossingen om fluctuerende bronnen in te passen in het netwerk kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de opslag van waterstof in grotten, batterijen, de productie van groen gas ten behoeve van gascentrales of demand side management met slimme netten. Merk op dat een oplossing pas 'goedkoop' als het de concurrentieslag aan kan met een techniek als kolen CCS, nucleair of zonthermisch (CSP) met opslag. Bovendien moet een oplossing 'beschikbaar' zijn in de zin dat er geen concurrerende toepassingen met een hoger maatschappelijk rendement zijn. Voor het gebruik van groen gas in elektriciteitscentrales betekent dit bijvoorbeeld dat groen gas niet ingezet kan worden voor autorijden of warmte.

- Zonder een goed een goedkope oplossing om fluctuerende bronnen in te passen in het netwerk lijkt het potentieel voor een techniek als wind op zee in de EU beperkt. Wind op zee is immers duurder dan wind op land en komt daarmee pas in beeld als wind op land onvoldoende van de grond komt.
- Afhankelijk van de hoogte van de leereffecten is het ofwel kolen CCS ofwel zonthermisch met opslag dat na 2050 een dominante rol krijgt in de elektriciteitsopwekking. Vanwege de leereffecten wordt daarop vaak al voor 2050 voorgesorteerd.
- De EU is te klein om zelfstandig sturing te geven aan de richting van de technologische verandering, omdat zij in 2050 nog maar 15% van de wereldwijde elektriciteitsproductie voor haar rekening neemt (in 2100 is dat percentage zelfs gedaald naar 10%). Als gevolg hiervan is het klimaatbeleid buiten de EU van groot belang voor de optimale technologiekeuze in de EU: uit onze analyses kwam naar voren dat naarmate het wereldwijde klimaatbeleid minder streng is, de kans dat kolen CCS op termijn de dominante optie wordt, toeneemt.
- De mate waarin energiebesparing wordt toegepast, is sterk afhankelijk van de huidige en toekomstige prijs van energie, waaronder de elektriciteitsprijs. Onze analyses laten zien dat een sterke daling van de elektriciteitsprijzen, bijvoorbeeld als gevolg van hoge leereffecten bij zonthermisch met opslag, tot een toename van de elektriciteitsvraag kan leiden met 31%.

Wat betekenen deze conclusies voor het beleid? Deze notitie betoogt dat efficiënt klimaatbeleid bestaat uit een mix van ‘een stok’ en ‘een wortel’. Terwijl de CO<sub>2</sub>-prijs (‘de stok’) het kostenverschil tussen fossiele en duurzame technologie in ieder geval deels opheft, zorgen andere instrumenten (‘de wortels’) ervoor dat de toekomstige kosten van jonge duurzame technologieën, zoals zonPV en zonthermisch met opslag, voldoende snel dalen. Alleen op deze wijze worden de kosten van de energievoorziening geminimaliseerd. Er bestaat op dit moment echter veel onduidelijkheid over de optimale inzet van de ‘wortels’: hoe groot moeten de ‘wortels’ zijn en welke ‘wortels’ kunnen we het beste gebruiken? Dit heeft enerzijds te maken met de onzekerheid over de oorzaak van mogelijke kostendalingen - dalen de kosten van nieuwe technologieën via ‘learning-by-doing’ of via ‘learning-by-research’ - en anderzijds met een lacune in de economische literatuur op het gebied van de optimale aansturing van klimaatinnovaties. Wel is het mogelijk om een aantal aanbevelingen voor een efficiënte invulling van klimaatbeleid te doen. Zo geeft de bestaande onzekerheid een prikkel om alle technologieopties zo lang als mogelijk open te houden om op die manier te profiteren van nieuwe kennis over kansrijke technologieopties. Deze strategie lijkt vooral interessant voor technologieën met een lang leertraject, zoals zonPV, zonthermisch met opslag en de opslag van energie via bijvoorbeeld waterstof. Voor de technologieën met kort(er) leertraject, zoals biomassa en wind, lijkt het openhouden van opties minder relevant. Deze technologieën zijn namelijk naar verwachting rond 2020 rijp voor de markt (maar alleen als de EU het pad dat uitgestippeld wordt in de Europese Routekaart 2050 daadwerkelijk uitvoert). In alle gevallen is het echter cruciaal om te beseffen dat de uiteindelijke technologiekeuzes een uitvloeisel zijn van acties en ontwikkelingen op wereldschaal. Een strategie waarin de EU zelfstandig richting wil geven aan de technologische ontwikkeling lijkt dan ook weinig perspectiefrijk.

## 1 Inleiding

Het ministerie van Infrastructuur en Milieu heeft het CPB gevraagd om de economische gevolgen van het pad dat geschetst wordt in de Europese Routekaart 2050 voor Nederland en de Europese Unie in kaart te brengen. Daarbij is het aanvullende verzoek gedaan om aandacht te besteden aan de zgn. robuuste elementen, dat wil zeggen ontwikkelingen waarvan we met een behoorlijke mate van zekerheid kunnen zeggen dat deze noodzakelijk zijn voor het bereiken van de doelstelling van 80% reductie van broeikasgassen in de EU in 2050. Deze notitie gaat in op beide vragen en valt daarom uiteen in twee delen. In het eerste deel (paragraaf 2) besteden we aandacht aan de economische gevolgen van klimaatbeleid tot 2030. Daarbij kan worden gedacht aan de impact van de Europese Routekaart 2050 op de welvaart in Nederland en de EU. Daarbij is ook gekeken naar de productieverliezen en de

werkgelegenheidseffecten in verschillende verschillen. Tot slot zijn ook de weglekeffecten van de Europese Routekaart 2050 in kaart gebracht.

In het tweede deel (paragraaf 3) gaan we vervolgens na of er inderdaad sprake is van robuuste elementen in het klimaatbeleid. We doen dit door na te gaan wat het effect is van onzekerheid over leereffecten en de internationale beleidsomgeving op de ingezette technieken in de elektriciteitssector in 2050. In paragraaf 4 verkennen we enkele implicaties hiervan voor het klimaatbeleid.

## 2 Economische gevolgen Europese Routekaart

In deze sectie 2 brengen we - gebruikmakend van het algemeen evenwichtsmodel WorldScan - de macro-economische gevolgen van de Routekaart 2050 in kaart.<sup>1</sup> We doen dit door de economische gevolgen van de Routekaart 2050 in Nederland en de EU te bespreken en met elkaar te vergelijken. Bovendien plaatsen we de ontwikkelingen binnen de EU in perspectief door een vergelijking te maken met de wereldwijde ontwikkelingen. Naast de economische gevolgen bespreken we het effect van de Routekaart op de mondiale emissies. De belangrijkste vraag daarbij is de omvang van de weglekeffecten bij klimaatverdragen waarbij sommige (ontwikkelings)landen geen beperking op hun emissieruimte krijgen. Meer precies, welk percentage van de emissiereductie in de EU wordt ongedaan gemaakt door een stijging van de emissies in de rest van de wereld?

### 2.1 Het basispad en de onderzochte beleidsvarianten

In deze notitie worden de gevolgen van klimaatbeleid berekend ten opzichte van een basispad dat vrijwel volledig overeenkomt met het basispad van de World Energy Outlook 2009 (IEA, 2009). Het door ons gekozen basispad wijkt echter op één punt af van het basispad uit de WEO 2009: wij houden geen rekening met de bestaande ETS emissieplafonds in de EU. Dit maakt een consistente vergelijking van klimaatbeleid tussen verschillende landen mogelijk, omdat de gevolgen van klimaatbeleid consequent worden afgezet tegen een scenario waarin geen klimaatbeleid wordt gevoerd. Voor de EU betekent dit dat de gepresenteerde effecten iets hoger uit zullen vallen ten opzichte van een vergelijking waarin de ETS emissieplafonds wel waren meegenomen.

Omdat wij geen rekening houden met de bestaande emissieplafonds is het energieverbruik in EU in ons basispad hoger dan in het basispad van de WEO, terwijl er in de rest van de wereld juist sprake is van een lager energieverbruik (door de iets hogere prijzen van fossiele brandstoffen). Dit leidt in de periode 2004 - 2020 tot iets hogere emissies in de EU en iets lagere in de VS en Japan. Tabel A.3 toont de verschillen tussen de twee basispaden.

In ons basispad blijft de wereldbevolking groeien. In combinatie met een wereldwijde economische groei van 2,7% per jaar betekent dit dat de wereldwijde energievraag in 2020 bijna 30% hoger is dan in 2004. Deze toename komt voornamelijk voor rekening van de niet-Annex 1 landen, waarmee de kloof in het

---

<sup>1</sup> De versie van Worldscan die we voor deze notitie hebben gebruikt bevat de gedetailleerde specificatie van technologieën om elektriciteit op te wekken zoals geformuleerd door Boeters and Koornneef (2010). Daarnaast beschrijft WorldScan de conventionele technieken om biobrandstoffen te produceren uit Wobst et al. (2007). Het model onderscheidt 23 regio's en 18 sectoren. Het Emission Trading Scheme (ETS) omvat 2 sectoren, namelijk elektriciteit en de energie intensieve productie. Alle andere sectoren en activiteiten van huishoudens behoren tot de niet-ETS sectoren. Voor elk van de 23 landen en regio's zijn factormarkten gemodelleerd voor hoog- en laaggeschoolde arbeid, kapitaal, land en natuurlijke hulpbronnen (zie Tabel A.1 in de appendix). Naast elektriciteit onderscheidt WorldScan zes aparte energiedragers: kolen, aardolie- en steenkoolderivaten, aardgas, moderne biomassa, biodiesel en bioethanol. WorldScan houdt rekening met uitstoot van methaan en distikstofoxide die ontstaan bij verbranding van energiedragers, industriële processen en productie in de landbouw, zoals bij het verbouwen van rijst, in de veehouderij en door het gebruik van kunstmest. Verder bestaat de mogelijkheid om end-of-pipe maatregelen in te zetten om de emissie van broeikasgassen terug te brengen. Voor een volledige beschrijving van WorldScan verwijzen we naar Bollen et al. (2004), Lejour et al. (2006), Wobst et al. (2007), Manders en Veenendaal (2008), Hayden et al. (2010) en Boeters en Koornneef (2010).

energieverbruik ten opzichte van de geïndustrialiseerde landen kleiner wordt. Uit de beschrijving van het basispad zoals opgenomen in Tabel A.2 blijkt dat er in het basispad sprake is van een wereldwijde daling van de energie- en emissie-intensiteiten. Deze daling is het sterkst in de niet-Annex 1 landen. Conform de World Energy Outlook 2009 bereikt de olieprijs in 2020 in het basispad een niveau van 100\$ per vat, terwijl de Europese gasprijs juist achter blijft. Ten opzichte van 2009 blijven de steenkoolprijzen in de verschillende regio's onveranderd. Alle prijzen en hoeveelheden zijn gekalibreerd op het basisjaar 2004 en komen voor een belangrijk deel uit het GTAP-7 databestand (Narayana en Walmsley, 2008).

In deze notitie analyseren we met behulp van WorldScan de economische gevolgen van vier beleidsvarianten in termen van welvaart, CO<sub>2</sub>-prijzen, emissies, doelen en sectorale veranderingen van productie en werkgelegenheid. Daarnaast schetsen we de impact van de Routekaart op de mondiale emissies, waarbij we expliciet rekening houden met koolstoflekkage ('carbon leakage') als gevolg van het (mogelijk) ontbreken van een wereldwijde klimaatcoalitie. Omdat de omvang van de koolstoflekkage direct afhangt van de (on)volledigheid van de wereldwijde klimaatcoalitie, analyseren we de volgende vier varianten:

1. EU Alleen: De Europese Unie begint in 2020 met de uitvoering van de Routekaart 2050, terwijl de rest van de wereld in ieder geval tot 2030 geen klimaatbeleid voert. Binnen de EU is de verdeling van de emissieruimte per regio/land gebaseerd op de aannames van de EU-routekaart (EU, 2011). In de EU landen is sprake van emissiehandel tussen de ETS sectoren onderling en tussen de niet-ETS (NETS) sectoren onderling, maar niet tussen de ETS en NETS sectoren.
2. Annex1-Z: Er is een klimaatcoalitie waaraan alle Annex-1 landen meedoen, maar er is geen emissiehandel tussen EU en niet-EU landen. In de EU landen is wel sprake van emissiehandel tussen de ETS sectoren onderling en tussen de NETS sectoren onderling, maar niet tussen de ETS en NETS sectoren.
3. Annex1-M: Als Annex1-Z, maar nu met emissiehandel tussen alle Annex-1 landen en alle sectoren.
4. Annex1BIC-M: Er is een klimaatcoalitie waaraan alle Annex-1 landen, Brazilië, India en China meedoen. Binnen deze coalitie is sprake van emissiehandel tussen alle landen en sectoren. De emissies in de Annex1BIC zijn consistent met een kans van 50% op het halen van 2-graden doel. De toewijzing van emissierechten naar landen is gebaseerd op EU (2011).

Voor alle beleidsvarianten is verder een EU-doelstelling van 20% hernieuwbare energie gehanteerd. Deze doelstelling wordt gerealiseerd door in alle landen één uniforme subsidie te geven op hernieuwbare energie. Er zijn dus geen landenspecifieke doelen voor hernieuwbare energie. Verder is de procentuele daling van de emissieruimte tussen 2020-2030 uniform tussen ETS en NETS en is in geen van de beleidsvarianten sprake van CDM.<sup>2</sup> Door de beleidsvarianten met elkaar te vergelijken wordt inzicht verkregen in de gevolgen van vergaande emissiereducties voor Nederland en de EU. Meer specifiek wordt duidelijk hoe deze gevolgen afhangen van zowel internationale afspraken over emissiereducties als het gekozen instrumentarium, zoals emissiehandel tussen landen en tussen sectoren. Zo geeft een vergelijking van scenario 1 en 4 bijvoorbeeld aan wat de meerkosten van een 'alleingang' van de EU zijn, terwijl een vergelijking van scenario 2 en 3 aangeeft wat het effect is van de deelname van Brazilië, China en India aan een internationale klimaatovereenkomst.

## 2.2 Prijzen, emissies en doelen in de EU en Nederland

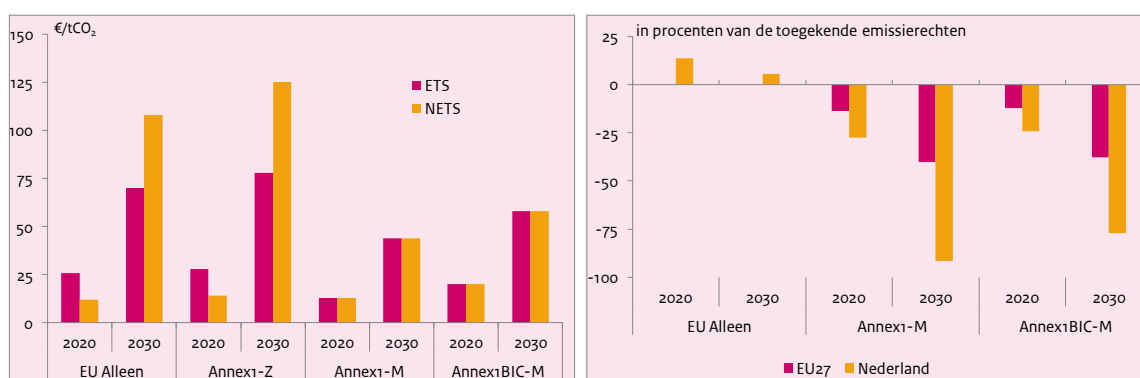
Figuur 2.1 toont de gevolgen van de vier varianten op de koolstofprijzen, de emissies en de doelen voor Nederland en de EU.<sup>3</sup> Alle varianten laten een forse stijging van de CO<sub>2</sub>-prijzen tussen 2020 en 2030 zien op zowel de ETS als de NETS markten. Zo stijgt de CO<sub>2</sub>-prijs in de ETS bijvoorbeeld van 26 \$ per tCO<sub>2</sub> in

<sup>2</sup> CDM (Clean Development Mechanism) biedt onder art. 12 van het Kyoto Protocol voor rijke geïndustrialiseerde landen de mogelijkheid om emissiebeperkende projecten binnen ontwikkelingslanden te financieren, waarvan de geïndustrialiseerde landen de resultaten mogen meetellen bij hun nationale reductiedoelstelling.

<sup>3</sup> Alle prijzen in paragraaf 2 zijn uitgedrukt in prijzen van 2004. Meer gedetailleerde informatie is te vinden in tabellen A4 en A5.

2020 naar 70 \$ per tCO<sub>2</sub> in 2030 in de 'EU Alleen' variant. Deze stijging van de CO<sub>2</sub>-prijs reflecteert het gebrek aan goedkope bestrijdingsopties na 2020 en daarmee de uitputting van het laaghangend fruit. De stijging van de CO<sub>2</sub>-prijs is overigens het grootst in de NETS in de varianten zonder emissiehandel (tot maar liefst 125 \$ per tCO<sub>2</sub> in 2030 in de 'Annex 1 met emissiehandel' variant). De reden hiervoor is dat de CO<sub>2</sub> uitstoot in de NETS grotendeels bepaald worden door de energievraag ten behoeve transport en warmte. Omdat deze vraag relatief ongevoelig is voor de CO<sub>2</sub>-prijs, treedt pas na een forse stijging van de CO<sub>2</sub> prijs een substantiële daling op van de CO<sub>2</sub> uitstoot in de NETS.

**Figuur 2.1 CO<sub>2</sub> prijzen op ETS en niet-ETS markten (links) en de aan- of verkoop van emissierechten in verschillende regio's (rechts) in verschillende varianten**



Figuur 2.1 laat verder zien dat een uitbreiding van de klimaatcoalitie zonder uitbreiding van emissiehandel tussen de EU en de niet-EU landen tot hogere CO<sub>2</sub> prijzen in de EU leiden! De deelname van andere landen leidt namelijk tot een daling van de internationale olieprijs, die in de EU gecompenseerd wordt door een stijging van de CO<sub>2</sub> prijs tegen een gelijkblijvend emissieplafond. Als de uitbreiding van de klimaatcoalitie echter samen gaat met emissiehandel tussen alle deelnemende landen, dan zien we wel lagere CO<sub>2</sub> prijzen. Zo daalt de uniforme prijs in de ETS en NETS - als gevolg van de overvloed aan emissierechten ('hot air') in Rusland en de Oekraïne - tot 13 \$ per tCO<sub>2</sub> in 2020 en 44 \$ per tCO<sub>2</sub> in 2030 als de klimaatcoalitie uitgebreid wordt tot de Annex 1 landen. Bij verdere uitbreiding van de klimaatcoalitie naar Brazilië, China en India treedt vervolgens een stijging op naar 20 en 58 \$ per tCO<sub>2</sub> in respectievelijk 2020 en 2030.<sup>4</sup> De reden hiervoor is dat de beschikbare 'hot air' nu verdeeld moet worden over meer landen.

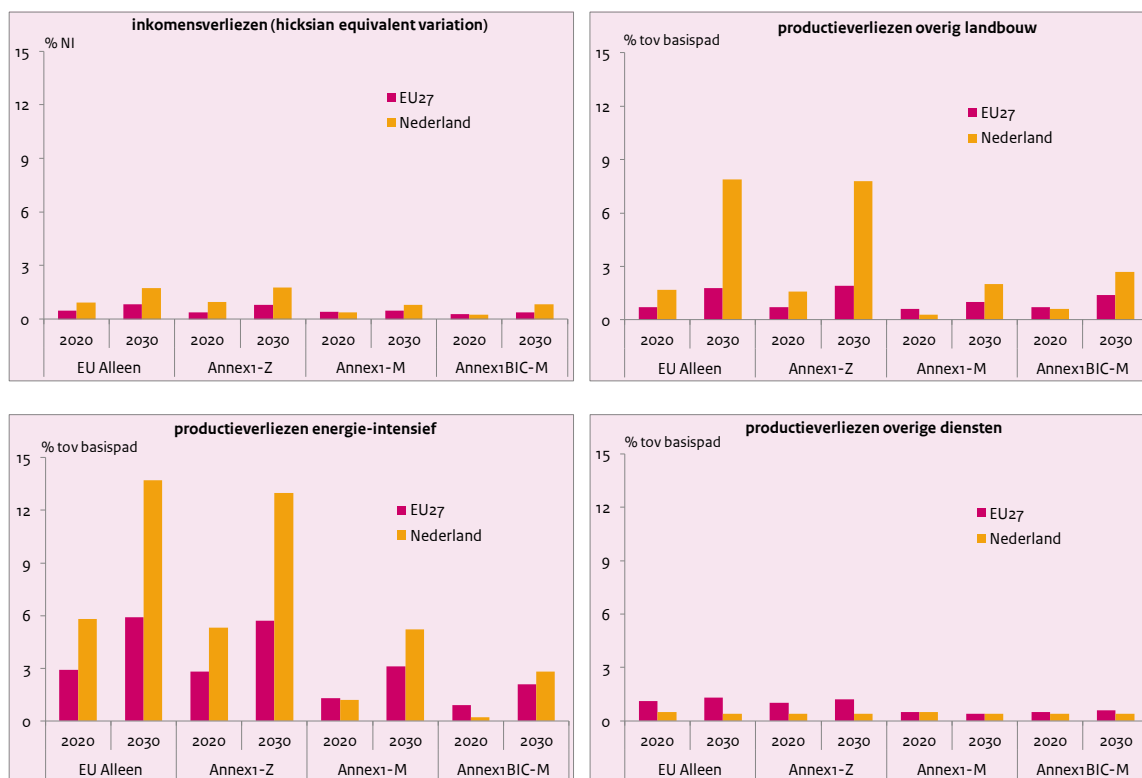
In het rechterpaneel van figuur 2.1 zijn de aan- en verkoop van emissierechten voor Nederland en de EU in verschillende varianten afgebeeld, waarbij de toewijzing van emissierechten aan de ETS en NETS markten bepaald zijn door de doelen van het Klimaat en Energie pakket van de EU met een uniform percentage aan te scherpen (zie tabel A.4 voor een overzicht van de doelen). De figuur laat zien dat Nederland onder het 'EU Alleen' scenario zowel in 2020 als 2030 een netto exporteur van emissierechten: de relatief hoge CO<sub>2</sub> prijzen in 2020 en 2030 leiden tot een daling van kolengestookt vermogen in de EU, waardoor het aandeel gasgestookt vermogen toeneemt. Als gevolg daarvan vloeit er minder gas naar Nederland, wat wordt opgevangen door het windvermogen in Nederland sterk uit te breiden. Dit resulteert in een daling van de CO<sub>2</sub> uitstoot in Nederland en een overschot van emissierechten. Bij uitbreiding van de emissiehandel naar de Annex 1 landen worden Nederland en de EU vanaf 2020 - als gevolg van de overvloed van rechten in de voormalige Sovjet Unie en Oekraïne - overigens beiden een netto importeur van emissierechten.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Deze prijs ligt beneden de 28-35 2004 US\$ / tCO<sub>2</sub> die later in sectie 3 gesimuleerd worden met het MERGE model. Dit komt omdat WorldScan met zijn sectordetail goedkopere structuurwijzigingen in de ontwikkelingsregio's kan simuleren, wat de koolstofprijs drukt.

<sup>5</sup> Uitgebreide informatie over de onderliggende emissies en doelen is te vinden in de tabellen A.4 en A.5.



**Figuur 2.2 Effecten op de welvaart in 2020 en 2030 als % van het nationaal inkomen (linksboven) en productieverliezen overig landbouw (rechtsboven), energie-intensief (linksonder), en overige diensten(rechtsonder) in verschillende varianten**



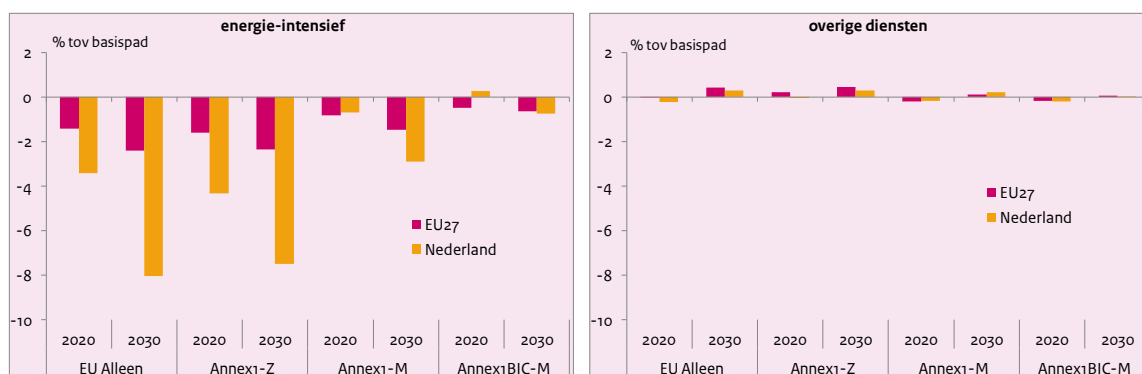
Figuur 2.2 (linksboven) laat de welvaartsverliezen van klimaatbeleid zien voor de EU27 en Nederland in zowel 2020 als 2030. Tevens worden sectorale productieverliezen geïllustreerd voor sector overige landbouw (rechtsboven) energie-intensief (linksonder), en de overige dienstensector (rechtsonder).<sup>6</sup> De welvaartsverliezen zijn gemeten ten opzichte van het inkomen van het relevante basispad en blijven in alle varianten beperkt tot maximaal 1,8% in Nederland en 1% in de EU. Uit figuur 2.2 blijkt dat de welvaartsverliezen in Nederland, als gevolg van de al bestaande belastingen op elektriciteit, gas en brandstof, in vrijwel alle scenario's en tijdstippen ongeveer twee keer zo hoog zijn als de welvaartsverliezen in de EU. Ofschoon de CO<sub>2</sub> prijs overal in de EU gelijk is, wordt het extra welvaartsverlies in Nederland veroorzaakt door de stapeling van CO<sub>2</sub> prijs op de bestaande energiebelastingen, die in Nederland relatief hoog zijn ten opzichte van het EU gemiddelde. Voor zover deze belastingen geen andere doelen dienen, zoals congestie en vermindering van luchtvervuiling (fijn stof), leiden ze tot een te grote daling van de energieconsumptie van huishoudens door het inzetten van dure bestrijdingsopties en daarmee tot een extra welvaartsverlies (bovenop het welvaartsverlies door klimaatbeleid). Dit extra welvaartsverlies kan worden beperkt door de bestaande energiebelastingen te verlagen met een bedrag dat overeenkomt met de CO<sub>2</sub> prijs. Hierdoor wordt een deel van de Nederlandse emissiereductie verschoven naar de andere EU landen, waardoor de energieconsumptie van huishoudens in Nederland niet disproportioneel wordt teruggedrongen. In de varianten met emissiehandel (Annex1-M, Annex1BIC-M) is de CO<sub>2</sub> prijs relatief laag, waardoor het extra inkomensverlies in Nederland beperkt blijft.

<sup>6</sup> Meer uitgebreide informatie is te vinden in tabel A6, A7 en A8.

Op sectoraal niveau laten de productieverliezen in EU (Nederland) grote verschillen zien. In 2030 lopen de productieverliezen in de EU in de varianten ‘EU Alleen’ en ‘Annex1-Z’ voor de energie-intensieve sector op tot ongeveer 6% ten opzichte van het basispad. Voor Nederland is dat 14%. Voor de meeste andere sectoren zijn de verliezen echter (veel) kleiner. De productieverliezen zijn iets kleiner als de andere Annex 1 landen ook beleid gaan voeren, omdat in dat geval ook de concurrentie te maken krijgt met klimaatbeleid. Coördinatie van klimaatbeleid, dat wil zeggen emissiehandel met landen buiten de EU, verlaagt de CO<sub>2</sub>-prijs, waardoor de productieverliezen in 2030 meer dan halveren. Dit onderstreept het belang van emissiehandel met landen buiten de EU zowel voor Nederland als voor de EU.

Figuur 2.3 laat voor de verschillende beleidsvarianten de werkgelegenheidseffecten zien voor twee ‘extreme’ sectoren in 2020 en 2030: energie-intensief (toegevoegde waarde aandeel ongeveer 10-15% binnen EU) en overige diensten (toegevoegde waarde aandeel ongeveer 60-70% binnen EU).<sup>7</sup> Wat opvalt is dat de werkgelegenheidseffecten van klimaatbeleid over het algemeen kleiner zijn dan de eerder vertoonde productieverliezen. Hoewel ze in eerste instantie groter zijn, beperkt de substitutie van de energie naar arbeid - via een daling van het inkomen - het uiteindelijke effect. Voor de energie-extensieve sector, waaronder de sector overige diensten, geldt dat het laatste effect dominant is: klimaatbeleid zorgt in die sector voor een groei van de werkgelegenheid. Merk op dat er sprake is van een substantiële verschuiving van werkgelegenheid tussen sectoren. Voor de economie als geheel zijn de werkgelegenheidseffecten overigens nihil.

**Figuur 2.3 Veranderingen in 2020 en 2030 op de werkgelegenheid in de energie-intensieve (links) en overige diensten (rechts) sector in verschillende varianten**



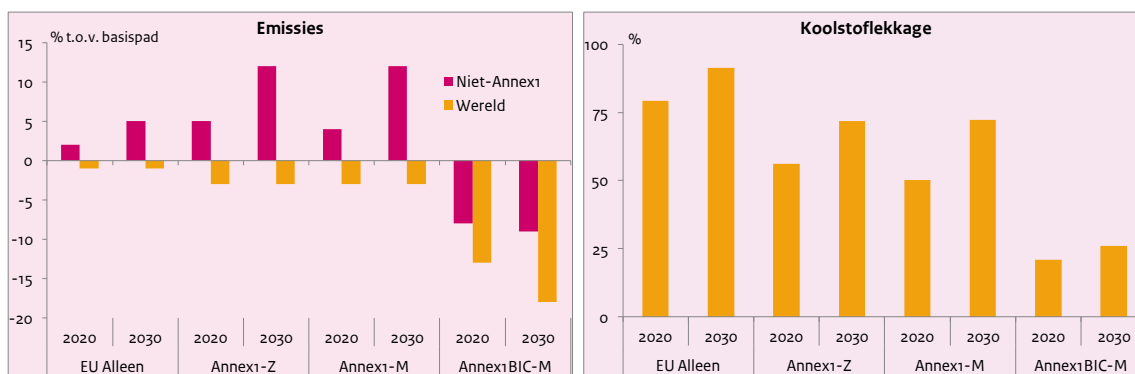
Figuur 2.4 (links) laat zien dat emissiereducties in de EU en Annex 1 landen nauwelijks effect hebben op mondiale emissies.<sup>8</sup> Zo dalen de mondiale emissies in de ‘EU Alleen’ variant met nog geen procent, terwijl ze onder de ‘Annex 1’ varianten met maximaal 3% dalen. Figuur 2.4 (rechts) laat zien dat deze beperkte dalingen te maken hebben met koolstoflekkage (‘carbon leakage’), die in sommige varianten oploopt tot wel 80% van de emissiereductie in de EU! Klimaatbeleid in de EU of de Annex 1 landen leidt weliswaar tot een daling van de emissies in die landen, maar ook - als gevolg van de lagere vraag naar olie en gas - tot een prijsdaling van fossiele brandstoffen. Hierdoor stijgt de energievraag en de daaraan verbonden emissies in de landen die niet in de klimaatcoalitie zitten (lekkage via de energieprijzen). Een tweede, minder belangrijke, reden waarom lekkage optreedt is dat een deel van de energie-intensieve productie zich verplaatst naar die regio’s waar geen beleid wordt gevoerd en dus naar regio’s waar de productiekosten lager zijn. De omvang van de koolstoflekkage komt voort uit de gespannen situatie op de oliemarkt (en de verwachting van de OECD dat er ook in de toekomst sprake zal zijn van een krappe oliemarkt). De spanning op de oliemarkt heeft namelijk als keerzijde dat de olieprijs sterk zal dalen als de EU of de Annex 1 landen klimaatbeleid gaan voeren. Die prijsdaling zorgt er vervolgens voor dat de vraag naar energie

<sup>7</sup> Tabellen A.9 en A.10 schetsen de werkgelegenheidseffecten voor alle sectoren in de EU en Nederland.

<sup>8</sup> Tabellen A.11 en A.12 rapporteren de belangrijkste welvaartsverliezen voor alle landen als ook de lekkagevoeten voor de productie van energie-intensieve sectoren.

buiten de EU of buiten de Annex 1 landen sterk zal stijgen, met als gevolg dat een belangrijk deel van het klimaatbeleid weglekt. Als gevolg van deze koolstoflekkage kan het 2-graden doel alleen gehaald worden als (vrijwel) alle landen klimaatbeleid gaan voeren, zoals geïllustreerd door de variant Annex1BIC-M.

**Figuur 2.4 Effecten op de mondiale emissies(links) en de koolstoflekkage (rechts) in 2020 en 2030 in verschillende varianten**



### 3 Technologiebeelden tot 2050

De Routekaart 2050 heeft als doel de uitstoot van CO<sub>2</sub> in de Europese Unie in 2050 met meer dan 80% te verlagen ten opzichte van 1990. Nieuwe, duurzame technologieën die vrijwel geen CO<sub>2</sub> meer uitstoten spelen daarbij een doorslaggevende rol in de zin dat zij de traditionele technologieën die gebruik maken van fossiele brandstoffen vrijwel volledig zullen verdringen. Voor de elektriciteitssector kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de uitfasering van traditionele technologieën, zoals kolen- en gascentrales, door een mix van schone technologieën, zoals wind, zonPV, zonthermisch, biomassa of kolen- en gascentrales met ‘Carbon Capture and Storage’ (CCS). Echter, op dit moment is de kostprijs van deze duurzame technologieën veel hoger dan de kostprijs van hun fossiele tegenhangers. Zo kost een MWh elektriciteit opgewekt door wind op dit moment \$ 65, terwijl deze maar liefst \$ 165 kost als de opwekking plaatsvindt met zonPV. Ter vergelijking: een MWh elektriciteit opgewekt met kolen kost ongeveer \$ 49.9

De verwachting is dat de kosten van de duurzame technologieën als gevolg van leereffecten in de toekomst echter sterk zullen dalen. Zo hanteert de IEA in haar World Energy Outlook 2010 een leereffect van maar liefst 17% voor zonPV: elke verdubbeling van de wereldwijde capaciteit leidt in dat geval tot een daling van de kosten van zonPV met 17%. De aanwezigheid van leereffecten leidt ertoe dat het aantrekkelijk kan zijn om nu te investeren in een relatief dure technologie als zonPV om zo in de toekomst te kunnen profiteren van lagere kosten. De aantrekkelijkheid van deze investeer-en-leer strategie is echter vanwege een aantal redenen onduidelijk. In de eerste plaats zijn de schattingen van de omvang van deze leereffecten met grote onzekerheid omgeven. Zo rapporteren Lindman en Söderholm (2011) op basis van een literatuuroverzicht voor windenergie een gemiddeld leereffect van 10%. De spreiding is met schattingen die uiteenlopen van -3% tot 33% echter enorm. In de tweede plaats is het relatieve belang van het kanaal waarlangs deze kostendalingen worden gerealiseerd, ‘Learning-by-Doing’ (LBD) of ‘Learning-by-Research’ (LBR), onduidelijk (Pizer en Popp, 2008), waarmee het ook onduidelijk is op welke strategie, LBD of LBR, het beleid in zou moeten zetten. In deze notitie nemen aan dat het leereffect uitsluitend via het LBD kanaal tot stand komt, waarmee we niet willen suggereren dat het LBR kanaal niet van belang

<sup>9</sup> Alle kosten en prijzen in paragraaf 3 en 4 zijn uitgedrukt in prijzen van het jaar 2000. Om prijzen en kosten uit te drukken in euro's van 2010 moeten de bedragen met 1,29 worden vermenigvuldigd. Voorbeeld: een kostprijs van \$ 49 in 2000 prijzen komt overeen met een kostprijs van 63,21 euro in 2010 prijzen.

zou zijn. Het totale leereffect blijft namelijk gelijk aan de leereffecten zoals die in de literatuur gerapporteerd worden (zie kader). Hoewel hiermee wel een getrouw beeld wordt verkregen van de relatie tussen enerzijds de omvang van de totale leereffecten en anderzijds de technologiebeelden, mogen uit de resultaten geen conclusies worden getrokken over het in te zetten instrumentarium om de leereffecten in de praktijk te effectueren. In paragraaf 4.3 komen we op de vraag naar het efficiënte instrumentarium terug. In de derde plaats kan ook de internationale beleidsomgeving van groot belang zijn op de technologiekeuze in de EU. Mocht het overgrote deel van de wereld bijvoorbeeld gaan leren in kolen CCS, dan is het de vraag of de EU voldoende massa heeft om zelfstandig de leercurve van bijvoorbeeld zonPV succesvol te doorlopen.

In deze paragraaf brengen we het effect van deze onzekerheden op de optimale investeringsstrategie van de Europese Unie en de samenstelling van het toekomstige productievermogen in de elektriciteitssector van de EU (hierna kortweg het technologiebeeld genoemd) in kaart met het MERGE model (zie kader voor een beschrijving van de belangrijkste kenmerken en aannames van het MERGE model). Daartoe contrasteren we het technologiebeeld onder twee wereldwijde emissiescenario's: het 'Global Action' (GA) scenario waar de wereldwijde emissies in 2050 ongeveer 51% onder het emissieniveau van 1990 liggen en het 'Fragmented Action' (FA) scenario waar de emissies in 2050 ongeveer 10% onder het emissieniveau van 1990 liggen. In beide scenario's gaan we er vanuit dat de EU de Routekaart 2050 volledig uitvoert, zodat eventuele verschillen in technologiebeelden niet samenhangen met het al dan niet uitvoeren van de Routekaart 2050.

## Aannames MERGE model t.av. energietechnieken

- Er is sprake van endogeen leren, wat wil zeggen dat de kosten van een technologie worden beïnvloed door de cumulatieve inzet van die technologie.
- Leereffecten representeren zowel 'Learning-by-Doing' als 'Learning-by-Research' en zijn conform de WEO 2010. Een verdubbeling van de wereldwijde capaciteit leidt bij zonPV tot een daling van de kosten met 15%, bij zonthermisch met opslag met 10%, bij overig duurzaam inclusief CCS met 3% en bij fossiel met 2%. In tegenstelling tot de WEO 2010 lopen onze berekeningen echter tot 2100, waardoor de mogelijkheid ontstaat dat de kosten voor een technologie op de zeer lange termijn naar nul gaan. Om dit te voorkomen is er een vloer voor de kosten geïntroduceerd. Deze vloer heeft geen effect gehad op de technologiekeuze.
- Alle resultaten zijn voor de EU als geheel.
- De kosten van de elektriciteitsproductie zijn gekalibreerd op de World Energy Outlook 2010 van de International Energy Agency en Annual Energy Outlook 2011 van de Energy Information Administration. Bij wind, zonPV is rekening gehouden met kosten voor transport en eventuele netwerkaanpassingen (\$10 per MWh). Bij zonthermisch met opslag is rekening gehouden met transport uit de Sahara vanuit Zuid Tunesie (\$19.7 per MWh).
- Kolen CCS en gas CCS produceren een restemissie van 10%.
- Fluctuerend vermogen (wind en zon-PV):
  - Onbalans: voor elke GW geïnstalleerde capaciteit wind en zonPV moet 0,24 GW onbalansvermogen aanwezig zijn. Dit kan zowel hydro, gas of gas CCS zijn. De betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening ligt dan tussen de 99% en 99,9% (Heide et al., 2011).
  - Vereiste overcapaciteit fluctuerend vermogen is gebaseerd op Heide et al. (2010, 2011) en is gelijk aan:  $1/2 * (\text{fractie wind} + \text{fractie zonPV})^2$ . De maximale overcapaciteit is daarmee gelijk aan 50%. Deze vereiste heeft overigens nauwelijks effect op de uitkomsten, omdat de fractie van wind en zonPV beperkt blijft.
  - Wind = wind op land. Wind op zee is niet gemodelleerd.
- Opslagcapaciteit CCS: onbeperkt. In de praktijk geeft deze aanname geen probleem. Europipe (2010) schat de maximaal beschikbare opslagcapaciteit bijvoorbeeld op 300 Gt CO<sub>2</sub>. Ter vergelijking: de in de MERGE simulaties opgeslagen hoeveelheid CO<sub>2</sub> varieert tussen de 21 en 88 Gt.
- Uitputting: olie, gas en uranium. De prijzen van olie, gas en uranium worden endogeen in het MERGE model bepaald en zijn dus afhankelijk van het verbruik. Kolen zijn onbeperkt voorradig. In de berekeningen is dan ook rekening gehouden met eventuele welvaartswinsten als gevolg van prijsdalingen van fossiele brandstoffen.
- Personenvervoer kan plaatsvinden met behulp van de auto met verbrandingsmotor, de plug-in hybride, de elektrische auto, de CNG auto en de waterstof auto. Deze vorm van energiebesparing is daarmee expliciet gemodelleerd.
- Zwaar transport kan plaatsvinden met behulp van verbrandingsmotoren of een niet nader gespecificeerde backstop technologie.
- Overige energiebesparing inclusief de mogelijke opkomst van de warmtepomp is gemodelleerd via de vraagfunctie (hogere prijs leidt tot lager verbruik).
- Vloeibare brandstoffen kunnen worden gemaakt uit olie, biomassa en kolen.
- De volgende broeikasgassen zijn gemodelleerd: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O
- De cumulatieve CO<sub>2</sub> emissies van alle bronnen zijn onder 'global action' beperkt tot 1437 Gt CO<sub>2</sub>. Onder deze limiet is de kans dat het 2-graden doel wordt bereikt 50% (Meinshausen et al., 2009). Onder 'fragmented action' zijn de cumulatieve emissies van alle bronnen beperkt tot 1654 Gt CO<sub>2</sub>. In beide scenario's is verondersteld dat de cumulatieve emissies in de EU tot 2050 in lijn zijn met de Europese Routekaart 2050.
- De gehanteerde temporele resolutie is 10 jaar (2000, 2010, 2020, 2030, etc.)

## Wat niet in MERGE is meegenomen:

- Vanwege de beperkt beschikbare tijd voor deze studie zijn de volgende punten niet meegenomen in de analyse:
  - Biomassa met CCS;
  - Wind op zee.
  - Refit van kolen- en gascentrales met CCS;
  - Endogene leereffecten buiten de elektriciteitssector;
  - Expliciete modellering van energiebesparende opties met uitzondering van transport.

### 3.1 Het 'global action' scenario

Onder het GA scenario worden de cumulatieve, wereldwijde CO<sub>2</sub> emissies zodanig beperkt dat de kans dat het 2-graden doel gehaald wordt ongeveer 50% is (Meinshausen, 2009). Figuur 3.1 illustreert het bijbehorende technologiebeeld in de EU en de wereld als alle technologieën een 'best guess' leereffect laten zien. Opvallend is dat bestaande kolen- en gasgestookte centrales in de EU zo snel als mogelijk vervangen worden door een mix van wind, zonPV, biomassa en gas CCS met als gevolg dat er na 2030 geen fossiel gestookte centrales meer in bedrijf zijn.<sup>10</sup> De snelle afbouw van fossiel gestookte centrales wordt gedreven door de beperkte emissieruimte van de Routekaart 2050. Wat verder opvalt, is dat gas CCS in de EU vanaf 2030 wordt afgebouwd. De reden hiervoor is dat de gasvraag buiten de EU na 2030 toeneemt, om zo wind en zonPV in te kunnen passen in het elektriciteitsnetwerk. Met hydro vormen gas en gas CCS namelijk de flexibele schil om wind en zonPV: per GW geïnstalleerde capaciteit van wind en zonPV moet er namelijk 0,24 GW onbalansvermogen (hydro, gas of gas CCS) beschikbaar zijn om zo de fluctuaties in het aanbod van wind en zonPV op te kunnen vangen.<sup>11</sup>

De - op termijn - beperkte beschikbaarheid van gas of gas CCS leidt ertoe dat het lange termijn potentieel voor wind en zonPV in zowel de EU als de rest van de wereld beperkt is en bepaald wordt door het beschikbare hydro vermogen. Alleen als er een goede en goedkope alternatieve oplossing komt om het fluctuerende karakter van wind en zonPV te ondervangen, is een hoge penetratie van wind en zonPV denkbaar. Het knelpunt voor een vergaande penetratie van wind en zonPV is overigens niet zozeer de onbalanseis, maar de uitputting van gas in de EU. Zo leveren zowel een verlaging van de onbalanseis<sup>12</sup> als 20% grotere gasreserves<sup>13</sup> geen ander lange termijnperspectief voor wind en zonPV op. De reden waarom grotere gasreserves niet leiden tot een sterke verbetering van het lange termijn perspectief van wind en

<sup>10</sup> PBL (2011) raamt de totale hoeveelheid beschikbare biomassa voor energiedoelinden op 150-400 EJ. In het hier besproken GA scenario wordt in 2100 ruim 100 EJ aan biomassa ingezet voor elektriciteitsopwekking en 47 EJ voor personenvervoer. De eventuele inzet van biomassa voor zwaar transport is echter niet expliciet gemodelleerd. In het MERGE model kan de totale vraag naar biomassa voor energiedoelinden daarmee (veel) groter zijn dan het beschikbare aanbod. Een van de manieren om binnen de 150 EJ te blijven is door geen biomassa in te zetten in de elektriciteitsopwekking. Daarmee treedt in het MERGE model een verschuiving op naar zonthermisch met opslag die wereldwijd vooral ten koste van gaat biomassa en de 4e generatie nucleair. Voor de EU gaat de verschuiving naar zonthermisch met opslag ook ten koste van kolen CCS.

<sup>11</sup> In de afgelopen decennia is veel aandacht besteed aan meer flexibel maken van kolen en nucleaire centrales. Daarmee rijst de vraag of deze centrales ook niet ingezet zouden kunnen worden als onderdeel van de flexibele schil om wind en zonPV. Flexibiliteit heeft echter zowel een technische (de centrale moet het kunnen) als een economische component (het moet een goedkope optie zijn). Op dit laatste criterium scoren kolen en nucleaire centrale gezien hun hoge investeringskosten echter slecht. Volgens de WEO 2010 zijn de investeringskosten van een nucleaire of kolencentrale met CCS tot 2,5 keer zo hoog als die van een gascentrale met CCS. Dat maakt dat deze centrales vooral aantrekkelijk zijn als basislust, met als gevolg dat ze geen opwaartse flexibiliteit meer kunnen leveren.

<sup>12</sup> In een gevoeligheidsanalyse hebben we het vereiste onbalansvermogen per GW geïnstalleerde capaciteit wind en zonPV verlaagd van 0,24 naar 0,202 GW. De geïnstalleerde hoeveelheid wind en zonPV in de EU neemt in 2050 als gevolg hiervan met ongeveer 13% toe. Maar ook met de verlaagde eis voor onbalansvermogen piekt de geïnstalleerde capaciteit wind en zonPV in 2040. In 2100 is de geïnstalleerde capaciteit wind en zonPV al weer met 46% gedaald ten opzichte van dat maximum.

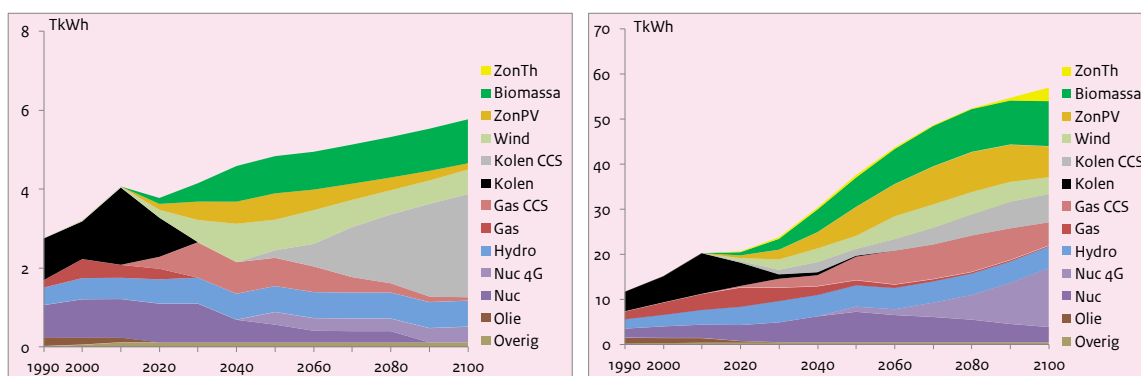
<sup>13</sup> In deze gevoeligheidsanalyse stijgt de geïnstalleerde capaciteit van zonPV met 17% in 2100, terwijl die van wind met 4% daalt. Hoewel het lange termijn perspectief van wind en zonPV dus licht verbetert, treedt er - als gevolg van meer leren bij zonPV - ook een verdringing van wind op ten gunste van zonPV.

zonnepv in de EU is dat de EU er niet in slaagt om gas te importeren (alhoewel dat wel mogelijk is). De kosten van het gastransport zijn namelijk dusdanig, dat het voor de EU goedkoper is om andere mitigatie-opties in te zetten, zoals kolen CCS of zonthermisch met opslag.<sup>14</sup>

Figuur 3.1 laat verder zien dat er vanaf 2010 in gas CCS wordt geïnvesteerd, terwijl er pas vanaf 2040 in kolen CCS wordt geïnvesteerd. Dit is op het eerste gezicht opmerkelijk, omdat de kosten van kolen CCS lager zijn dan de kosten van gas CCS. Een deel van de meerkosten van gas CCS wordt echter terugverdiend vanuit de onbalanstaken van gas CCS. Verder speelt het leereffect een rol: omdat gas CCS onbalanstaken vervuld, is het aantrekkelijk om vroegtijdig te investeren in gas CCS om zo de kosten ervan omlaag te brengen.

Tot slot blijkt uit figuur 3.1 dat de afname van gas CCS wordt in de EU opgevangen door de capaciteit van biomassa, wind en zonnepv uit te breiden. Vanaf 2040 komen daar kolen CCS en de 4e generatie nucleair bij.<sup>15</sup> Merk op dat bij deze berekeningen vanwege de politieke situatie ten aanzien van kernenergie in de EU - maar niet in Nederland - is verondersteld dat de toekomstige capaciteit van conventionele nucleaire energie in de EU de huidige niet mag overtreffen.

**Figuur 3.1 Opwekking elektriciteit onder het GA scenario in de EU (links) en de wereld (rechts)**



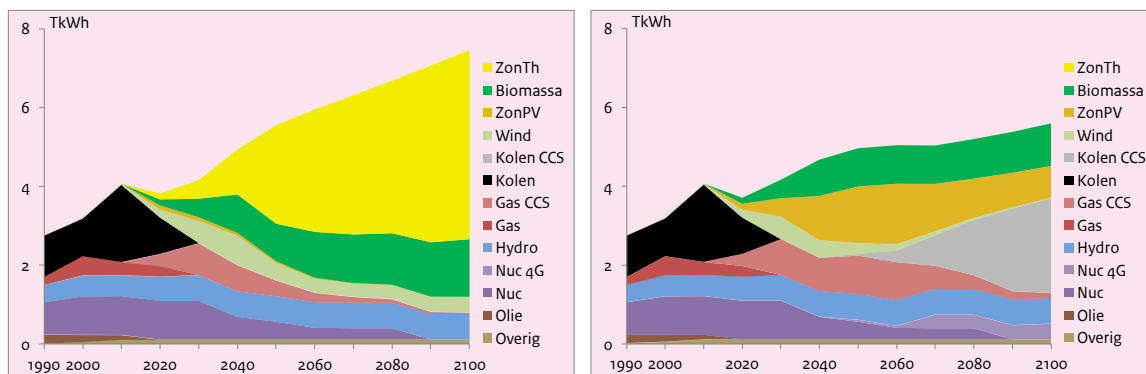
Figuur 3.2 (links) geeft het scenario weer waarin zonthermisch met opslag een leereffect heeft dat 50% groter, terwijl alle andere technologieën juist een leereffect hebben dat 50% lager is (links). Duidelijk is te zien dat zonthermisch rond het einde van deze eeuw bijna 2/3 van de elektriciteitsvoorziening voor zijn rekening neemt. De kosten voor zonthermisch met opslag in 2100 zijn in dat geval met bijna 65% gedaald ten opzichte van de kosten in 2010. Figuur 3.2 (rechts) laat het scenario zien waarin zonPV juist een 50% hoger leereffect heeft, terwijl de andere technologieën een 50% lager leereffect hebben. Hoewel de kosten met zonPV in 2100 in dat geval met bijna 74% gedaald zijn ten opzichte van 2010, leidt dit niet - in tegenstelling tot de grafiek voor zonthermisch - tot een dominantie van zonPV. De reden hiervoor is wederom de uitputting van gas. Wel is duidelijk te zien dat zonPV vooral wind verdringt.

Tot slot, zo laat een vergelijking van figuur 3.1 (links) en 3.2 (links) zien, loont energiebesparing vooral als de energieprijzen hoog is (en veel minder als deze laag is). Zo leidt een overvloed van goedkope zonthermische energie met opslag bijvoorbeeld tot een forse daling van de elektriciteitsprijzen en daarmee tot een toename van het elektriciteitsverbruik in 2100 van maar liefst 31%.

<sup>14</sup> We hebben niet gekeken groen gas als brandstof voor gascentrales met CCS. Hoewel deze optie het voordeel heeft dat het gas direct in de EU beschikbaar komt, moet de toepassing in gascentrales met CCS concurreren met andere toepassingen, zoals autorijden, verwarming, etc. Het is daarmee niet zeker dat het economisch efficiënt is om groen gas als brandstof voor gascentrales met CCS in te zetten, te meer daar er een relatief goede backstop voor wind en zonnepv, namelijk kolen CCS, beschikbaar is.

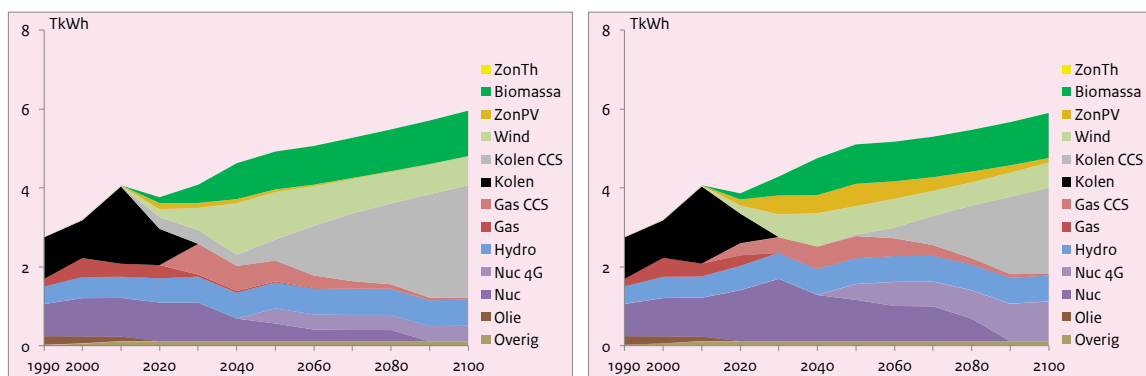
<sup>15</sup> Uit de afwezigheid van kolengestookt vermogen (al dan niet met CCS) tussen 2020 en 2040, mag niet zondermeer de conclusie worden verbonden dat er vanaf 2020 niet meer in kolengestookt vermogen geïnvesteerd zal worden. In onze analyses konden we namelijk geen rekening houden met de mogelijkheid van een retrofit. Bovendien is de uiteindelijke penetratie van kolen CCS erg afhankelijk van de omvang van de leereffecten.

**Figuur 3.2 Invloed groot leereffect zonthermisch met opslag (links) en zonPV (rechts) in de EU**



Tot slot geeft figuur 3.3 (links) het technologiebeeld in de EU weer als er sprake is van een groter leereffect voor kolen CCS, wind en biomassa. Ten opzichte van figuur 3.1 (links) is duidelijk te zien dat de rol van kolen CCS en wind toenemen. Dit gaat vooral ten koste van zonPV. Figuur 3.3 (rechts) laat de situatie zien als de EU de beperking op nucleair vermogen los laat en het leereffect van de 4e generatie nucleair vermogen groter is (geen 3% maar 15% bij elke verdubbeling van de wereldwijde capaciteit). Zoals mag worden verwacht, neemt het aandeel nucleair in de EU fors toe. Dit gaat in eerste instantie vooral ten koste van kolen centrales zonder CCS, terwijl het vanaf 2030 vooral ten koste gaat van gas CCS. De uitbreiding van het nucleaire vermogen in de EU leidt tot een versnelde uitputting van de wereldwijde uranium voorraden. Samen met het grotere leereffect leidt dit tot een snellere introductie van de 4e generatie nucleair vermogen.

**Figuur 3.3 Invloed groot leereffect kolen CCS en wind (links) en nuc 4G (rechts)**



## 3.2 Het 'fragmented action' scenario

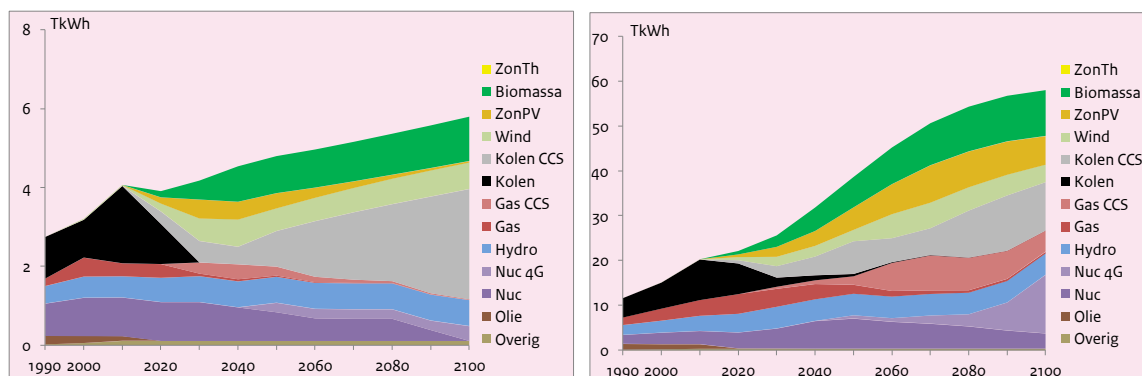
Om de invloed van de internationale beleidsomgeving op het technologiebeeld in kaart te brengen kijken we naar het FA scenario, waarin internationaal klimaatbeleid - in vergelijking met het GA scenario - moeizamer van de grond komt. Zo dalen de wereldwijde emissies in 2050 met slechts 10% onder het FA scenario, terwijl ze met maar liefst 51% dalen onder het GA scenario (beide ten opzichte van emissieniveau in 1990). Door de hogere emissies van het FA scenario is dat de kans dat dan de 2-graden doelstelling wordt gehaald lager dan 50%.

Figuur 3.4 illustreert het technologiebeeld in de EU onder het FA scenario. Wat opvalt, is de veel grotere rol van kolen CCS. De reden voor de grotere rol van kolen CCS in het FA scenario is dat - in tegenstelling tot



het GA scenario - op de lange termijn voldoende ruimte is voor de restemissies van kolen CCS. Hierdoor vervalt wereldwijd de reden om het leerproces voor zonthermisch met opslag op gang te brengen.<sup>16</sup> De EU kan dit met de Routekaart 2050 niet veranderen, omdat zij niet voldoende gewicht heeft om sturing te geven aan de wereldwijde richting van de technologische verandering. Het gebrek aan kritische massa in de EU kan beter worden begrepen als we beseffen dat de elektriciteitsproductie in de EU in 2050 nog maar 15% van de wereldwijde elektriciteitsproductie is. In 2100 is het zelfs nog maar 10%! Ter vergelijking: in 2000 was het aandeel van de EU in de wereldwijde elektriciteitsproductie nog ruim 21%. Het vergroten van de capaciteit in de EU kan om die reden maar een beperkte bijdrage leveren aan het telkens opnieuw verdubbelen van de wereldwijde capaciteit.<sup>17</sup> Dat geldt des te meer als de EU stringenter klimaatbeleid voert dan de wereld. Tot slot moet worden opgemerkt dat in 2020 de grotere rol van kolen CCS vooral ten koste gaat van gas CCS, en later ook van wind en zon PV.

**Figuur 3.4 Opwekking elektriciteit onder FA in de EU (links) en de wereld (rechts)**



### 3.3 Gevoeligheidsanalyses

Om een beter beeld te krijgen van de relatie tussen leereffecten enerzijds en technologiebeelden anderzijds hebben we een zogenaamde Monte Carlo analyse op de leereffecten uitgevoerd. Ter herinnering: de IEA hanteert een leereffect van 17% voor zonPV, d.w.z. elke verdubbeling van de capaciteit leidt tot een daling van de kosten van zonPV met 17%. Naast deze 'best guess' leereffecten is ook gerekend met leereffecten die een kwart of de helft hoger of lager zijn. Voor zonthermisch met opslag betekent dit bijvoorbeeld dat niet alleen gekeken is naar verwachte leereffect van 10%, maar ook naar de leereffecten van 5%, 7,5%, 12,5% en 15%. Naast het leereffect van zonthermisch met opslag zijn ook de leereffecten van zonPV en de overige technologieën (wind, biomassa, nucleair en 4e generatie nucleair, gas CCS en kolen CCS) gevarieerd. Deze Monte Carlo analyse levert 5x5x5=125 simulaties op. Uit deze simulaties komt het volgende beeld naar voren:

- Wind en biomassa worden in alle onderzochte gevallen in substantiële hoeveelheden in gezet.

<sup>16</sup> Dat het leereffect voor technologieën als zonthermisch met opslag en zonPV wereldwijd van karakter is, komt door een combinatie van een aantal unieke factoren. Zo toont recent onderzoek aan dat de technologische ontwikkeling van bijvoorbeeld zonPV vooral voortbouwt op eerdere innovaties op het gebied van zonPV (zie bijvoorbeeld Noailly en Smeets, 2011; Lanzi en Sue-Wing, 2010; Aghion et al., 2010). De maatschappelijke waarde van die eerdere innovaties zit hem daarmee vooral in het feit dat anderen gebruik kunnen maken van de ontwikkelde kennis om zonPV op die manier verder door te ontwikkelen, en niet zozeer in het feit dat er een grote markt is voor de huidige innovaties. Dit wordt ondersteund door de hier gepresenteerde resultaten, die laten zien dat het vele tientallen jaren kan duren voordat een technologie volwassen is. Omdat deze termijn veel langer is, dan de patentduur - en omdat er om patenten heen gepatenteerd kan worden - zijn de huidige innovaties voor marktpartijen niet winstgevend, terwijl ze juist wel nodig zijn om toekomstige innovaties mogelijk te maken.

<sup>17</sup> Deze conclusie lijkt, maar is niet, strijdig met de eerder getrokken conclusie dat er sprake kan zijn van lekkagevoeten van wel 80%. Lekkagevoeten zijn namelijk verbonden aan de huidige energievraag (tussen 2010 en 2030), terwijl het gebrek aan kritieke massa te maken heeft met de energievraag in de verre toekomst (tussen 2050 en 2100).

- Zonder een politieke ban op conventionele nucleaire elektriciteitscentrales neemt het aandeel nucleair in de EU toe tot 36% in 2030 om daarna op een iets lager niveau (25%) min of meer te stabiliseren.
- Zonder een goede en goedkope oplossing om fluctuerende bronnen, zoals wind en zonPV, in te passen in het elektriciteitsnetwerk lijkt het potentieel voor deze technologieën beperkt te zijn. Na 2060 komt de bodem van de wereldwijde gasvoorraden namelijk in zicht, terwijl tegelijkertijd de vraag naar gas in andere regio's onverminderd sterk blijft, als gevolg van de lokale inpassing van wind en zonPV.
- Bij goede en goedkope oplossingen om fluctuerende bronnen in te passen in het netwerk kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de opslag van waterstof in grotten, batterijen, de productie van groen gas ten behoeve van gascentrales of demand side management met slimme netten. Merk op dat een oplossing pas 'goedkoop' als het de concurrentieslag aan kan met een techniek als kolen CCS, nucleair of zonthermisch (CSP) met opslag. Bovendien moet een oplossing 'beschikbaar' zijn in de zin dat er geen concurrerende toepassingen met een hoger maatschappelijk rendement zijn. Voor het gebruik van groen gas in elektriciteitscentrales betekent dit bijvoorbeeld dat groen gas niet ingezet kan worden voor autorijden of warmte.
- Zonder een goede en goedkope oplossing om fluctuerende bronnen in te passen in het netwerk lijkt het potentieel voor een techniek als wind op zee in de EU beperkt. Wind op zee is immers duurder dan wind op land en komt daarmee pas in beeld als wind op land onvoldoende van de grond komt.
- Afhankelijk van de hoogte van de leereffecten is het ofwel kolen CCS ofwel zonthermisch met opslag dat na 2050 een dominante rol krijgt in de elektriciteitsopwekking. Vanwege de leereffecten wordt daarop vaak al voor 2050 voorgesorteerd.
- De EU is te klein om zelfstandig sturing te geven aan de richting van de technologische verandering, omdat zij in 2050 nog maar 15% van de wereldwijde elektriciteitsproductie voor haar rekening neemt (in 2100 is dat percentage zelfs gedaald naar 10%). Als gevolg hiervan is het klimaatbeleid buiten de EU van groot belang voor de optimale technologiekeuze in de EU: uit onze analyses kwam naar voren dat naarmate het wereldwijde klimaatbeleid minder streng is, de kans dat kolen CCS op termijn de dominante optie wordt, toeneemt.
- De mate waarin energiebesparing wordt toegepast, is sterk afhankelijk van de huidige en toekomstige prijs van energie, waaronder de elektriciteitsprijs. Onze analyses laten zien dat een sterke daling van de elektriciteitsprijzen, bijvoorbeeld als gevolg van hoge leereffecten bij zonthermisch met opslag, tot een toename van de elektriciteitsvraag kan leiden met 31%.

### 3.4 Efficiëntie van de Europese Routekaart

Onder de Routekaart worden de emissies in de Europese Unie in de periode 2010 tot 2050 beperkt tot 29,3 Gt CO<sub>2</sub>-equivalenten. Deze beperking is in overeenstemming met het 2-graden doel. Daarbij wordt een lineair dalend reductiepad voorgesteld: -20% in 2020, -40% in 2030, -60% in 2040 en -80% in 2050. Ten aanzien van de Europese Routekaart kunnen de volgende twee vragen worden gesteld:

- 1) Is de beperking op de cumulatieve emissies in de EU efficiënt? Dat wil zeggen, is het niet mogelijk een hogere welvaart te bereiken door de emissiereductie te verplaatsen van of naar de EU?
- 2) Is het pad waar de Europese Routekaart voor kiest efficiënt? Dat wil zeggen, is het onmogelijk een hogere welvaart te bereiken door eerst minder en later meer aan emissiereductie te doen in de EU?

Volgens onze analyse is de Europese Routekaart 2050 een efficiënte strategie is onder het 'global action' (GA) scenario in de zin dat de cumulatieve emissies onder de Routekaart nagenoeg gelijk zijn aan de

efficiënte cumulatieve uitstoot van de EU over die periode.<sup>18</sup> De reden hiervan is dat er onder het GA scenario maar een zeer beperkte spelruimte is om tot een ander emissiepatroon te komen. Terwijl de emissies aan de ‘bovenkant’ worden ingeperkt door de Europese Routekaart 2050, worden ze aan de ‘onderkant’ ingeperkt door de emissies van bestaande gas- en kolencentrales (het is economisch gezien namelijk zeer inefficiënt is om bestaande centrales vroegtijdig uit bedrijf te nemen). Eenzelfde conclusie kan echter niet worden getrokken onder het ‘Fragmented action’ (FA) scenario. Onder dit scenario ligt het efficiënte niveau van de cumulatieve EU emissies namelijk ruim 15% hoger dan de cumulatieve emissies onder de Europese Routekaart 2050.

Verder lijkt ook het reductietempo uit de Europese Routekaart 2050 efficiënt te zijn. Daarbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat wij - gezien de beperkt beschikbare onderzoekstijd - geen rekening hebben kunnen houden met retrofit van nieuw te bouwen kolen- en gascentrales noch met de mogelijkheid van biomassa met CCS.<sup>19</sup> Dit zou het optimale reductietempo kunnen beïnvloeden.

## 4 Beleidsinspanning

Een van de conclusies in de vorige paragraaf was dat leereffecten van grote invloed zijn op het EU technologiebeeld in 2050. Zo leidt een verhoging van het leereffect van zonthermisch met opslag van 10% naar 15% dat het aandeel van zonthermisch met opslag in de elektriciteitsopwekking in 2100 groeit van nul tot bijna twee derde. Maar wat betekent dit voor het te voeren klimaatbeleid? Hoewel dit type cijfers bruikbaar is om inzicht te krijgen in de relatie tussen de omvang van de leereffecten en het bijbehorende technologiebeeld, is het veel minder goed bruikbaar als basis voor klimaatbeleid. Immers, zodra bekend is dat het leereffect van zonthermisch groot of klein is, kan beleid daarop voorsorteren. Maar zolang slechts bekend is dat het leereffect of groot of klein zal zijn, moet klimaatbeleid altijd rekening houden met beide mogelijkheden. In deze paragraaf gaan we daarom in op de vraag hoe gevoelig de additionele beleidsinspanning is voor variaties in de leereffecten van 25 of 50% hoger of lager (zie paragraaf 3.3 voor een uitgebreider overzicht van de uitgevoerde Monte Carlo analyse). Met additionele beleidsinspanning wordt hier een combinatie van alle verschillende instrumenten, behalve de CO<sub>2</sub> prijs, bedoeld. Daarbij valt bijvoorbeeld te denken aan investerings- en R&D subsidies, prijsvragen en standaarden. Omdat we geen helder inzicht hebben in het relatieve belang van LBD en LBR noch in de efficiënte stimulering van innovatie spreken we in deze paragraaf echter consequent over het (meer omslachtig klinkende) additionele beleidsinspanning. We laten zien op welke wijze zowel de additionele beleidsinspanning voor specifieke technologieën als de benodigde budgetten in de EU afhangen van de onzekerheid met betrekking tot de leereffecten. Vervolgens gaan we in op de vraag wat hiervan de beleidsimplicaties zijn, vooral m.b.t. de eerder gedane constatering dat de leereffecten voor een deel zijn opgebouwd uit LBD en voor een deel uit LBR.

### 4.1 Beleidsinspanning zonthermisch en zonPV

Figuur 4.1 laat zien hoe de additionele beleidsinspanning voor zonthermisch met opslag en zonPV in de EU in 2020 varieert als gevolg van veranderingen in leereffecten onder het GA scenario. Figuur 4.2 laat

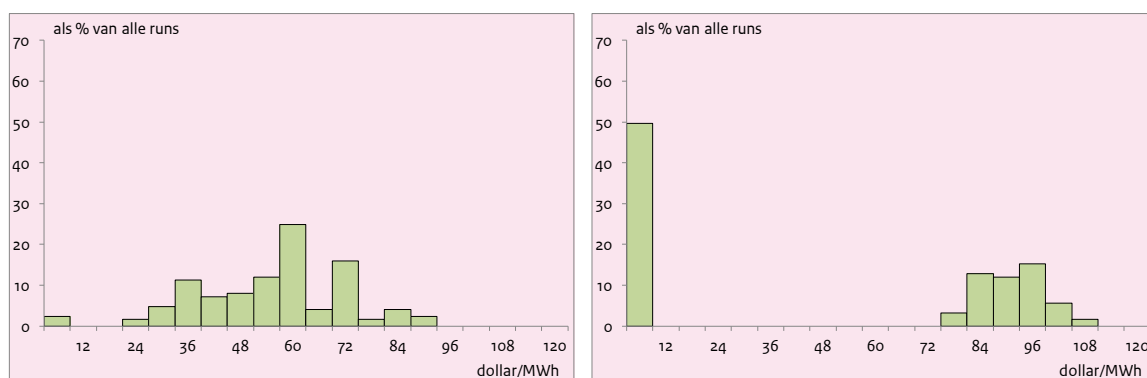
---

<sup>18</sup> De efficiënte cumulatieve uitstoot van de EU in de periode 2010 tot 2050 is met behulp van het MERGE model berekend door de beperkingen die de Routekaart oplegt te laten vervallen en de cumulatieve uitstoot van de EU onder het GA scenario te bepalen.

<sup>19</sup> Een andere reden waarom het efficiënte tijdpad slechts met beperkte precisie kan worden vastgesteld, is dat we hebben gewerkt met een tijdsinterval van 10 jaar (2010, 2020, 2030, etc.).

dezelfde grafieken zien voor het FA scenario.<sup>20</sup> Beide grafieken zijn histogrammen: op de x-as van deze grafieken staat de additionele beleidsinspanning in dollars per MWh, terwijl op de y-as het aantal runs staat als percentage van de in totaal 125 uitgevoerde runs. Zo kan uit linkerfiguur van 4.1 bijvoorbeeld worden afgelezen dat in 24% van de gevallen de additionele beleidsinspanning voor zonPV \$ 60 is. Uit de figuren 4.1 en 4.2 valt op te maken dat de additionele beleidsinspanning voor zonPV in 2020 in zowel het GA als het FA scenario erg afhankelijk is van de omvang van de leereffecten en varieert tussen de \$ 0 en \$ 92 per MWh. De additionele beleidsondersteuning voor zonthermisch met opslag in 2020 laat een duidelijke tweedeling zien. In iets meer dan de helft van de gevallen is additionele beleidsondersteuning voor deze technologie niet wenselijk, terwijl in de overige gevallen de additionele beleidsondersteuning varieert tussen de \$ 76 en \$ 108 per MWh. Verder laat een vergelijking van figuur 4.1 en 4.2 zien dat de additionele beleidsondersteuning voor zowel zonPV als zonthermisch met opslag in het FA lager is dan in het GA scenario.

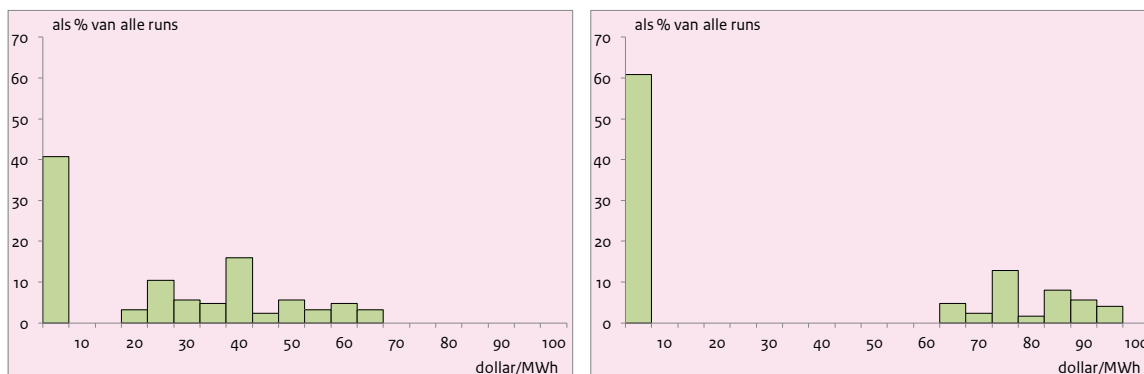
**Figuur 4.1 Beleidsinspanning zonPV (links) en zonthermisch met opslag (rechts) in 2020 onder GA**



Merk overigens op dat een lagere, maar positieve, additionele beleidsinspanning in 2020 betekent dat de leercurve in 2020 al verder doorlopen is. De kosten zijn dan namelijk al behoorlijk gedaald ten opzichte van het niveau in 2010.

<sup>20</sup> Deze beleidsinspanning is berekend door voor deze twee technologieën de meerkosten ten opzichte van de duurst ingezette technologie in 2020 te bepalen. De duurst ingezette technologie is daarbij gedefinieerd als een 'backstop' technologie: deze moet in vrijwel onbeperkte mate bijgebouwd kunnen worden. De CO<sub>2</sub> prijs moet zodanig zijn dat marktpartijen een prikkel hebben om deze duurst ingezette technologie daadwerkelijk te bouwen. In principe komen drie technologieën in aanmerking om als duurst ingezette technologie te fungeren: wind, biomassa en kolen CCS. De gemiddelde CO<sub>2</sub> prijs in het GA en FA scenario bedraagt respectievelijk \$ 38 en \$ 46 per ton CO<sub>2</sub>. In appendix B is de gevolgde berekeningwijze grafisch toegelicht.

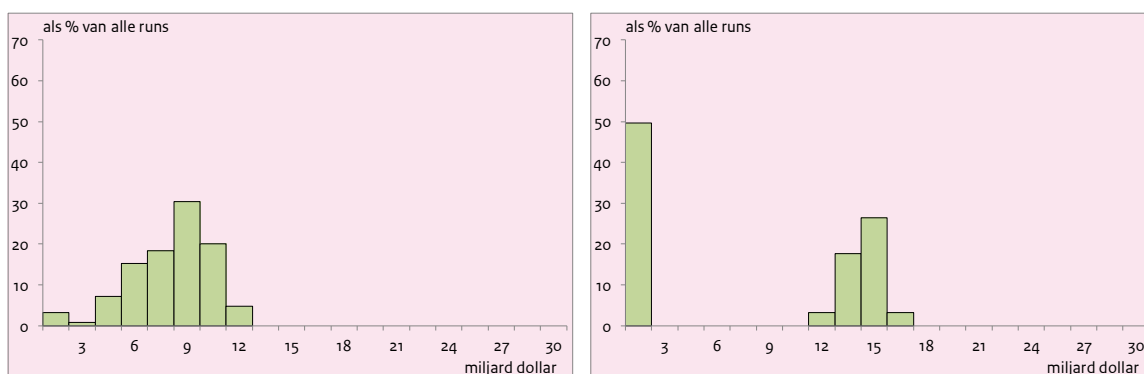
**Figuur 4.2 Beleidsinspanning zonPV (links) en zonthermisch met opslag (rechts) in 2020 onder FA**



## 4.2 EU Budgetten

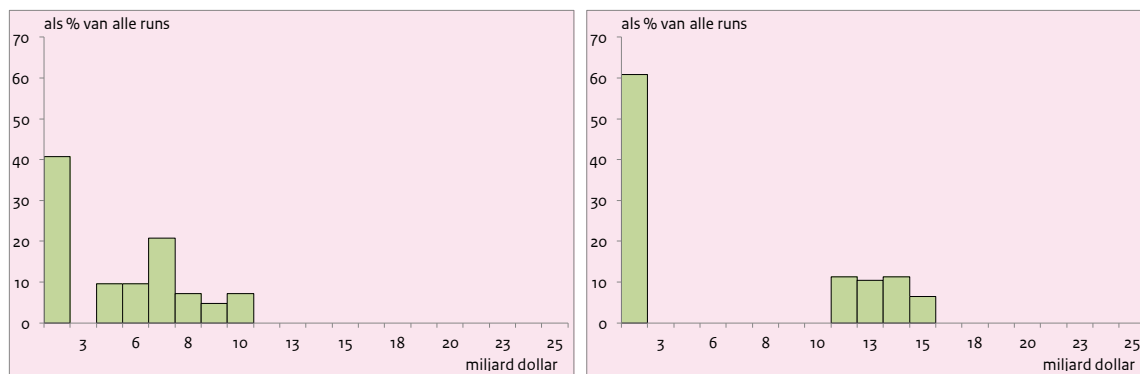
Een additionele beleidsinspanning legt, voor zover deze bestaat uit bijvoorbeeld subsidies, een beslag op de begrotingen van de gezamenlijke EU landen. Om inzicht te krijgen in de omvang van dit beslag nemen we aan dat de additionele beleidsinspanning volledig bestaat uit investeringssubsidies. Figuur 4.3 geeft voor dat geval het gemiddelde jaarlijkse beslag van de additionele beleidsinspanning op de begrotingen van alle EU landen tussen 2015 en 2025 weer onder het GA scenario. Het gemiddelde beslag in 2020 is \$ 7,4 miljard voor zonPV en \$6,8 miljard voor zonthermisch met opslag. De variatie is echter - vooral voor zonthermisch met opslag - groot. Zo is het maximale budget in 2020 voor zonPV \$11,6 miljard en voor zonthermisch \$16,4 miljard. De budgetten bij zonPV zijn hoger naarmate de leereffecten voor de overige technologieën (wind, kolen CCS, gas CCS, biomassa) lager zijn en vice versa, maar hangen niet systematisch samen met de omvang van het leereffect van zonPV zelf. Het EU-budget voor zonthermisch met opslag is in 2020 vrijwel altijd nul als het leereffect 10% of lager is. Bij leereffecten groter dan 10% wordt het EU budget verhoogd naar gemiddeld \$13,6 miljard.

**Figuur 4.3 EU budget zonPV (links) en zonthermisch met opslag (rechts) in 2020 onder GA**



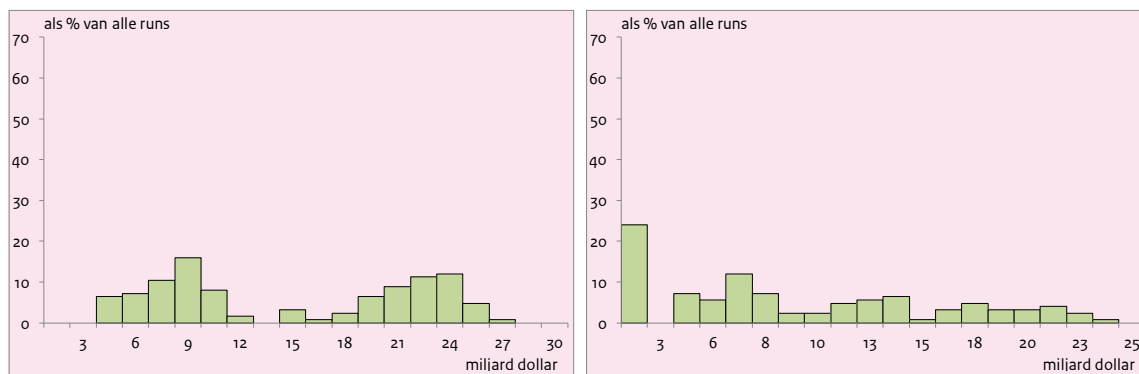
Minder stringente emissiereductie in de rest van de wereld leidt ertoe dat de EU budgetten dalen. Vergelijking van figuur 4.4 met 4.3 laat zien dat het gemiddelde budget voor zonPV in 2020 daalt van \$7,4 naar \$3,5 miljard. Voor zonthermisch is de daling, van \$ 6,8 naar \$ 4,7 miljard, beduidend minder. De daling voor zonPV wordt vooral veroorzaakt door de sterke toename van het aantal gevallen waarin voor zonPV in 2020 geen budget meer wordt gereserveerd.

**Figuur 4.4 EU budget zonPV (links) en zonthermisch met opslag (rechts) in 2020 onder FA**



Tot slot geeft figuur 4.5 het totale EU budget voor zonPV, zonthermisch met opslag en de 4e generatie nucleair weer onder zowel het GA (links) als het FA (rechts) scenario. Wat opvalt, is dat onder het GA scenario het EU budget in 2020 altijd positief is, maar wel een behoorlijke spreiding vertoont van \$ 5,5 tot \$ 16,9 miljard. Gemiddeld is het EU budget in 2020 onder het GA scenario \$ 13,54 miljard. Kijken we vervolgens naar het FA scenario dan valt op dat het gemiddelde budget in 2020 met \$ 8,2 miljard fors lager is. Dit wordt vooral veroorzaakt door het grote aantal gevallen (25%) waarin het EU budget in 2020 nul is.

**Figuur 4.5 Totaal EU budget zon PV en zonthermisch met opslag in 2020 onder GA (links) en FA (rechts)**



### 4.3 Implicaties voor het klimaatbeleid

Efficiënt klimaatbeleid stelt enerzijds de doelen van klimaatbeleid zeker en minimaliseert anderzijds de kosten van de energievoorziening. Het gaat daarbij niet alleen om de huidige kosten, of de kosten over de komende tien jaar, maar om de netto contante waarde van alle, huidige en toekomstige kosten. In dit dynamische perspectief kan de aanwezigheid van leereffecten ertoe leiden dat het op korte termijn loont om 'dure' technologieën in te zetten om zo op de langere termijn te profiteren van lagere kosten van die eens 'dure' technologieën. Het gaat dan vooral - zo tonen de resultaten aan - om zonPV, zonthermisch met opslag en, als er geen ban op nieuw nucleair vermogen is, ook om de 4e generatie nucleair. Ook buiten de elektriciteitssector kan het overigens zinvol zijn om dure technologieën te stimuleren om zo de toekomstige kosten te verlagen.

De resultaten uit de vorige paragraaf laten zien dat voor de wereld als geheel specialisatie in één technologie loont: de kosten van de elektriciteitsvoorziening kunnen alleen geminimaliseerd worden als er op termijn een technologie met een zeer groot marktaandeel verschijnt. Verrassend is deze conclusie niet. Standaardisatie en verregaande penetratie van een bepaalde technologie is van alle tijden. Zo neemt kolen op dit moment ongeveer 48% van de elektriciteitsvoorziening in de EU voor haar rekening. Door de omschakeling naar een duurzame economie zullen de marktaandelen van veel technologieën de komende decennia echter beperkt blijven. Dit is mede een gevolg van de onzekerheid over de omvang van de leereffecten. Hoe snel dalen de kosten van zonPV, zonthermisch met opslag en kolen CCS, eigenlijk bij een verdubbeling van de wereldwijde capaciteit? Deze onzekerheid geeft vanuit de optiewaarde een prikkel om alle technologieopties zo lang als mogelijk open te houden. De keerzijde van het openhouden van deze opties is echter dat het specialisatie en de voordelen die daaraan verbonden zijn, ondermijnt. Op termijn is het optimaal om - op wereldschaal - hooguit enkele technologieën in te zetten en door te ontwikkelen.

Het openhouden van opties is vooral relevant voor technologieën met een lang leertraject. De reden is dat de kosten van een technologie dalen met de *cumulatief* opgebouwde kennis. Kostendalingen als gevolg van LBR zijn daarmee een zaak van de lange adem en lijken dus vooral relevant voor zonPV, zonthermisch met opslag van warmte en de opslag van energie via bijvoorbeeld waterstof. Of wind op zee ook tot deze categorie behoort is onduidelijk. Zonder goede en goedkope opslagmogelijkheden lijkt het potentieel voor fluctuerende bronnen immers beperkt. Als wind op land dat beperkte potentieel kan vullen, is wind op zee vanuit een kostenperspectief inefficiënt.

De mogelijkheid om opties open te houden wordt verder beperkt door de beschikbare emissieruimte. Een gebrek aan emissieruimte impliceert namelijk dat er geïnvesteerd moet worden in duurzame technologie

en dus niet kan worden gewacht totdat de (meer)kosten van duurzame technologie voldoende zijn gedaald.

Hoe kan de omschakeling richting een duurzame elektriciteitsvoorziening vanuit de overheid worden vormgegeven? Met andere woorden, welke instrumenten moet zij inzetten om zowel de gewenste leereffecten als de gewenste emissiereductie tot stand te brengen? Acemoglu et al. (2011) laten zien dat de optimale beleidsmix in dat geval bestaat uit een mix van een CO<sub>2</sub> prijs (via een CO<sub>2</sub> belasting of een emissiehandelssysteem) en een *additionele* beleidsinspanning, waarbij deze additionele beleidsinspanning zich richt op het tot stand brengen van gewenste leereffecten. Deze leereffecten kunnen zowel tot stand worden gebracht via LBD als LBR. Het is daarbij waarschijnlijk dat het relatieve belang van deze twee kanalen tussen technologieën verschilt, waarbij verwacht mag worden dat het belang van LBR vooral bij jonge technologieën relatief groot is.

Een aantal technologieën zal door het beprijzen van CO<sub>2</sub> naar verwachting rond 2020 goedkoper zijn dan traditioneel kolen- en gasgestookt vermogen. Vanaf dat moment hebben zij dus geen additionele beleidsondersteuning meer nodig. Dit geldt met name voor wind en biomassa die bij een CO<sub>2</sub> prijs van gemiddeld \$33 per ton CO<sub>2</sub> al rendabel worden. Voor kolen CCS geldt dat deze geen additionele beleidsondersteuning nodig heeft als de CO<sub>2</sub> prijs hoger is dan \$ 47 per ton CO<sub>2</sub>.<sup>21</sup> In 2020 is een additionele beleidsinspanning voor kolen CCS echter niet altijd aan de orde, omdat slechts in een ongeveer een derde van de gevallen op dat tijdstip in deze techniek wordt geïnvesteerd.

Over de vraag in welke vorm deze additionele beleidsondersteuning het beste kan worden gegoten, geeft de economische literatuur in het geval van LBR nog geen uitsluitel.<sup>22</sup> In theorie zijn verschillende instrumenten mogelijk, zoals verlengde patenten, onderzoekssubsidies, prijsvragen en doelstellingen, waarvan zowel de voor- en nadelen als de onderlinge interactie, nog maar slecht begrepen worden. Met het stimuleren van LbD in de vorm van investeringssubsidies, verruimde aftrekmogelijkheden en feed-in tarieven is overigens al wel de nodige ervaring opgedaan. Daarbij kan in de Nederlandse context bijvoorbeeld worden gedacht aan de Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE en SDE+) en de Energie Investeringsaftrek (EIA).

Bij het optimaal benutten van leereffecten is het cruciaal te beseffen dat leren op een wereldwijde schaal plaatsvindt. Dit heeft een aantal belangrijke implicaties. Zo is het cruciaal om het leerproces wereldwijd op elkaar af te stemmen. Als de rest van de wereld inzet op kolen CCS, dan heeft het voor de EU weinig zin om in te zetten op zonPV of zonthermisch met opslag. De EU heeft in dat geval namelijk onvoldoende massa om de kosten van deze technologieën in voldoende mate te reduceren. Daarbij moet worden beseft dat optimaal leren veronderstelt dat regio's elkaar op de een of andere wijze weten te compenseren voor de spillovers verbonden aan de kennisopbouw. Dat wil zeggen, als de EU leert voor China, dan moet de EU daarvan de baten kunnen plukken (en vice versa).<sup>23</sup> Als dit niet mogelijk is, en dat is gezien de beperkte effectieve patentduur een niet onwaarschijnlijk scenario, dan is het aannemelijk dat de wereld terugvalt op een optie waarin minder geleerd hoeft te worden, zoals kolen CCS. Hetzelfde zagen we ook gebeuren bij een minder stringent wereldwijd klimaatbeleid. In dat geval vermindert de noodzaak voor China om te investeren in zonthermisch met opslag, waardoor het leereffect van die technologie niet op gang komt, en de 'terugvaloptie' kolen CCS in beeld komt.

---

<sup>21</sup> Voor gas CCS kan niet worden vastgesteld of een additionele beleidsinspanning noodzakelijk is of niet, omdat een deel van de meerkosten van gas CCS wordt vergoed vanuit de rol als balansvermogen. Merk op dat de CO<sub>2</sub> prijs waarbij gas CCS rendabel wordt ongeveer \$ 74 per ton CO<sub>2</sub> bedraagt.

<sup>22</sup> In 2011 is het CPB met meerjarig onderzoekstraject gestart naar het meest geschikte beleidsinstrumentarium om innovatie in duurzame technologieën te stimuleren.

<sup>23</sup> In veel van de 125 simulaties zagen we dat regio's ofwel profiteren van leereffecten in andere regio's ofwel andere regio's laten profiteren van de leereffecten in de eigen regio.



## Literatuurverwijzingen

Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous, 2011, The Environment and Directed Technical Change, *American Economic Review*, forthcoming.

Aghion, P., A. Dechezlepretre, D. Hemous, R. Martin en J. Van Reenen, 2010, Carbon taxes, Path Dependency and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry, working paper.

Boeters, S., en J. Koornneef, 2010, Supply of Renewable Energy Sources and the Cost of EU Climate Policy, CPB Discussion Paper 142.

Bollen, J., M. Mulder en T. Manders, 2004, Four Futures for Energy Markets and Climate Change, Special Publication 52, CPB, The Hague.

Europipe, 2010, Towards a transport infrastructure for large-scale CCS in Europe: Development of a large-scale CO<sub>2</sub> transport infrastructure in Europe: matching captured volumes and storage availability, WP2.2 Report, project no. 226317.

Hayden, M., P. Veenendaal, Z. Zarnić, 2010, Options for International Financing of Climate Change Mitigation in Developing Countries, European Economy Economic Papers 406, DG ECFIN, Brussels.

Heide, D., L. von Bremen, M. Greiner, C. Hoffmann, M. Speckmanne en S. Bofinger, 2010, Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe, *Renewable Energy*, 35 (11), 2483-2489.

Heide, D., M. Greiner, L. von Bremen en C. Hoffmann, 2011, Reduced storage and balancing needs in a fully renewable European power system with excess wind and solar power generation, *Renewable Energy*, 36(9), 2515-2523 .

International Energy Agency, 2010, World Energy Outlook 2010, OECD/IEA, Parijs.

Lanzi, E. en I. Sue-Wing, 2010, Directed technical change in the energy sector: an empirical test of induced directed innovation, working paper. [http://www.cer.ethz.ch/sured\\_2010/programme/SURED-10\\_142\\_Lanzi\\_Wing.pdf](http://www.cer.ethz.ch/sured_2010/programme/SURED-10_142_Lanzi_Wing.pdf)

Lejour, A., P. Veenendaal, G. Verweij en N. van Leeuwen, 2006, WorldScan: a Model for International Economic Policy Analysis, CPB Document 111, The Hague.

Lindman, A, and P. Söderholm, 2011, Wind power learning rates: A conceptual review and meta-analysis, *Energy Economics*, forthcoming.

Manders, T. and P. Veenendaal, 2008, Border tax adjustments and the EU-ETS, CPB.

Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D. Frame en M. R. Allen, 2009, Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C, *Nature*, 458, 1158-1162.

Narayanan, B. en T. Walmsley (eds.), 2008, Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 7 Data Base, Center for Global Trade Analysis, Purdue University.

Noailly, J. en R. Smeets, 2011, Directing Technical Change from Fossil-Fuel to Renewable Energy Innovation: An Empirical Investigation Using Patent data, CPB Discussion paper, forthcoming.

PBL, 2011, Routekaart naar een schone economie in Nederland, Mogelijkheden voor een vergaande vermindering van broeikasgasemissies, Bilthoven.

Pizer, W. en D. Popp, 2008, Endogenizing technological change: Matching empirical evidence to modeling needs, *Energy Economics*, 30 (6), 2754-2770.

Wobst, P. (ed.), 2007, Competitiveness Effects of Trading Emissions and Fostering Technologies to Meet the EU Kyoto Targets: A Quantitative Economic Assessment, [Industrial policy and economic reform papers no.4](#), DG ENTR, Brussels.

## Appendix A: Gedetailleerde tabellen

Tabel A.1 Overzicht van regio's, sectoren, technologieën en productiefactoren in WorldScan

<i>Regio's(a)</i>	<i>Sectoren(b)</i>	<i>Inputs(b)</i>
Duitsland	Granen (Tarwe en overige )	<i>Productiefactoren</i>
Frankrijk	Oliezaden	Laaggeschoolde arbeid
Verenigd Koninkrijk	Suiker (Suikerriet, suikerbieten)	Hooggeschoolde arbeid
Italië	Landbouw, overig	Kapitaalgoederen
Spanje	Mineralen NEG	Land
Nederland	Olie	Natuurlijke hulpbronnen
Overig EU15	Steenkool	
Polen	Olie- en steenkoolproducten	<i>Primare energiedragers</i>
Rest van de EU-27	Aardgas (incl. distributie)	Steenkool
Noorwegen	<b>Elektriciteit</b>	Olie- en steenkoolproducten
Zwitserland	<b>Energie intensieve productie (incl. Chemie)</b>	Aardgas
Russische Federatie	Plantaardige oliën en vetten	Moderne biomassa
Oekraïne	Voedingsmiddelen	
VS	Overige consumptiegoederen	<i>Overige halfproducten</i>
Canada	Kapitaalgoederen en duurzame producten	Granen (tarwe & overig)
Japan	Weg- en Spoorvervoer	Oliezaden
Australië	Overige vervoer (water en lucht)	Suiker (Suikerriet, suikerbieten)
Nieuw Zeeland	Overige diensten	Landbouw, overig
Brazilië		Mineralen NEG
<i>Midden Oosten en Noord Afrika</i>	<i>Technologieën om elektriciteit te produceren</i>	Olie
<i>China (incl. Hong Kong)</i>	Fossiele brandstoffen (zonder CCS)	Steenkool
<i>India</i>	Fossiele brandstoffen met CCS	Olie- en steenkoolproducten
<i>Rest van de Wereld</i>	Nucleair	Aardgas (incl. distributie)
	Wind	Electriciteit
	Biomassa	Energie Intensieve producten (incl. Chemische producten)
	Waterkracht	Plantaardige oliën en vetten
		Voedingsmiddelen
	<i>Conventionele biobrandstof technologieën</i>	Overige consumptiegoederen
	Ethanol	Kapitaalgoederen en duurzame producten
	- uit suikerbieten	Weg- en Spoorvervoer
	- uit suikerriet	Overige vervoer (water en lucht)
	- uit tarwe	Overige diensten
	- uit mais	Biodiesel
	Biodiesel	Ethanol

(a) Niet-Annex I regio's zijn cursief gezet

(b) ETS-sectoren en inputs zijn vet gezet

**Tabel A.2 Hoofdlijnen van het basispad, gemiddelde jaarlijkse groei (%), 2004-2020**

	Bevolking	BBP volume	Energie verbruik (a)	BKG emissies	Energie intensiteit	BKG intensiteit (b)
Annex I	0,3	1,8	0,0	0,1	-1,8	-0,0
EU-27	0,3	1,5	0,6	0,5	-1,0	-0,1
Duitsland	-0,1	1,1	0,0	0,2	-1,1	0,0
Frankrijk	0,5	1,3	0,5	0,3	-0,8	-0,2
Verenigd Koninkrijk	0,5	1,6	0,0	0,1	-1,6	0,0
Italië	0,3	0,9	1,7	1,3	0,8	-0,3
Spanje	1,1	2,4	1,1	0,9	-1,3	-0,1
Nederland	0,2	1,3	-0,4	-0,3	-1,8	0,1
Overig EU-15	0,4	1,8	0,8	0,8	-0,9	-0,1
Polen	-0,1	3,2	0,7	0,7	-2,5	-0,3
Overige EU-27	-0,3	3,3	0,7	0,6	-2,7	-0,2
Noorwegen	0,5	1,3	-1,0	-0,7	-2,3	0,2
Zwitserland	0,2	1,2	-0,8	-0,8	-2,1	0,1
Russische Federatie	-0,5	4,4	0,6	0,9	-3,7	0,2
Oekraïne	-0,5	4,3	-0,6	-0,2	-4,9	0,3
VS	0,9	2,1	-0,5	-0,4	-2,6	0,0
Canada	0,9	2,0	0,4	0,2	-1,7	-0,2
Japan	-0,2	1,1	-1,2	-1,0	-2,3	0,1
Australië	1,0	2,1	1,1	0,8	-0,9	-0,4
Nieuw Zeeland	1,1	2,0	0,6	0,2	-1,4	-0,5
Niet-Annex I	1,3	5,4	3,2	3,0	-2,2	-2,9
Brazilië	1,0	3,3	2,5	2,5	-0,8	0,0
Midden Oosten en Noord Afrika	1,8	3,7	1,1	1,3	-2,6	0,1
China (incl. Hong Kong)	0,7	8,2	4,4	3,3	-3,7	-1,1
India	1,3	7,1	4,6	3,2	-2,5	-1,4
Rest van de Wereld	1,5	4,5	2,5	2,6	-1,9	0,1
Wereld	1,1	2,7	1,6	-1,6	-1,1	-1,7
a) Som van steenkool, raffinaderijproducten, aardgas, biobrandstoffen, commerciële biomassa en duurzame energie						
b) BKG-intensiteit is het quotiënt van BKG-emissies en energieverbruik						

Bron: WorldScan

**Tabel A.3 Verschillen in jaarlijkse groeivoeten tussen het WEO scenario en het basispad in WorldScan**

	Bevolking	BBP volume	Energie verbruik (a)	BKG emissies	Energie intensiteit	BKG intensiteit(b)
Annex I	0	0,0	-0,6	-0,3	-0,6	0,4
EU-27	0	0,0	-2,9	-1,0	-2,9	1,9
Duitsland	0	0,0	-2,5	-1,1	-2,4	1,4
Frankrijk	0	0,0	-4,4	-0,8	-4,4	3,6
Verenigd Koninkrijk	0	0,0	-2,7	-0,8	-2,7	1,9
Italië	0	0,0	-3,5	-0,9	-3,5	2,6
Spanje	0	0,0	-3,5	-1,0	-3,4	2,5
Nederland	0	0,0	-1,9	-0,5	-1,9	1,4
Overig EU-15	0	0,0	-4,2	-1,3	-4,1	2,8
Polen	0	-0,1	-2,1	-1,2	-2,0	0,9
Overige EU-27	0	-0,1	-3,1	-1,1	-3,0	1,9
Noorwegen	0	0,0	3,3	0,5	3,3	-2,9
Zwitserland	0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
Russische Federatie	0	0,0	0,3	0,1	0,4	-0,3
Oekraïne	0	0,0	0,2	0,1	0,2	-0,1
VS	0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
Canada	0	0,0	0,3	0,1	0,3	-0,2
Japan	0	0,0	0,1	0,1	0,1	-0,1
Australië	0	0,0	0,2	0,1	0,2	-0,1
Nieuw Zeeland	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Niet-Annex I	0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
Brazilië	0	0,0	0,1	0,0	0,1	-0,1
Midden Oosten en Noord Afrika	0	0,0	0,2	0,1	0,2	-0,1
China (incl. Hong Kong)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
India	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rest van de Wereld	0	0,0	0,2	0,1	0,2	-0,1
Wereld	0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,1

a) Som van steenkool, raffinaderijproducten, aardgas, biobrandstoffen, commerciële biomassa en duurzame energie

b) BKG-intensiteit is het quotiënt van BKG-emissies en energieverbruik

Bron: WorldScan

**Tabel A.4 Emissies, emissiedoelen en emissieprijsen in 2020 in de verschillende varianten**

	alleen EU	A1	A1	Wereldwijde Emissiehandel
		Geen Emissiehandel	Wel Emissiehandel	
<b>Emissies</b>	<b>% verandering t.o.v. basispad</b>			
Duitsland	-23	-22	-16	-15
Frankrijk	-16	-16	-16	-15
Verenigd Koninkrijk	-36	-35	-26	-28
Italië	-43	-42	-27	-27
Spanje	-41	-40	-26	-25
Nederland	-50	-50	-26	-28
Overig EU-15	-45	-45	-46	-46
Polen	-26	-28	-15	-22
Overige EU-27	-34	-35	-26	-29
EU27	-34	-34	-25	-26
OECD	-11	-23	-17	-19
Annex I landen	-7	-19	-18	-21
Niet-annex I landen	2	5	4	-8
Wereld	-1	-3	-3	-13
<b>Emissiedoelen</b>	<b>% verandering t.o.v. basispad</b>			
Duitsland	-34	-34	-34	-34
Frankrijk	-19	-19	-19	-19
Verenigd Koninkrijk	-37	-37	-37	-37
Italië	-42	-42	-42	-42
Spanje	-34	-34	-34	-34
Nederland	-42	-42	-42	-42
Overig EU-15	-28	-28	-28	-28
Polen	-28	-28	-28	-28
Overige EU-27	-37	-37	-37	-37
EU27	-34	-34	-34	-34
OECD		-23	-23	-23
Annex I landen		-18	-18	-18
Niet-annex I landen				
Wereld				
<b>Prijzen</b>	<b>\$/ton CO<sub>2</sub></b>			
ETS	26	28	13	22
NETS	12	15	13	22

**Tabel A.5 Emissies, Emissieplafonds en Emissieprijsen in 2030 in de verschillende varianten**

	alleen EU	A1 Geen Emissiehandel	A1 Wel Emissiehandel	Wereldwijde Emissiehandel
<b>Emissies</b>				
	% verandering t.o.v. basispad			
Duitsland	-40	-40	-23	-22
Frankrijk	-32	-31	-20	-17
Verenigd Koninkrijk	-57	-57	-30	-35
Italië	-72	-72	-62	-59
Spanje	-65	-66	-44	-45
Nederland	-67	-67	-33	-38
Overig EU-15	-56	-56	-47	-46
Polen	-50	-54	-31	-37
Overige EU-27	-49	-48	-32	-35
EU27	-55	-55	-37	-38
OECD	-20	-40	-36	-37
Annex 1 landen	-14	-36	-36	-37
Niet-annex 1 landen	5	12	12	-9
Wereld	-1	-3	-3	-18
<b>Emissiedoelen</b>				
	% verandering t.o.v. basispad			
Duitsland	-52	-52	-52	-52
Frankrijk	-37	-37	-37	-37
Verenigd Koninkrijk	-54	-54	-54	-54
Italië	-73	-73	-73	-73
Spanje	-54	-54	-54	-54
Nederland	-65	-65	-65	-65
Overig EU-15	-48	-48	-48	-48
Polen	-39	-39	-39	-39
Overige EU-27	-54	-54	-54	-54
EU27	-55	-55	-55	-55
OECD		-40	-40	-40
Annex 1 landen		-36	-36	-36
Niet-annex 1 landen				
Wereld				
<b>Emissieprijsen</b>				
		\$/ton CO <sub>2</sub>		
ETS	70	78	44	58
NETS	108	125	44	58

**Tabel A.6 Macro economische gevolgen (a) in 2020 and 2030 in verschillende varianten**

	Klimaat pakket	alleen EU	A1 Geen Emissie handel	A1 Wel Emissie handel	Wereldwijde Emissie handel
2020					
	% verandering t.o.v. basispad				
Duitsland	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	0,0
Frankrijk	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1
Ver. Koninkrijk	-0,4	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4
Italië	-0,3	-0,4	-0,4	-0,2	-0,1
Spanje	-0,3	-0,4	-0,4	-0,2	0,0
Nederland	-0,9	-1,0	-1,0	-0,4	-0,3
Overig EU-15	-0,7	-0,7	-0,4	-0,8	-0,7
Polen	-0,7	-1,0	-1,2	-0,6	-1,0
Overige EU-27	-1,0	-1,0	-0,6	-1,2	-1,2
EU27	-0,4	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3
OECD	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2
Annex 1 landen	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3
Niet-annex 1 landen	0,0	0,0	0,1	0,1	-0,7
Wereld	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,4
2030					
Duitsland	-	-0,7	-0,6	-0,3	-0,2
Frankrijk	-	-0,4	-0,3	-0,2	0,0
Ver. Koninkrijk	-	-0,9	-1,0	-0,5	-0,6
Italië	-	-0,9	-0,8	-0,4	-0,1
Spanje	-	-0,7	-0,6	-0,3	-0,2
Nederland	-	-1,8	-1,8	-0,8	-0,9
Overig EU-15	-	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5
Polen	-	-2,3	-2,4	-1,5	-1,7
Overige EU-27	-	-1,7	-1,6	-1,2	-1,0
EU27	-	-0,8	-0,8	-0,5	-0,4
OECD	-	-0,3	-0,6	-0,5	-0,4
Annex 1 landen	-	-0,4	-0,7	-0,5	-0,5
Niet-annex1 landen	-	0,0	0,1	0,1	-1,0
Wereld	-	-0,2	-0,4	-0,3	-0,7

(a) Hicksian Equivalent variation



**Tabel A.7 Productie veranderingen in 2020 in verschillende varianten**

	alleen EU	A1 Geen Emissiehandel	A1 Wel Emissiehandel	Wereldwijde Emissiehandel
<b>EU27</b>	<b>% verandering t.o.v. basispad</b>			
Granen	-0,7	-0,8	-0,6	-0,7
Oliezaden	-12,3	-12,0	-10,3	-10,8
Suiker	-6,5	-7,6	-6,8	-9,4
Overige landbouw	-0,7	-0,7	-0,6	-0,7
Mineralen NEG	-1,1	-0,9	-0,3	-1,0
Olie	-1,3	-2,4	-2,1	-4,4
Steenkool	-11,5	-14,9	-9,2	-17,2
Olie- en steenkool producten	-7,7	-7,3	-5,1	-4,7
Aardgas, incl. distributie	-4,6	-6,3	-5,8	-8,7
Elektriciteit	-9,6	-9,5	0,0	0,0
Energie intensieve productie	-2,9	-2,8	-1,3	-0,9
Plantaardige oliën en vetten	-2,3	-1,9	-1,4	0,0
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	-1,2	-1,3	-1,1	-1,1
Voedingsmiddelen	-0,7	-0,7	-0,6	-0,8
Overige consumptiegoederen	-1,4	-1,5	-1,2	-1,6
Weg- en spoorvervoer	-1,3	-1,1	-0,8	-0,8
Overig vervoer (water en lucht)	-1,5	-1,0	-1,0	-1,1
Overige diensten	-0,5	-0,4	-0,5	-0,4
<b>Nederland</b>				
Granen	-15,9	-15,4	-0,6	-2,7
Oliezaden	-17,5	-17,0	-14,6	-11,5
Suiker	-16,5	-18,4	-15,6	-19,9
Overige landbouw	-1,7	-1,6	-0,3	-0,6
Mineralen NEG	-2,6	-2,4	-0,4	-0,5
Olie	-1,7	-2,6	-1,5	-4,1
Steenkool	-13,0	-17,1	-7,6	-17,5
Olie- en steenkool producten	-8,7	-8,7	-5,1	-6,3
Aardgas, incl. distributie	-4,9	-6,5	-5,4	-8,5
Elektriciteit	-16,3	-16,3	-3,2	-3,9
Energie intensieve productie	-5,8	-5,3	-1,2	-0,2
Plantaardige oliën en vetten	-1,8	-1,7	0,0	-0,1
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	-1,5	-1,5	-0,9	-0,7
Voedingsmiddelen	-1,9	-2,1	-0,9	-1,3
Overige consumptiegoederen	-1,3	-1,3	-0,8	-1,1
Weg- en spoorvervoer	-1,7	-1,5	-0,8	-0,6
Overig vervoer (water en lucht)	-1,4	-0,9	-0,6	-0,4
Overige diensten	-1,1	-1,0	-0,5	-0,5

**Tabel A.8 Productie veranderingen in 2030 in verschillende varianten**

	alleen EU	A1 Geen Emissiehandel	A1 Wel Emissiehandel	Wereldwijde Emissiehandel
<b>EU27</b>	<b>% verandering t.o.v. basispad</b>			
Granen	-2,1	-2,1	-1,1	-1,5
Oliezaden	-41,8	-40,8	-20,8	-20,3
Suiker	-24,6	-26,5	-13,7	-16,2
Overige landbouw	-1,8	-1,9	-1,0	-1,4
Mineralen NEG	-2,2	-1,9	-0,7	-2,0
Olie	-4,2	-5,8	-2,9	-6,7
Steenkool	-18,2	-23,1	-13,0	-20,3
Olie- en steenkool producten	-21,6	-21,1	-8,7	-7,2
Aardgas, incl. distributie	-6,6	-10,2	-6,1	-9,1
Elektriciteit	-24,3	-24,2	-12,1	-11,7
Energie intensieve productie	-5,9	-5,7	-3,1	-2,1
Plantaardige oliën en vetten	-8,2	-7,8	-3,4	-1,4
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	-2,3	-2,6	-1,7	-1,5
Voedingsmiddelen	-1,8	-1,9	-1,1	-1,3
Overige consumptiegoederen	-3,0	-3,3	-2,2	-2,4
Weg- en spoorvervoer	-4,9	-4,8	-1,7	-1,2
Overig vervoer (water en lucht)	-5,8	-5,3	-1,6	-0,9
Overige diensten	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
<b>Nederland</b>				
Granen	-48,3	-48,0	-18,5	-20,9
Oliezaden	-61,8	-64,1	-31,4	-29,0
Suiker	-46,4	-48,8	-27,5	-31,1
Overige landbouw	-7,9	-7,8	-2,0	-2,7
Mineralen NEG	-6,3	-5,7	-1,9	-2,2
Olie	-3,7	-5,1	-2,1	-6,3
Steenkool	-17,4	-22,9	-9,7	-18,5
Olie- en steenkool producten	-27,3	-27,7	-9,9	-12,3
Aardgas, incl. distributie	-5,3	-8,6	-5,4	-8,4
Elektriciteit	-37,6	-38,0	-25,0	-25,7
Energie intensieve productie	-13,7	-13,0	-5,2	-2,8
Plantaardige oliën en vetten	-4,5	-3,7	-0,5	-0,6
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	-2,1	-2,3	-1,2	-0,8
Voedingsmiddelen	-5,0	-5,2	-2,1	-2,9
Overige consumptiegoederen	-1,6	-1,7	-0,8	-1,0
Weg- en spoorvervoer	-6,1	-6,0	-1,6	-0,6
Overig vervoer (water en lucht)	-6,0	-5,4	-0,8	0,6
Overige diensten	-1,3	-1,2	-0,4	-0,6

**Tabel A.9 Veranderingen in de werkgelegenheid per variant in 2020**

	alleen EU	A1 Geen Emissiehandel	A1 Wel Emissiehandel	Wereldwijde Emissiehandel
<b>EU27</b>				
Granen	0,0	0,3	-0,3	-0,4
Oliezaden	-8,8	-7,2	-6,8	-6,2
Suiker	-3,6	-3,9	-4,2	-5,9
Overige landbouw	0,1	0,3	-0,2	-0,4
Mineralen NEG	-0,7	-1,4	0,2	-0,6
Olie	-5,0	-7,8	-7,2	-14,4
Steenkool	-46,6	-53,2	-42,4	-54,7
Olie- en steenkool producten	-6,2	-5,7	-4,2	-4,1
Aardgas, incl. distributie	-12,2	-15,4	-16,2	-21,8
Elektriciteit	20,1	4,9	30,3	30,9
Energie intensieve productie	-1,4	-1,6	-0,8	-0,5
Plantaardige oliën en vetten	-0,8	0,0	-0,3	1,4
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	-0,7	-0,6	-0,8	-0,8
Voedingsmiddelen	0,1	0,4	-0,3	-0,4
Overige consumptiegoederen	-0,6	-0,4	-0,9	-1,3
Weg- en spoorvervoer	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4
Overig vervoer (water en lucht)	-0,6	0,0	-0,5	-0,8
Overige diensten	0,0	0,2	-0,2	-0,2
<b>Nederland</b>				
Granen	-12,2	-18,9	-0,3	-2,0
Oliezaden	-16,2	-13,9	-14,0	-10,8
Suiker	-9,4	-10,2	-10,1	-13,1
Overige landbouw	-0,4	-0,4	0,0	-0,3
Mineralen NEG	-1,2	-1,9	0,2	0,1
Olie	-6,5	-9,6	-7,2	-15,1
Steenkool	-43,2	-49,3	-34,6	-50,3
Olie- en steenkool producten	-6,8	-6,8	-4,4	-6,0
Aardgas, incl. distributie	-16,5	-20,2	-18,7	-25,2
Elektriciteit	58,2	39,3	34,3	37,3
Energie intensieve productie	-3,4	-4,3	-0,7	0,3
Plantaardige oliën en vetten	-0,2	0,1	0,5	0,4
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	-0,4	-0,1	-0,5	-0,3
Voedingsmiddelen	-0,1	-0,1	-0,3	-0,8
Overige consumptiegoederen	-0,2	0,4	-0,4	-0,7
Weg- en spoorvervoer	-0,5	-0,3	-0,3	-0,4
Overig vervoer (water en lucht)	0,0	0,7	-0,1	-0,2
Overige diensten	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2

**Tabel A.10 Veranderingen in de werkgelegenheid per variant in 2030**

	alleen EU	A1 Geen Emissiehandel	A1 Wel Emissiehandel	Wereldwijde Emissiehandel
<b>EU27</b>				
Granen	0,2	0,2	-0,1	-0,6
Oliezaden	-34,4	-32,8	-14,5	-13,2
Suiker	-15,5	-16,9	-8,5	-10,4
Overige landbouw	0,4	0,3	-0,1	-0,5
Mineralen NEG	-1,7	-1,3	-0,2	-1,9
Olie	-16,7	-22,3	-12,5	-26,6
Steenkool	-62,6	-69,1	-55,9	-66,5
Olie- en steenkool producten	-12,5	-11,4	-5,3	-4,3
Aardgas, inc distributie	-20,6	-30,1	-21,7	-29,1
Elektriciteit	4,2	4,8	14,6	16,0
Energie intensieve productie	-2,4	-2,3	-1,5	-0,6
Plantaardige oliën en vetten	-3,0	-2,6	-0,9	1,4
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	-1,0	-1,4	-1,1	-0,9
Voedingsmiddelen	0,3	0,2	-0,2	-0,5
Overige consumptiegoederen	-0,9	-1,3	-1,1	-1,4
Weg- en spoorvervoer	-1,7	-1,5	-0,4	-0,4
Overig vervoer (water en lucht)	-2,2	-1,6	-0,2	-0,2
Overige diensten	0,4	0,4	0,1	0,1
<b>Nederland</b>				
Granen	-39,8	-39,6	-14,2	-16,5
Oliezaden	-59,9	-62,3	-30,0	-27,6
Suiker	-31,9	-34,3	-17,4	-20,4
Overige landbouw	-3,2	-3,2	-0,5	-1,3
Mineralen NEG	-3,6	-3,1	-0,7	-1,0
Olie	-16,7	-22,2	-12,6	-28,4
Steenkool	-59,8	-67,0	-48,7	-62,1
Olie- en steenkool producten	-20,1	-20,4	-7,5	-10,9
Aardgas, inc distributie	-23,2	-32,9	-25,4	-33,9
Elektriciteit	31,6	30,6	-5,6	5,0
Energie intensieve productie	-8,0	-7,5	-2,9	-0,8
Plantaardige oliën en vetten	-0,3	0,5	1,1	1,1
Kapitaalgoederen en duurzame goederen	0,3	0,0	-0,2	0,2
Voedingsmiddelen	-0,7	-1,0	-0,4	-1,1
Overige consumptiegoederen	0,8	0,7	0,2	0,0
Weg- en spoorvervoer	-2,0	-1,8	-0,2	0,3
Overig vervoer (water en lucht)	-0,9	-0,2	0,8	1,4
Overige diensten	0,3	0,3	0,2	0,0

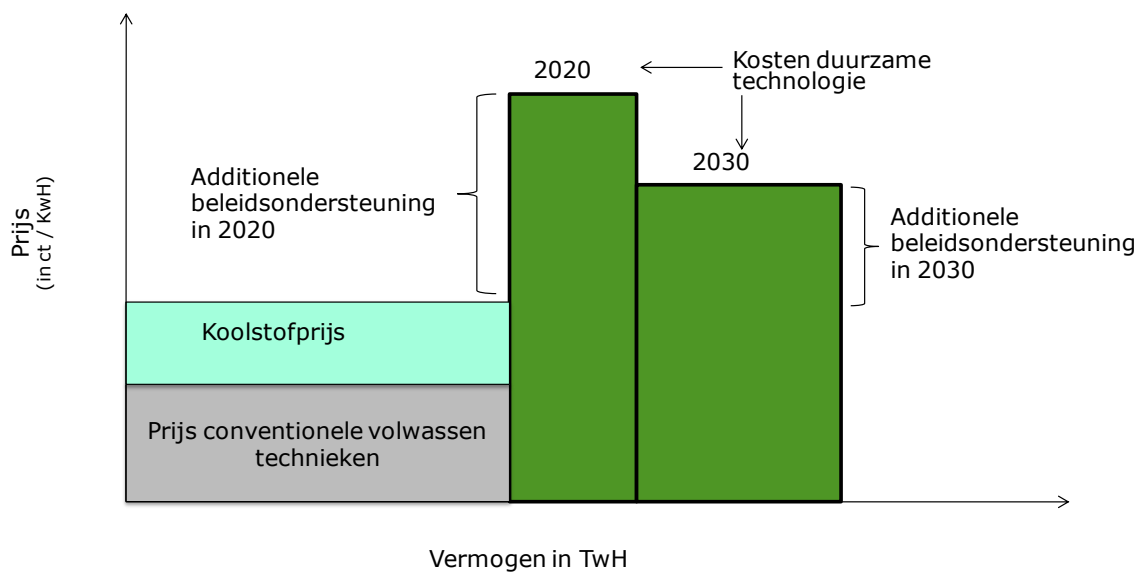
Tabel A.11 Belangrijkste resultaten in 2020 per variant

	alleen EU	A1 Geen Emissiehandel	A1 Wel Emissiehandel	Wereldwijde Emissiehandel
Duitsland	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
Frankrijk	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1
Verenigd Koninkrijk	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4
Italië	-0,4	-0,3	-0,2	0,0
Spanje	-0,4	-0,4	-0,2	-0,1
Nederland	-0,9	-0,9	-0,4	-0,4
Overig EU15	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7
Polen	-1,0	-1,1	-0,6	-0,9
Overig EU27	-1,0	-1,0	-1,2	-1,1
Norwegen	-0,6	-1,0	-0,9	-1,5
Zwitserland	0,2	0,1	0,0	0,1
Russische Federatie	-1,1	-1,5	-1,4	-2,1
Oekraïne	0,3	0,5	3,0	4,8
VS	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
Canada	0,0	-0,4	-0,4	-0,5
Japan	0,1	-0,3	-0,1	0,0
Australië	-0,2	-0,9	-0,7	-1,3
Nieuw Zeeland	0,0	-2,2	-0,3	-0,4
Brazilië	0,1	0,3	0,3	-0,6
Midden Oosten en Noord Afrika	-0,1	-0,4	-0,3	-1,9
China (incl Hongkong)	0,1	0,1	0,1	-0,8
India	0,1	0,3	0,2	-0,3
Rest van de wereld	0,0	0,1	0,1	0,2
EU27	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3
OECD	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2
Annex 1 landen	-0,2	-0,4	-0,3	-0,3
Niet-annex1 landen	0,0	0,1	0,1	-0,4
China en India	0,1	0,1	0,1	-0,7
Wereld	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3
<b>Totalen voor de hele Wereld van:</b>				
BKG emissies Gton CO2 eq. (% afwijking t.o.v. basispad)	-0,7	-2,7	-2,9	-12,6
Koolstof lekkage voet (%)	79,3	56,1	50,3	21,4
Productie lekkage voet Energie intensieve productie (%)	89,7	76,6	106,1	
Productie lekkage Energie intensieve productie (% afw. basispad)	2,6	2,1	1,7	

**Tabel A.12 Belangrijkste resultaten in 2030 per variant**

	alleen EU	A1 Geen Emissiehandel	A1 Wel Emissiehandel	Wereldwijde Emissiehandel
Duitsland	-0,7	-0,6	-0,3	-0,1
Frankrijk	-0,4	-0,3	-0,2	0,0
Verenigd Koninkrijk	-0,9	-1,0	-0,5	-0,6
Italië	-0,9	-0,8	-0,4	-0,1
Spanje	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2
Nederland	-1,7	-1,8	-0,8	-0,8
Overig EU15	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5
Polen	-2,3	-2,4	-1,5	-1,7
Overig EU27	-1,7	-1,6	-1,2	-1,0
Noorwegen	-1,1	-2,2	-1,7	-2,8
Zwitserland	0,5	0,4	0,2	0,4
Russische Federatie	-2,6	-4,0	-3,1	-4,5
Oekraïne	0,4	2,0	4,2	6,1
VS	0,0	-0,3	-0,4	-0,3
Canada	-0,1	-2,4	-1,0	-1,3
Japan	0,1	-0,4	-0,3	-0,2
Australië	-0,5	-1,1	-1,3	-1,9
Nieuw Zeeland	-0,1	-1,3	-0,5	-0,5
Brazilië	0,1	0,7	0,8	-0,8
Midden Oosten en Noord Afrika	-0,2	-0,5	-0,4	-4,3
China (incl Hongkong)	0,1	0,1	0,2	-2,1
India	0,1	0,4	0,4	-0,6
Rest van de wereld	0,0	0,1	0,1	0,5
EU27	-0,8	-0,8	-0,5	-0,4
OECD	-0,3	-0,6	-0,5	-0,4
Annex 1 landen	-0,4	-0,7	-0,5	-0,5
Niet-annex1 landen	0,0	0,1	0,1	-1,0
China en India	0,1	0,2	0,2	-1,7
Wereld	-0,2	-0,4	-0,3	-0,7
<b>Totalen voor de hele Wereld van:</b>				
BKG emissies Gton CO2 eq. (% afwijking t.o.v. basispad)	-0,5	-3,1	-3,1	-17,9
BKG lek coëfficiënt	91,4	71,9	72,3	25,8
BKG lek coëfficiënt voor Energie intensieve productie	88,8	91,3	111,1	
BKG lek coëfficiënt voor Energie intensieve productie (% afw. basispad)	5,2	5,2	4,2	

## Appendix B: Beleidsondersteuning





Dit is een uitgave van:

Centraal Planbureau  
Van Stolkweg 14  
Postbus 80510 | 2508 GM Den Haag  
T (070) 3383 380

[info@cpb.nl](mailto:info@cpb.nl) | [www.cpb.nl](http://www.cpb.nl)

November 2011